



REGIONE TOSCANA
Consiglio Regionale

PIANETA GALILEO 2005

A cura di Alberto Peruzzi

Consiglio Regionale della Toscana
Area di Coordinamento per la Comunicazione e la Rappresentanza

Grafica e impaginazione: Patrizio Suppa, Ufficio Editoriale
Composizione e stampa: Centro stampa

Finito di stampare nel mese di giugno 2006
presso il Centro Stampa del Consiglio Regionale della Toscana,
via Cavour, 4 - Firenze

INDICE

Presentazione <i>Riccardo Nencini e Gianfranco Simoncini</i>	5
Introduzione <i>Alberto Peruzzi</i>	7
Lezione Galileiana - Il cambiamento nell'immagine del mondo: spazio e tempo dopo Einstein <i>Carlo Rovelli</i>	9
PROSPEZIONI	
A proposito della logica: sul concetto d'inferenza <i>Andrea Cantini</i>	23
Il fascino dell'infinito <i>Franca Cattelani Degani</i>	35
Matematica a partire dagli insiemi o dalle categorie? <i>Gabriele Lolli</i>	51
L'impostazione categoriale della matematica <i>Alberto Peruzzi</i>	73
L'idea di natura nel mondo antico <i>Daniela Fausti (con interventi di Doralice Fabiano, Katia Verdiani, Silvia Zambon)</i>	89
Aristotele, Galileo, Newton: forza, velocità e accelerazione <i>Andrea Frova</i>	103
Forza, velocità e accelerazione: uno sguardo contemporaneo ai principi della dinamica <i>Egidio Longo</i>	111
Oltre l'abiura: gli ultimi anni di Galileo <i>Mariapiera Marenzana</i>	119
Le forze di legame tra gli atomi: una fantasia senile di Galileo <i>Andrea Frova</i>	129
Sull'intreccio e sull'opposizione magia-scienza <i>Paolo Rossi</i>	137
Geometria non euclidea: un caso esemplare nella storia del pensiero scientifico <i>Renato Betti</i>	149
Introduzione alla teoria della relatività <i>Claudio Chiuderi</i>	163
Albert Einstein: il lato umano <i>Roberto Fieschi</i>	175
Filosofia e scienza <i>Paolo Parrini</i>	187
Federigo Enriques, filosofo <i>Ornella Pompeo Faracovi</i>	193
Da Kant a Einstein: un dibattito	
Presentazione <i>Alberto Peruzzi</i>	205
La scienza e il suo riflesso trascendentale: da Kant a Cassirer <i>Luca Landi</i>	207
I filosofi e la scienza: da Kant ad Einstein <i>Paolo Parrini</i>	215
Su l'attualità dell'apriori kantiano <i>Silvestro Marcucci</i>	219
La filosofia della scienza in Italia <i>Paolo Parrini</i>	229
La cultura filosofica italiana e la scienza <i>Alessandro Pagnini</i>	239

Per una fondazione etica della biologia. Riflessioni storico-filosofiche <i>Stefano Miniati</i>	251
Il cervello e l'enigma delle lingue impossibili <i>Andrea Moro</i>	275
La robotica <i>Carlo Alberto Avizzano</i>	285
Robot come psicologia <i>Domenico Parisi</i>	301
Scienza e musica: perché piace la musica che piace <i>Andrea Frova</i>	309
SCIENZA E SOCIETÀ	
Uso razionale ed efficiente dell'energia <i>Riccardo Basosi</i>	321
Quali risorse energetiche? <i>Roberto Vacca</i>	331
La prevenzione del disagio giovanile <i>Stefano Calamandrei</i>	339
Progresso scientifico-tecnologico e sviluppo economico nella Cina contemporanea <i>Guido Samarani</i>	345
ISTRUZIONE, RICERCA, TRASFERIMENTO	
La diffusione della mentalità scientifica <i>Carlo Bernardini</i>	355
Scienza e scuola: oggi e domani <i>Franco Cambi</i>	367
E poi ogni mattina si entra in classe... incuriosire, motivare, costruire competenze significative insegnando scienze <i>Rossana Nencini</i>	373
L'importanza della storia del pensiero scientifico nell'insegnamento delle scienze <i>Brunella Danesi</i>	383
Quali condizioni per un insegnamento scientifico significativo? <i>Carlo Fiorentini</i>	393
Quante e quali tipologie di e-learning? <i>Antonio Calvani</i>	401
I laureati tra sistema universitario e sistema produttivo in Toscana <i>Sara Mele e Alessandro Petretto</i>	409
Start up innovative e problemi di finanziamento <i>Ada Carlesi</i>	423
La mobilità per motivi di studio e di lavoro dei laureati Toscani <i>Andrea Cammelli</i>	431

PRESENTAZIONE

Formare le coscienze dell'oggi: dalla scienza gli stimoli all'innovazione, al cambiamento, al coraggio intellettuale

Non è stato solo 'giocare con la scienza' il viaggio che Pianeta Galileo ha intrapreso fra i giovani e i meno giovani dal novembre 2004. La nostra iniziativa nacque con l'idea di una kermesse o ancor meglio, vista con gli occhi di oggi, quasi di una *pièce* teatrale dove intellettuali, scienziati, filosofi, astrofisici, interpretassero, come attori consumati, il ruolo di guide che accompagnavano gli spettatori-cittadini fra numeri e apparati, telescopi e mostre, facendo divertire e scoprire emozioni.

È stato un grande successo, che si è ripetuto nel 2005 e che anche nel 2006 proveremo a rinnovare con una serie ulteriore di iniziative che stanno alla base della nostra concezione di scienza come 'costrutto sociale', in grado cioè di trasmettere valori, nel segno, appunto, di Galileo. I nostri tempi sono purtroppo segnati da violenze e fondamentalismi di varia natura ai quali manca quella disponibilità alla comprensione reciproca, al colloquio, al rispetto delle opinioni degli altri.

Pur tuttavia soprattutto la scienza può aiutare i cittadini di domani alla difficile penetrazione della conoscenza in una realtà consolidata e riottosa al cambiamento.

Di qui l'obbiettivo primo e principe di Pianeta Galileo: il ruolo della educazione scientifica come momento essenziale nella formazione della persona, cioè di un cittadino responsabile e pienamente partecipe della società civile. 'Incontrare' la realtà naturale, riflettere sul suo rapporto con l'uomo, adottare un linguaggio adeguato per comprendere la tensione etica che sottostà all'amore per la conoscenza: tutto questo è Pianeta Galileo; tutto questo è valorizzare l'uomo *tout court*, nella pluralità delle sue dimensioni, al centro dell'universo.

Come abbiamo scritto nella presentazione dell'altra edizione del Pianeta Galileo, scoprire la scienza può divertire senza diventare noiosi, può affascinare facendo provare emozioni.

Ma oggi, di fronte ad un mondo percorso da fremiti di follia non basta solo lo strumentale ricorso al gioco e alle emozioni. Per questo il ventaglio delle iniziative, delle lezioni, delle mostre, dei convegni, delle conferenze, è più ampio e articolato, là dove si possono scorgere i grandi temi della responsabilità dello scienziato nei confronti della società, la libertà di ricerca scientifica di fronte ai condizionamenti del potere politico, la crisi delle certezze dell'uomo, i conflitti fra scienza e fede, fra scienza e etica: in buona sostanza fra lo spirito rinascimentale che fioriva in quei secoli vicini a Galileo e le atmosfere cupe nelle quali oggi ci troviamo immersi.

Lasciamoci guidare da Pianeta Galileo e potremo trovare, fra 'sapere' e 'piacere' qualche risposta e qualche conforto.

RICCARDO NENCINI
Presidente del Consiglio Regionale

GIANFRANCO SIMONCINI
*Assessore Regionale
all'istruzione, formazione, lavoro*

INTRODUZIONE

ALBERTO PERUZZI

Università di Firenze

Dal 3 ottobre al 7 novembre 2005 si è svolta nelle dieci province della Toscana la seconda edizione di *Pianeta Galileo*, un'iniziativa del Consiglio Regionale finalizzata a far conoscere la scienza ai giovani, favorire l'innovazione nell'insegnamento delle scienze nelle scuole della Toscana, promuovere occasioni di pubblico dibattito su temi dell'odierna ricerca, sull'impiego delle nuove tecnologie, sui rapporti tra scienza e società.

Pianeta Galileo intende rispondere a un'esigenza di importanza primaria, che scaturisce dalla convinzione che una cultura scientifica è componente indispensabile nella formazione di cittadini di una società democratica. Se infatti l'iniziativa si propone, in primo luogo, una maggiore diffusione della conoscenza scientifica fra i giovani, non intende ciò come un'erogazione divulgativa di risultati, bensì come occasione per capire le modalità con cui si esercita un atteggiamento scientifico, attraverso il contatto diretto dei giovani con chi ha fatto e fa ricerca. Allorché l'iniziativa si propone di fornire strumenti concettuali avanzati per l'innovazione didattica nei diversi ambiti del sapere, aprendo il mondo della scuola a un più fattivo rapporto con il mondo della ricerca, l'accento è posto sulla conoscenza di *cosa* si insegna prima che sul *come* lo si insegna (senza con ciò sminuire il ruolo della metodologia educativa). Infine, se l'iniziativa vuole offrire l'opportunità di una pubblica riflessione sul valore della scienza, che favorisca maggiore consapevolezza del divenire storico delle idee (e delle teorie) scientifiche così come maggiore consapevolezza nei confronti delle attuali tecnologie, questa riflessione intende aiutare la formazione di un'immagine più adeguata della scienza: diversa tanto dall'immagine che mitizza gli scienziati come moderni maghi quanto da quella che li assimila a esperti, privi di coscienza critica nei confronti della realtà sociale.

Al pari dell'idea che i problemi posti dalla realtà odierna non si possano affrontare mantenendo disgiunti gli interventi in campo educativo da quelli relativi a ricerca e sviluppo, un altro tratto ispiratore di *Pianeta Galileo* è dunque l'idea che l'efficacia di tali interventi dipenda in maniera essenziale dalla promozione di una *forma mentis* scientifica, di cui si avverte una tanto diffusa quanto preoccupante carenza. Per stimolare questa *forma mentis* non basta un incremento della divulgazione, pur meritorio e tutt'altro che facile; occorre anche sviluppare un esercizio di riflessione critica sul metodo (sui metodi) della scienza e un orientamento attivo verso l'individuazione di problemi, accanto alla trasmissione delle procedure con cui i problemi già risolti sono stati, appunto, risolti. Un aspetto decisivo della mentalità scientifica consiste infatti nel

porsi domande e nel precisarle, tanto quanto nel trovare le risposte con il ragionamento e con la sperimentazione.

In corrispondenza con ciascuno di questi diversi aspetti e scopi dell'iniziativa, il programma di *Pianeta Galileo* ha visto un'articolazione differenziata di manifestazioni, rivolte a studenti della scuola secondaria superiore, a insegnanti, alla cittadinanza nel suo complesso, senza dimenticare alcuni eventi rivolti espressamente a un primo incontro dei bambini con la scienza. Anche le modalità sono state varie: lezioni-incontro a carattere divulgativo, dibattiti, esperienze di laboratorio, proiezione di documentari scientifici, cui si sono aggiunti seminari di ricerca, conferenze, incontri tra insegnanti, visite guidate a centri di ricerca, a musei, a siti archeologici, a osservatori astronomici. La partecipazione è stata notevole: sulla base dei dati che finora sono pervenuti da sei delle dieci province e che sono relativi, in maniera pressoché esclusiva, agli studenti e agli insegnanti che hanno preso parte alle varie manifestazioni, si è raggiunto una cifra prossima alle venticinquemila presenze.

I testi qui di seguito raccolti sono una testimonianza, parziale ma pur sempre cospicua, dei temi affrontati e dello sforzo che gli studiosi intervenuti alle varie manifestazioni hanno compiuto per riuscire a comunicare idee e risultati nella maniera più semplice senza che ciò andasse a detrimento della 'sostanza'. Unitamente ai testi è disponibile anche un DVD che comprende la videoregistrazione di tre *Seminari di base* rivolti agli insegnanti.

Nel 2005 si sono svolte numerose manifestazioni in tutto il mondo per celebrare l'anno mondiale (*annus mirabilis*) della fisica e più precisamente di Albert Einstein, che appunto nel 1905 pubblicò lavori di straordinaria importanza, contenenti la formulazione della relatività speciale, l'analisi del moto browniano, la descrizione del carattere quantico dell'energia nell'effetto fotoelettrico. Unitamente alle molte altre iniziative celebrative del centenario in Italia e all'estero, *Pianeta Galileo* ha riservato alla figura di Einstein, alla scoperta della teoria della relatività e alle conseguenze della relatività in ambito astronomico e cosmologico una serie di eventi, attraverso i quali si è voluto anche dar risalto allo spirito di ricerca che Einstein ha impersonato. Di ciò si trova traccia in diversi contributi al presente volume, a partire dalla *Lezione Galileiana* d'apertura (che il 3 ottobre ha inaugurato la manifestazione). Le tre sezioni in cui il volume poi si articola, cioè *Prospezioni*, *Scienza e società*, *Istruzione-ricerca-trasferimento*, corrispondono non tanto alla tipologia degli eventi che hanno fornito l'occasione ai relatori per redigere il testo, quanto a un'organizzazione tematica che si spera possa favorirne la fruizione.

A nome del Comitato Scientifico di *Pianeta Galileo*, ringrazio tutti coloro che hanno contribuito alla realizzazione di questo volume in tempi così insolitamente brevi (quando analoghe pubblicazioni richiedono in media un paio di anni) ed esprimo l'auspicio che questa iniziativa del Consiglio Regionale della Toscana possa svilupparsi nel prossimo futuro, distribuendosi ancor più sul territorio, per rispondere a quel bisogno di cultura scientifica che nel corso delle manifestazioni di *Pianeta Galileo 2005* è stato concordemente espresso da studenti, insegnanti, rappresentanti delle istituzioni locali e degli atenei toscani.

LEZIONE GALILEANA

IL CAMBIAMENTO NELL'IMMAGINE DEL MONDO: SPAZIO E TEMPO DOPO EINSTEIN

CARLO ROVELLI

Centre de Physique Théorique, Université de la Méditerranée – Aix-Marseille II

È per me un onore grandissimo tenere una conferenza con una denominazione emozionante come “Lezione Galileiana”. Galileo Galilei è non solo il personaggio che – in parte qui a Firenze – ha gettato le basi della scienza moderna. È lui che ha trovato sperimentalmente la prima legge matematica che regola il movimento dei corpi sulla Terra. Ma è pure, ancora oggi, una fonte di ispirazione vivissima per chi, come me, si occupa di scienza.

Nel titolo di questa mia lezione vi è il nome di Einstein. Come probabilmente sapete – quest’anno se ne è parlato molto – esattamente 100 anni fa, nel 1905, Albert Einstein pubblica una serie straordinaria di articoli, che stanno oggi alla base della fisica del XX secolo -di moltissime delle sue applicazioni che hanno cambiato la nostra vita, dai computers alla bomba atomica, fino al GPS che sta nelle automobili. Einstein è stato scelto da *Time magazine* come l’uomo che più fortemente ha influenzato e caratterizzato il XX secolo. Questi lavori di Einstein del 1905, e la loro continuazione, poco dopo, nel 1915 (quando l’Europa si era già gettata nel baratro che inizia il suo lungo e lento suicidio come potenza dominante nel mondo) mettono in discussione profondamente proprio quella visione galileiana-newtoniana del mondo, che aveva permesso gli immensi risultati della fisica classica, e la cambiano radicalmente. Soprattutto cambiando in profondità le nozioni di *spazio* e di *tempo*, che stanno alla base della costruzione di pensiero galileiana-newtoniana.

A sua volta, il lavoro di Einstein, nonostante il suo successo completo, lascia delle questioni aperte, o per meglio dire apre dei problemi nuovi, problemi che cento anni dopo Einstein non sono ancora del tutto risolti, e il mio lavoro consiste nello studiare possibili soluzioni a questi problemi. Queste soluzioni rimettono in gioco ancora una volta le nozioni di *spazio* e di *tempo*, e approfondiscono ulteriormente, nella direzione individuata da Einstein, ma in modo ancora più radicale, il cambiamento delle nozioni classiche di *spazio* e di *tempo*.

In questa conversazione, vorrei arrivare, alla fine, a raccontare in maniera molto semplice il nocciolo della rivoluzione einsteiniana, e delle ricerche odierne sullo spazio

e sul tempo. In che modo sono cambiati, e stanno cambiando i concetti di spazio e di tempo, rispetto alle nozioni comuni di spazio e tempo o rispetto a quello che la maggior parte di noi ha studiato al liceo nelle poche ore e spesso, a mia memoria, molto poco convincenti ore di fisica.

Prima di arrivare a questo, però, e per poter arrivare a dirvi qualcosa di ragionevole sull'argomento, c'è un altro tema, molto più generale, su cui vorrei centrare questa chiacchierata. È un argomento che mi sembra necessario sia per comprendere che cosa sono queste modificazioni concettuali con le quali 'cambiano' le nozioni di spazio e di tempo, sia, più in generale (credo), per apprezzare a fondo il significato di questa continua e grande avventura intellettuale che è la scienza, cui è dedicato questo mese 'toscano'.

Il punto che vorrei discutere stasera è il seguente. Galileo, con Copernico e Newton hanno rifondato le basi concettuali per comprendere il mondo. La struttura concettuale che hanno messo in piedi si è rivelata di straordinaria efficacia. Non è esagerato dire che il mondo moderno, come lo conosciamo, non avrebbe potuto esistere, senza questa base concettuale. La struttura concettuale galileana-newtoniana è usata quotidianamente per costruire ponti, automobili, televisioni, aereoalpi. Mio padre, che è ingegnere e realizza costruzioni in cemento armato precompresso, usa equazioni che sono derivate direttamente dalle equazioni di Galileo e Newton. Poi Einstein ha cambiato tutto alla base. E oggi queste basi concettuali sono nuovamente rimesse in discussione e stanno cambiando.

Ma allora – questo è il punto che voglio affrontare –, che cosa sappiamo veramente del mondo? In qualche modo, Galileo e Newton si sbagliavano. E anche Einstein in qualche modo si sbagliava, visto che si cambia ancora. Che razza di conoscenza è una conoscenza che non sta mai ferma? Non possiamo mai essere sicuri di nulla? Non possiamo avere una credibile immagine del mondo a cui fare riferimento? Questo è l'argomento principale che vorrei discutere stasera: l'aspetto dinamico, della conoscenza scientifica. Le modifiche delle nozioni di *spazio* e di *tempo*, con Einstein, e dopo Einstein, diventano più comprensibili se viste come esempi, in effetti un esempio primario, forse quello centrale, di questo aspetto dinamico della conoscenza scientifica.

Che cos'è la scienza? Io non penso che la scienza sia un modo di pensare molto *diverso* dal nostro ordinario modo di pensare il mondo. Noi siamo abituati, nella nostra vita quotidiana, a venire in contatto con situazioni nuove, che all'inizio capiamo poco, e poi, lentamente, comprendiamo sempre meglio. Per esempio, arriviamo in una città in cui non siamo stati prima. All'inizio ne abbiamo un'immagine mentale molto vaga, ma poi ci orientiamo sempre di più, ci costruiamo una carta mentale della città in cui siamo, che diventa via via più precisa man mano che abbiamo più dati. In questo processo spesso cambiamo i termini con cui pensare la città. Quando venivo a Firenze le prime volte, pensavo che da un lato della città ci fossero i colli, e mi orientavo (male) così, prima di scoprire che i colli stanno in realtà da più di un lato, e così via.

La *scienza* è semplicemente il processo con cui compiamo questa stessa operazione

di orientarci e comprendere il mondo intorno a noi, non però nell'esperienza di un singolo, ma nell'esperienza accumulata e comune di tutta l'umanità. Più precisamente, è il processo di trovare il modo migliore per pensare e organizzare la moltitudine svariata di fenomeni che sono intorno a noi, in termini *razionali*, basandoci sulla nostra ragione, la nostra capacità di pensare. Questo sforzo rappresenta una straordinaria avventura intellettuale, che attraversa la storia dell'umanità. Ora, due fatti forse sorprendenti e un po' opposti l'uno all'altro hanno caratterizzato questa avventura.

Il primo è che il sogno antico di capire il mondo in termini razionali e sulla base di poche idee semplici e poche leggi semplici lo si è potuto realizzare veramente, e in ambiti estremamente ampi. La ricerca della comprensione razionale del mondo ha in effetti portato alla scienza moderna e alla sua indubitabile efficacia. Questa non solo ha trovato aspetti di ordine dietro alla varietà dei fenomeni, ma, grazie a questa conoscenza, ha cambiato in profondità la vita dell'umanità e ha permesso lo sviluppo della nostra civiltà moderna. Pensare al mondo in termini razionali funziona.

Il secondo, e qui sta il punto centrale, è che la chiave per comprendere il mondo è risultata essere una: la capacità di *liberarci* da idee sbagliate che abbiamo nella testa. Ogni passo avanti nella comprensione del mondo è in piccola o grande parte, un riconoscere che la struttura di pensiero precedente è limitata, è inadatta, è migliorabile. Devo capire che questo mio pregiudizio che a Firenze esistesse un 'lato-colline', come a Verona, dove sono nato, è un'idea sbagliata. Devo cambiarla. Ma io la usavo come riferimento per mettere ordine, per organizzare tutta la mia comprensione della geografia di Firenze. Come faccio a cambiarla? Eh ... devo cambiarla, anche se questo richiede una difficoltà. Cioè, posso anche non farlo, e continuare a pensare al lato-colline di Firenze, ma questo renderà la mia conoscenza di Firenze molto più debole. Se ho il coraggio di gettare via il mio pregiudizio e di accettare una mappa mentale del tutto nuova, capisco meglio, mi oriento meglio, posso fare più cose.

Ora, questo liberarsi da un pregiudizio e accettare una mappa mentale nuova della realtà è risultato essere, nella storia della scienza, un processo continuo. Si continua a imparare *così*. Si continua a capire che abbiamo pregiudizi. Anche se riusciamo a capirne bene molti aspetti, la natura continua ad apparire lo stesso inesauribile. Più comprendiamo del mondo, più scopriamo che c'è molto altro da comprendere: la nostra comprensione del mondo si affina e diventa via via più efficace, ma ... continua a cambiare. Troviamo modi efficaci di pensare il mondo, ma ce ne sono sempre di *più* efficaci. Se vogliamo capire, dobbiamo dunque essere aperti ai nuovi sovversivi, ai nuovi rivoluzionari. La strada della ricerca della conoscenza è lontana dall'essere conclusa.

Ne segue che ogni passo avanti nella comprensione del mondo è una sovversione del modo di vedere precedente e ha quindi qualcosa di sovversivo, qualcosa di rivoluzionario. Ogni volta ridisegniamo da capo il mondo. Cambiamo la grammatica dei nostri pensieri, il quadro della nostra immagine della realtà.

In altre parole, la natura della scienza è la scoperta che la conoscenza non è un'enciclopedia chiusa, ma è un processo. La scienza è la realizzazione della natura

dinamica della conoscenza razionale del mondo.

Vediamo come funziona. Quando nasce la scienza? Be', forse sorprendentemente, la scienza – nel senso che ho detto: come percorso di comprensione razionale del mondo – nasce, almeno per quanto ne sappiamo, in un luogo ed un tempo abbastanza preciso. L'idea che si possa comprendere la natura in modo razionale nasce all'improvviso ventisei secoli fa, nelle luminose città greche sulla costa dell'odierna Turchia, circa sei secoli prima di Cristo. Quindi, alla prima alba del periodo classico della storia greca. Parecchio dopo la guerra di Troia e la scrittura dell'Iliade e dell'Odissea.

Attenzione, ventisei secoli fa è molto tempo fa, ovviamente, ma non è certo l'inizio della civiltà. Erano già fiorite splendide civiltà in Egitto, in Mesopotamia, a Creta, in India. Anzi, a quel tempo la grande civiltà egiziana esisteva già da più o meno ventisei secoli.

La nascente civiltà greca è però profondamente diversa dalle antiche e grandi civiltà egiziana e mesopotamica che le sono vicine. Queste sono ordinate, stabili e gerarchiche. Il potere è centralizzato e la civiltà si regge sulla conservazione dell'ordine stabilito. Sono civiltà chiuse che entrano in contatto con l'esterno quasi solo in caso di conflitto, di guerra. Il giovane mondo greco, al contrario, è estremamente dinamico, è in evoluzione continua. Non vi è potere centrale. Ogni città è indipendente; e all'interno di ogni città il potere è rinegoziato in continuazione fra i cittadini. Le leggi non sono né sacre né immutabili: sono continuamente discusse, sperimentate e messe alla prova. Le decisioni vengono prese in comune nelle assemblee. L'autorità è soprattutto di chi è in grado di convincere gli altri, attraverso il dialogo e la discussione. Ed è un mondo apertissimo ad assorbire quanto può dalle civiltà vicine. I greci, a differenza degli egiziani e dei persiani, viaggiano moltissimo. In questo clima culturale profondamente nuovo nella storia del mondo, nasce un'idea nuova della politica: la democrazia. L'idea che le decisioni collettive possano emergere dal confronto libero di posizioni diverse. E nasce un'idea nuova della conoscenza: la conoscenza razionale. Questa è una conoscenza dinamica, che evolve, che è continuamente discussa e messa alla prova. Come in politica, l'autorità del sapere viene soprattutto dalla capacità di convincere gli altri della giustezza del proprio punto di vista -- e non dalla tradizione, dal potere, dalla forza o dall'appello a verità immutabili. La critica alle idee acquisite non è temuta; al contrario, è auspicata: è la sorgente stessa del dinamismo, della forza di questo pensiero, la garanzia di continuare a migliorare. È l'alba di un mondo nuovo.

Permettetemi di dire qualche parola in particolare di un personaggio che amo molto, che ritengo essere un gigante della scienza, forse il primo o uno dei primi, e uno dei più grandi scienziati di tutti i tempi: Anassimandro. Concittadino, giovane amico e probabilmente discepolo del grande Talete, il filosofo che per primo aveva posto domande razionali sulla forma e la struttura del mondo, Anassimandro è viaggiatore, uomo di stato, geografo, astronomo e filosofo. Fra le sue molte idee, ce n'è una che cambia la storia del pensiero del mondo.

Tutti i popoli e tutte le civiltà, dai Cinesi ai Maya, dagli Egiziani agli Indiani, dagli

Indiani d'America agli Ebrei, hanno pensato che il mondo fosse fatto dalla Terra *sotto*, e dal Cielo *sopra*. Lo spazio è dunque diviso in due grandi parti: sotto la Terra, sopra il Cielo. Al di sotto della Terra ci deve essere ancora Terra, altrimenti la Terra cascherebbe. Oppure una grande tartaruga che la regge, appoggiata su un elefante, come in certi miti indiani, oppure un grande mare, come aveva provato a ipotizzare Talete. Ma sempre il mondo diviso fra alto e basso, cielo di sopra, terra di sotto. Anassimandro propone un'altra idea: la Terra è un oggetto *che non si appoggia su nulla*. Galleggia nello spazio. Sotto la Terra non c'è nulla: c'è solo altro cielo. Il cielo non è sopra la Terra, bensì intorno alla Terra.

Alla luce di quello che sappiamo oggi, l'idea è giusta. Chi potesse avere qualche dubbio, guardi le bellissime foto della Terra prese dal cielo dagli astronauti. Il nostro caro pianeta blu è proprio un sassone che galleggia nello spazio, e non è appoggiato a nulla. Come ha fatto Anassimandro a capirlo? Be', visto a posteriori, gli indizi erano molti. Si pensi per esempio al Sole, alla Luna e a tutte le stelle che tramontano a ovest e ricompaiono a est: non ci indicano abbastanza chiaramente che devono passare *sotto* la Terra per completare i loro cerchi? E che dunque sotto deve esserci spazio aperto? In effetti, Anassimandro non ha fatto che applicare la stessa intuizione secondo cui, se vediamo un signore sparire dietro una casa e ricomparire dall'altra parte, vuol dire che dietro la casa c'è un passaggio. Allora era facile? No, non lo era, se milioni di uomini in decine di civiltà, non ci avevano pensato.

Perché era così difficile trovare questa idea? Perché è un'idea che rivoluziona in profondità l'immagine del mondo. Gli uomini sono attaccati alle loro idee, e non le cambiano facilmente. Pensano sempre di sapere già tutto. Le idee nuove fanno paura perché sconcertano. Non è sconcertante, se ci pensate bene, l'idea che la Terra non sia appoggiata a nulla? Perché non cade? La domanda, evidentemente è stata posta subito ad Anassimandro, e noi conosciamo la sua risposta: perché le cose non cadono «verso il basso», le cose cadono «verso la Terra»; e dunque la Terra non ha nessuna direzione particolare verso cui cadere se non verso se stessa. Ancora una volta, alla luce della nostra comprensione del mondo di oggi, la risposta di Anassimandro è esatta. Ma è sconcertante: Anassimandro ridisegna completamente il quadro concettuale della comprensione umana dello spazio, della Terra, della gravità che fa cadere i corpi. Sulla base di osservazioni, per giustificarle meglio, propone una nuova carta del mondo, una carta concettuale diversa. Un'idea profondamente nuova di come sia organizzato lo spazio. Non più lo spazio diviso in due, un sopra e un sotto, sopra Cielo, sotto Terra, e le cose che cadono dal sopra al sotto, bensì uno spazio fatto di cielo, all'interno del quale sta sospesa la Terra, in cui le cose cadono verso la Terra. È un'immagine del mondo migliore e più generale di quella che la precedeva. Questa è la scienza.

Purtroppo il libro scritto da Anassimandro non lo abbiamo più, e quello che sappiamo di lui è solo quello che dicono di lui altri scrittori greci i cui testi sono rimasti, per esempio Aristotele. Resta di lui solo un breve frammento, un po' misterioso, che dice:

*Le cose nascono l'una dall'altra e periscono l'una nell'altra,
secondo necessità.
Esse si rendono giustizia fra loro e riparano le loro ingiustizie
secondo l'ordine del tempo.*

Molto è stato letto in queste poche linee oscure. Probabilmente esse esprimono un'altra grandissima idea che risale ad Anissimandro: l'idea che gli eventi non avvengono per caso. Avvengono guidati da una necessità, secondo leggi che governano il loro svolgersi nel tempo: «secondo l'ordine del tempo».

Mancano ancora ad Anissimandro molte idee essenziali per costruire la scienza, e forse quella più importante è l'intuizione che il linguaggio appropriato per descrivere il mondo è la matematica. Questa intuizione appare però subito, nella generazione successiva, in Italia, a Crotona, dove insegna Pitagora, e si sviluppa la scuola pitagorica. La scuola pitagorica ha un influsso immenso sulla cultura occidentale ed è un po' la culla in cui cresce la scienza. Come Pitagora, o chi per esso in questo periodo, possa avere avuto questa intuizione immensa che il linguaggio corretto per descrivere il mondo, per prevedere il comportamento delle cose del mondo, fosse la matematica – “il numero” come si diceva in ambito pitagorico –, io non lo so, e non lo capisco. Resta il fatto che l'intuizione era non solo giusta, ma è l'intuizione grazie alla quale esiste la scienza.

Poco dopo è Platone, del quale finalmente abbiamo moltissimi testi, a formulare e sviluppare a fondo questa intuizione. La verità non è immediatamente accessibile, è velata. Tuttavia non è irraggiungibile. Il mondo deve essere comprensibile in modo razionale. Per comprenderlo, la strada è la ricerca razionale, la discussione, il dialogo, lungo, continuo, incessante, nel corso del quale le nostre idee cambiano, dal confronto con i dati sensibili e le une con le altre, fino a che vediamo, su una questione, la chiarezza. Il linguaggio segreto in cui le leggi della natura sono scritte è matematico. Queste sono, praticamente citate alla lettera, parole della Settima Lettera di Platone, e sono un po' il credo della scienza. È il 'catechismo' al quale tutta la ricerca scientifica si è ispirata.

Quel che è straordinario in questa ricetta pitagorico-platonica per la conoscenza è che ... non è che a quel tempo funzionasse granché. Era più una speranza. Eppure, proprio questa speranza si è realizzata.

La prima grandissima realizzazione di questo progetto è l'astronomia alessandrina. Che è una splendida costruzione teorico matematica che permette di comprendere, e di prevedere esattamente il movimento di tutte le cose visibili nel cielo. Ci sono voluti secoli per realizzarla, ma il risultato è stupefacente. Noi abbiamo ancora il libro di Tolomeo, l'*Almagesto*, ed è emozionante il fatto che voi potete aprire questo libro, studiare le tecniche, fare qualche calcolo, sui dati raccolti in questo libro e prevedere che il 3 ottobre 2005 a Firenze, di mattina, ci sarà un'eclisse di sole. È straordinario. C'è scritto qui. Duemila anni fa.

Poi alla scienza greca succede qualcosa di estremamente inquietante. Il grande sviluppo di conoscenze, non solo nell'astronomia, ma anche nella geometria, nell'ottica,

nella statica, nella medicina, e in molti altri campi, sostanzialmente si arresta, si affloscia e in gran parte si perde. Questo comincia a succedere con l'imporsi dell'impero romano, in cui la conoscenza razionale del mondo già viene meno, ma poi si accentua in modo quasi violento con la presa di potere del Cristianesimo. Il primo Cristianesimo, si scaglia con violenza contro questo processo di conoscenza razionale del mondo. La conoscenza è una sola ed è rivelata. Non c'è spazio per nient'altro. Di fatto, tutto si assopisce, o continua ma a ritmo estremamente più lento, solo dopo l'espansione dell'Islam nei paesi musulmani, e in India, dopo che l'influsso delle idee scientifiche greche arriva in India.

La ripresa vivace del processo avviene invece dieci secoli dopo questo assopimento, con il Rinascimento europeo. Il Rinascimento si apre con un immenso sforzo di recupero del patrimonio di antiche conoscenze. L'Europa già dal Trecento si apre ad assorbire ciò che viene dall'Islam; ed è come sempre, dall'apertura all'esterno che viene vitalità e forza nuova. Anzi, dal Duecento, da quando Federico II, invece di intraprendere la crociata contro l'Islam che aveva voluto Innocenzo III, e sulla quale il papato continuava ad insistere, si mette invece d'accordo per una soluzione pacifica con il Sultano del Cairo, Malik Al Kamil (la reazione del papato fu di dichiarare Federico «nemico della religione, perché invece di portare guerra agli infedeli aveva portato loro la pace») e decide di invitare in Europa intellettuali e sapienti arabi. È così che la cultura europea si riapre e il 'rinascimento' si prepara.

È una lezione che forse ha valore ancora oggi: la ricchezza di una civiltà non è nei suoi riflessi identitari e nel suo chiudersi, confrontarsi, o peggio entrare in conflitto con altre civiltà: è nella capacità di lasciarsi influenzare e di assorbire ciò che viene dalle altre civiltà; e in generale dalla diversità.

In particolare, nel Cinquecento viene studiato l'*Almagesto* di Tolomeo e, per la prima volta dopo venti secoli, qualcuno ha il coraggio non solo di ristudiare l'antico sapere, ma di ricominciare la strada che quel sapere ha creato, e quindi di rimettere in discussione di nuovo quel sapere: il modo autentico per essere fedeli alla conoscenza è metterla in dubbio. Un oscuro canonico polacco, che ha studiato in Italia e ha vissuto una vita solitaria in Polonia immerso nei suoi studi, si cala a fondo nello studio dell'*Almagesto* e, dalla sua approfondita conoscenza, propone di cambiare a fondo, ancora una volta, l'immagine del mondo. Si tratta, ovviamente, di Niccolò Copernico. Ancora una volta il mondo cambia a fondo: non più sfere intorno alla Terra, ma pianeti che girano intorno al Sole.

Il grandissimo omaggio che il Rinascimento fa a Tolomeo non è nello studiarlo e migliorarlo un po'. Questo lo avevano già fatto gli studiosi islamici e indiani. È ritrovarne lo spirito profondo, criticandolo. Tolomeo aveva costruito il suo sistema mettendo in dubbio un assioma di Aristotele: che i pianeti viaggiassero a velocità costante sulle loro orbite (nel sistema di Tolomeo la velocità non è costante). Bene, Copernico riprende lo spirito profondo della scienza Greca: gli assiomi, le regole, non si rispettano: si cambiano.

Una delle maggiori conseguenze della rivoluzione copernicana è una semplice deduzione che segue dal sistema copernicano, che è Galileo a realizzare pienamente, un secolo dopo Copernico. La scienza antica aveva realizzato in maniera piena il programma pitagorico-platonico di trovare le leggi matematiche che regolano il moto di tutte le cose, *solo* per i cieli. Non per la terra. Il moto delle terrestri non era prevedibile con precisione. Questo era stato giustificato a posteriori dicendo che la sostanza di cui sono fatti i cieli era diversa della sostanza di cui sono fatte le cose nel mondo 'sublunare'. Ora però, ragiona Galileo, SE la terra è un pianeta come gli altri, ALLORA le cose sulla terra non possono essere fatte di una sostanza diversa di quelle della luna e dei pianeti. E se la luna e i pianeti seguono leggi matematiche ALLORA anche gli oggetti sulla terra devono seguire leggi matematiche. Il programma pitagorico-platonico si deve applicare anche agli oggetti terrestri. E se ha funzionato così bene per i cieli, funzionerà anche per la terra. Con questa straordinariamente audace motivazione intellettuale, Galileo si mette alla ricerca di leggi matematiche per descrivere i movimenti di oggetti sulla terra. Le cerca, e le trova, scoprendo la legge matematica che descrive come cadono i corpi. Ed è un trionfo immenso.

Il trionfo è ancora più immenso nella generazione successiva: Newton, che nasce l'anno in cui muore Galileo, combina le leggi del moto dei corpi sulla terra e quelle del cielo, e mostra che tutte seguono da una semplicissima coppia di equazioni. È la piena realizzazione, dopo venti secoli, del sogno di Pitagora e Platone: il mondo descritto dalla matematica. Il futuro, in linea di principio, è perfettamente prevedibile in modo razionale.

È difficile sottostimare l'effetto della scoperta della meccanica di Galileo e Newton. Onde evitare fraintendimenti: non è che non siano esistite civiltà senza scienza. Ci sono state grandi e splendide civiltà, in cui lo sviluppo della conoscenza razionale del mondo, nel senso che ho detto, era scarso o assente. L'impero romano ne è in larga misura un esempio. Ma certo erano molto diverse dalla nostra attuale. E, senza voler dare giudizi di valore, erano civiltà in cui la vita media non è arrivata a superare i trent'anni e in cui la stragrande maggioranza degli uomini e delle donne erano miseri contadini che lavoravano la terra dall'alba al tramonto. Il mondo in cui viviamo, gli standard di vita e la tecnologia odierna non esisterebbero senza il processo di conoscenza razionale testimoniato nell'opera di Galileo e Newton.

Galileo e Newton, trovano dunque le leggi matematiche per descrivere il mondo fisico. Per esprimere in forma generale e coerente queste leggi matematiche, che Galileo aveva iniziato a trovare, Newton deve cambiare le carte in tavola e riorganizzare l'immagine del mondo in maniera sostanziale. Deve cambiare il concetto di spazio.

Cos'è lo spazio?

Newton introduce l'idea di uno spazio vuoto e regolare, descritto dalla geometria di Euclide, entro il quale si muovono tutte le cose. Lo spazio newtoniano ha una struttura rigida, come una tavola liscia, che fa da palcoscenico sul quale avvengono i fatti del

mondo, da contenitore del mondo. Questa idea newtoniana dello spazio ci è familiare perché l'abbiamo studiata a scuola e l'abbiamo usata per risolvere i problemi di fisica (quelli con le coordinate cartesiane x , y e z ...). Lo spazio come contenitore del mondo. Ma non è l'unica idea possibile di spazio e neppure l'idea tradizionale dominante. Nella maggior parte del pensiero occidentale prima di Newton, un'altra idea era stata più comune: l'idea che non esiste uno spazio davvero vuoto. Un bicchiere vuoto è in realtà un bicchiere pieno d'aria. Esistono solo le cose, che, per così dire, riempiono tutto, e le relazioni spaziali sono solo le relazioni che dicono quale cosa è in contatto con quale altra.

L'idea che lo spazio in sé non esiste è stata comune da Aristotele fino a Cartesio (non ostante il fatto che sia stato lo stesso Cartesio a sviluppare l'impiego sistematico delle coordinate, poi usate da Newton per descrivere lo spazio vuoto). I cieli di Dante che circondavano la Terra, per esempio, erano sfere piene, incastrate l'una nell'altra, non spazi vuoti.

Newton, con un'operazione caratteristica della grande scienza, abbandona l'idea aristotelico-cartesiana del mondo 'pieno' di cose (forse ispirato dalla scoperta di Keplero che non ci sono le sfere celesti) e la sostituisce con l'idea di un mondo vuoto ove corrono libere delle masse, soggette alle forze. Non si pensi che Newton abbia fatto questo cambiamento a cuor leggero. Tutta la prima parte del grande libro di Newton, i *Principia*, è dedicata a discutere le ragioni e i vantaggi di questo nuovo punto di vista. Il mondo di Newton è dunque uno spazio vuoto, come una tavola di legno, su cui corrono pianeti e oggetti.

Questa immagine del mondo resta più o meno la stessa per secoli, ma con un piccolo ma fatale cambiamento, che avviene nell'Ottocento, con il lavoro di Faraday e Maxwell, che capiscono che il modo migliore per spiegare l'elettricità e il magnetismo è pensare che esistano i *campi* elettrici e magnetici. I campi sono entità diffuse in tutto lo spazio, Faraday li immagina come delle linee di ragnatela sottili e fittissime che riempiono tutto. Queste linee portano dappertutto le forze elettriche e magnetiche. La luce è una vibrazione sottilissima di queste linee, onde che corrono velocissime sulle tele di ragno.

All'inizio del ventesimo secolo Einstein studia la forza di gravità e capisce che anche la forza di gravità deve essere l'effetto di un campo. Introduce dunque il *campo gravitazionale*, che è simile al campo elettrico: un insieme di linee che, come le linee di Faraday, riempie tutto. Analogamente al campo elettrico, il campo gravitazionale oscilla ed ondeggia. Le sue onde sono oggi cercate attivamente. Vicino a Pisa è in costruzione un grande osservatorio, chiamato VIRGO, per captarle. Ma nello studiare questo nuovo campo, Einstein fa una scoperta eccezionale: capisce che lo *spazio di Newton*, la tavola rigida, e questo nuovo *campo gravitazionale*, sono in realtà la stessa cosa. In altre parole, la tavola rigida introdotta da Newton per rendere conto dello spazio in realtà non è rigida per niente: non è nient'altro che il campo gravitazionale stesso. Così, con Einstein si abbandona lo spazio-tavola di Newton e si ritorna alla concezione dello

spazio precedente: non esiste un vero spazio vuoto e fisso entro cui avvengono le cose. Esistono solo cose, particelle e campi, e tra questi il campo gravitazionale: i campi vivono, per così dire, uno sull'altro.

Questa è la grande scoperta di Einstein.

Oggi il grande problema aperto è di conciliare con la meccanica quantistica la visione einsteiniana dello spazio come campo gravitazionale. La meccanica quantistica è la scoperta che i campi hanno una struttura granulare: per esempio il campo elettrico, osservato su piccolissima scala, si rivela essere formato da sciami di particelle: i fotoni. Nello stesso modo il campo gravitazionale, e cioè lo spazio, deve avere una struttura granulare. Ci dovrebbero quindi essere 'atomi di spazio' o 'quanti di spazio'.

Una delle teorie ipotetiche che vengono oggi esplorate per capire questa struttura quantistica è la gravità quantistica 'a loop', che permette di calcolare la struttura granulare dello spazio, cioè le caratteristiche di questi 'quanti di spazio'. I *loop* sono gli atomi di spazio e hanno la forma delle ragnatele immaginate da Faraday. Ma questo spazio quantizzato, granulare, fatto di *loop*, non è più il *contenitore del mondo* come per Newton; è un campo come un altro, uno dei diversi costituenti del mondo.

E il tempo? Il tempo da cui era partito Anassimandro per trovare un principio di ordine nel mondo? Il tempo che entra in tutte le equazioni della fisica come 'variabile indipendente' rispetto alla quale tutto il resto viene calcolato? Anche il tempo sta subendo un profondissimo ripensamento.

Che cos'è dunque il tempo?

Che cos'è la variabile T che entra nelle equazioni della fisica? La risposta sembra facile: è quella cosa che misurano gli orologi. Ma che cos'è un orologio? Per stabilire la sua legge $x = -1/2 g t^2$, Galileo aveva bisogno di un orologio che misurasse T . Egli stesso aveva contribuito in maniera essenziale alla nascita dell'orologio moderno, comprendendo che le oscillazioni di un pendolo durano tutte lo stesso tempo. Oggi, virtualmente ogni orologio contiene un pendolo, meccanico o elettronico. La leggenda vuole che Galileo si rendesse conto che le oscillazioni del pendolo durano tutte lo stesso tempo mentre era a Pisa, nella Cattedrale, osservando le lente oscillazioni di un grande e bellissimo candelabro, che è tuttora nella cattedrale. Secondo la leggenda, durante una cerimonia religiosa dalla quale evidentemente non era molto preso, Galileo conta i battiti del suo cuore durante ogni lenta oscillazione del candelabro, e si rende conto che le oscillazioni durano tutte lo stesso numero di battiti. Ha scoperto l'*isocronia* delle oscillazioni del pendolo, e una chiave per misurare il tempo.

Ma c'è un problema evidente. Qualche tempo dopo, un qualunque medico poteva misurare l'alterazione dei battiti del cuore di un malato, usando un orologio, e dunque un pendolo. Dunque si misura l'oscillazione del pendolo con i battiti, e i battiti con il pendolo ... Non è un circolo vizioso? Stiamo misurando il tempo o stiamo solo misurando diversi fenomeni uno rispetto all'altro?

Ancora una volta è Newton, il grandissimo inglese, che mette ordine in questa

confusione concettuale. All'inizio del suo capolavoro, con cristallina chiarezza spiega che non c'è nessun modo per misurare direttamente il tempo, però possiamo *ipotizzare* che esista una variabile che non misuriamo mai direttamente, che è il tempo, e scrivere le equazioni del moto rispetto a questa variabile non osservabile. Possiamo allora scrivere le equazioni del pendolo che ci diranno come evolve l'ampiezza del pendolo, chiamiamola A , nel tempo T . Dunque scriveremo la funzione $A(T)$. E scriveremo un'altra variabile, chiamiamola $B(T)$ che conta i battiti del cuore nel tempo T , e così via per ogni variabile fisica. La teoria ci permetterà di calcolare tutte queste funzioni $A(T)$, $B(T)$, $C(T)$, $D(T)$... Quello che noi osserveremo tuttavia non saranno mai queste funzioni ma la variazione *relativa* delle variabili l'una rispetto all'altra: per esempio l'ampiezza del pendolo in funzione dei battiti $A(B)$, che si può ottenere dalla teoria combinando le funzioni $A(T)$ e $B(T)$. Dunque il tempo non lo si vede mai, ma si ipotizza che esista e 'scorra': si studia il cambiamento relativo dei fenomeni l'uno rispetto all'altro e lo si descrive matematicamente come evoluzione rispetto a un tempo inosservabile. Fin qui, Newton.

Ma oggi la teoria di Newton non è più sufficiente. Dobbiamo basarci sulla relatività generale di Einstein e sulla meccanica quantistica. Ora, accade che se si prendono le equazioni della relatività generale e si combinano con le equazioni della meccanica, la variabile tempo T scompare del tutto.

Il tempo, forse, a livello fondamentale, non esiste. Per capire meglio il mondo, forse bisogna rinunciare sia all'idea dello spazio come *contenitore del mondo*, sia all'idea del tempo *lungo il quale avvengono i fenomeni*. E bisogna un'altra volta imparare a pensare il mondo da capo, questa volta, in un certo senso, senza né spazio né tempo.

Forse lo 'scorrere' del tempo, come è stato suggerito, non è che un'apparenza macroscopica, dovuta alla grossolanità della nostra percezione macroscopica, e dunque, in ultima analisi, alla nostra ignoranza dello stato microscopico del mondo intorno a noi. Così, ventisei secoli dopo la posizione della regola fondamentale della fisica: studiare come cambiano le cose secondo l'ordine del tempo, oggi la fisica è forse in procinto di cambiare anche la sua prima regola del gioco. Si butta la nozione di tempo, e ci si chiede, più semplicemente, come cambino le cose le une rispetto alle altre.

Possiamo veramente pensare il mondo in modo atemporale? Possiamo veramente costruire un'immagine fondamentale del mondo, compatibile con la nostra esperienza, in cui spazio e tempo non sono elementi fondamentali? La risposta, oggi, non è chiara. Siamo qui ai margini estremi della nostra conoscenza del mondo fisico. Idee che vengono esplorate, che ancora non sappiamo se si riveleranno efficaci. Ma questa è una delle direzioni fondamentali lungo la quale si sta cercando.

Torniamo all'inizio: è credibile tutto questo? Sì e no. Non lo è, nel senso che non è una verità finale. Forse domani si troverà un modo diverso e migliore, più efficace, per capire il mondo. Ma è più credibile di tutte le alternative finora pensate. L'idea di Anassimandro del sasso che galleggia nello spazio era rudimentale. Ma era molto migliore dell'idea terra-sotto/cielo-sopra. L'odierna immagine scientifica del mondo è

credibile perchè è la migliore e più efficace comprensione del mondo che abbiamo fino ad ora. Non è credibile perché è assolutamente giusta, ma perché è la migliore trovata fin qua.

Questa è un'immagine della scienza in rivoluzione permanente, sempre sospesa fra la conoscenza e il dubbio, che è profondamente diversa dall'immagine ottocentesca della scienza trionfante e certa di sé. L'idea ottocentesca di una scienza fatta di assolute certezze è diventata facile preda di attacchi, da parte di varie forme di irrazionalismo e antiscientismo. Le critiche erano e sono giuste, ma irrazionalismo e antiscientismo ci portano indietro, non avanti. Ci portano a credenze sbagliate, non a un sapere più solido.

Oggi questo irrazionalismo antiscientifico è all'attacco. Un esempio tratto dalla cronaca recente: si critica la teoria dell'evoluzione invocando proprio l'apertura culturale. È una sonora sciocchezza, perché se è vero che nulla è mai assolutamente certo, è anche vero che tutte le alternative odierne all'evoluzionismo, esaminate serenamente non poggiano sulla razionalità, ma su un un fideismo acritico.

Il Novecento ci ha insegnato questo: il sapere non è mai acquisito una volta per tutte, è invece un processo dinamico. Ciò non toglie valore al sapere scientifico. Al contrario, ne è il fondamento stesso. È la forza immensa, e anche la magia, di un pensiero che ha la forza di rimettere costantemente in discussione i propri stessi fondamenti, di aggiornare di continuo la propria visione del mondo.

Vorrei concludere riallacciandomi alle parole finali della introduzione del programma di questa manifestazione, che dicono che questa bellissima manifestazione, *Pianeta Galileo*, è organizzata

... nella convinzione che ... sia un'opportunità importante per la società civile, per la formazione dell'individuo, per l'affermazione dell'idea stessa di democrazia.

Vorrei accettare questo stimolo, questa sfida, e ritornare all'inizio, alla nascita della scienza nella civiltà greca, dove scienza e democrazia nascono insieme, dallo stesso spirito. Lo spirito della razionalità serena, dell'intelligenza e del dialogo. Questo spirito di dialogo e razionalità è uno dei pilastri su cui si è costruito il nostro mondo. Ma non è sempre dominante. Tutt'altro. È fragile, estremamente fragile. Nei secoli, è stato sotto attacco, ed è stato spesso sconfitto. Dall'arroganza del potere, dalla forza delle armi, da chi ha cercato di controllare lo spazio pubblico del dibattito e dell'informazione. E soprattutto dalle certezze di chi crede di essere il solo depositario della verità assoluta. Queste forze, nei secoli hanno spesso ucciso lo spirito della democrazia e hanno più volte represso lo spirito libero della ricerca della conoscenza. Io non penso che queste siano difficoltà del passato.

La storia del pensiero ci insegna che democrazia, spirito critico e ragione sono vicine, e sono sempre fragili. Penso che la battaglia fra la ragione e l'arroganza del potere sia oggi aperta più che mai.

PROSPEZIONI



A PROPOSITO DELLA LOGICA: SUL CONCETTO D'INFERENZA*

ANDREA CANTINI

Dipartimento di Filosofia, Università degli Studi di Firenze

*Mein teurer Freund, Ich rat Euch drum
Zuerst Collegium Logicum¹.*

(Goethe, Faust)

1. Prologo

Ci sono delle aspettative del senso comune intorno alla logica che non sono affatto giustificate dalla ricerca contemporanea; metterne subito in discussione un paio (che cosa *non* è la logica, dunque) ci sembra il modo più opportuno per iniziare il nostro breve discorso.

In primo luogo, si tende a credere ancora oggi che la logica sia una *disciplina statica*, con un ambito di studio ben determinato, strumento per eccellenza della razionalità. In realtà, il termine 'logica' è ambiguo: occorre in contesti disparati e possiede, anzi, un carattere *pervasivo* (basta prendere in considerazione le locuzioni «è logico fare così e così», «la logica dello sviluppo», «la logica dei calcolatori», «la logica del racconto»; che parentela c'è fra questi termini?). Per questo la natura della logica è profondamente *elusiva*. Secondo la tradizione, la logica fa parte (come dialettica) delle arti del trivio assieme alla retorica e alla grammatica; rientra quindi a pieno diritto fra le discipline del linguaggio e quindi umanistiche. D'altra parte, a partire dalla seconda metà dell'Ottocento, la logica viene matematizzata (si pensi all'opera di George Boole) e agli inizi del secolo successivo interagisce profondamente con le ricerche sui fondamenti della matematica (Frege, Russell, Hilbert, etc.). Oggi è difficile interessarsi di logica a livello di ricerca senza avere preso contatto anche con problematiche che sono state suggerite da questioni d'informatica teorica.

Ad ulteriore conferma del carattere non monolitico della disciplina, si ricorderà che le verità della logica hanno la fama di essere non-informative, prive di contenuto empirico (sono 'tautologie' e il termine ha una connotazione negativa nel linguaggio comune); eppure, come avremo modo di richiamare oltre, non esistono principi logici fra quelli considerati più ovvi (principio di non-contraddizione, terzo escluso, etc.), che non siano stati messi in discussione nel corso del XX secolo.

In secondo luogo, si è portati a pensare che la logica sia una sorta di scienza delle scienze; eppure, come è comprovato dalla storia della logica del secolo scorso, la logica *non è indipendente* dagli enti e dalle strutture degli enti ai quali la si applica. Di fatto,

la logica non fornisce una teoria unitaria dell'inferenza razionale, semmai fornisce un sistema di concetti e strumenti che permettono di costruire modelli rigorosi di vari tipi di inferenza e dei concetti di interpretazione, dimostrazione, regola. In logica, come in altre discipline astratte, ha un ruolo non indifferente il momento della libera costruzione di modelli, degli esperimenti ideali, del congetturare.

Se si accentua troppo la soluzione di continuità fra l'immagine tradizionale della logica e gli sviluppi recenti, si corre però il rischio di avvicinarsi alla logica in una ottica puramente 'modernista', e di trasferire al lettore – per avviarlo agli sviluppi tecnicamente avanzati – le solite informazioni drammatiche e drammatizzanti (ma ormai un po' trite, non di rado scorrette) sui teoremi di Gödel, i limiti della ragione, etc., dimenticandosi del fatto che la logica fino da Aristotele ha avuto tra i suoi fini precipui quello di essere una *teoria dell'inferenza corretta*.

Sarebbe dunque auspicabile che una persona colta avesse un'idea precisa di che cosa significa che un ragionamento è corretto (o cogente o logicamente valido). Un professore di liceo di filosofia e/o di matematica potrebbe porsi il minimale obiettivo di insegnare ai propri allievi che cosa è un'inferenza corretta (magari riferendosi al solo livello proposizionale).

In quel che segue discuteremo dunque il problema dell'inferenza. Può sembrare fuori tema, visto che il colloquio è dedicato alla filosofia della matematica. Non lo è, perché centrale è il concetto di dimostrazione nella conoscenza matematica: dove di norma si accetta come vero un enunciato (che non sia assunto come principio o assioma), solo se si dispone di una prova o dimostrazione. Se ci domandiamo che cosa è una dimostrazione, osserviamo che, accanto alle costruzioni e alle inferenze specificamente matematiche (che dipendono dal contenuto matematico che si vuol accertare), figurano nella prova impliciti alcuni passaggi elementari non ulteriormente analizzabili che non sono di natura specificamente matematica, nel senso che si ritrovano anche in molti altri ambiti², e che dipendono in certa misura dalla struttura linguistica di ciò che vuol provare (se si tratta ad esempio di un enunciato condizionale, o universale, etc. si veda il paragrafo successivo).

2. Forma logica e livelli logici

Sulla base delle precedenti considerazioni, possiamo partire da un primo rozzo tentativo di definizione della disciplina: la logica elabora informazioni espresse in forma linguistica, dove 'elaborare' significa costruire *argomenti logicamente corretti*. Un argomento è costituito da vari enunciati legati fra loro da nessi che sono detti *inferenze* e che devono risultare, se l'argomento è cogente, corrette. Dobbiamo dunque rispondere alla domanda: che cosa intendiamo per inferenza corretta? Questo è il compito principale della logica come teoria della deduzione: si tratta di classificare, se possibile completamente³ e secondo i vari ambiti, le inferenze corrette.

Per spiegare che cosa è un'inferenza logica, bisogna afferrare il concetto di *forma o struttura logica*. La difficoltà maggiore è che la forma logica è diversa da quella

grammaticale e che il processo di distinzione della dimensione logica specifica dalle consorelle del trivio – grammatica e retorica – avviene lungo l'arco di un processo storico molto complesso e lungo nel tempo.

La via più semplice per spiegare che cosa intendiamo quando si parla di forma logica, è rivolgersi a degli esempi, come faceva anche Sesto Empirico (III secolo d.C.) e prima di lui i filosofi e logici della scuola megarico-stoica⁴.

Si consideri il seguente argomento 'in miniatura':

1. è giorno oppure notte
2. non è giorno
3. Dunque è notte

Si concederà di sicuro che è banalmente corretto il passaggio dagli enunciati 1 e 2 (le premesse) all'enunciato 3 (la conclusione). Pragmaticamente, se si assumono 1-2, siamo costretti ad accettare 3, non potremo non accettare anche 3.

Chiediamoci ora perché. Una prima risposta si basa sull'effettuare una sorta di variazione nella figura inferenziale, alterandone il contenuto: osservo che se sostituisco agli enunciati A=«è giorno», B=«è notte» enunciati qualsivoglia ma lascio fisse le particelle 'o', 'non', il passaggio rimane intuitivamente valido. Viene dunque il sospetto che le ragioni per cui l'inferenza è corretta vadano cercate nel *permanere* delle due particelle, i connettivi 'o' (disgiunzione) e 'non' (negazione). Lo schema sotteso alla regola, detta del *sillogismo disgiuntivo*, è

$$A \text{ o } B, \text{ non } A \Rightarrow B^5$$

e rappresenta la *forma logica* dell'inferenza, la cui correttezza viene a dipendere *solo dal significato della disgiunzione 'o' e della negazione 'non'*. Dunque, spiegare una inferenza logica vuol dire impegnarsi a discutere il significato dei connettivi logici.

Ovviamente, 'o', 'non' non sono gli unici connettivi. Il connettivo più importante è senz'altro il condizionale (o implicazione) 'se ..., allora ...' (simbolizzato da una freccia \rightarrow): con esso si formano enunciati che non hanno tanto il fine di descrivere situazioni più complesse a partire da costituenti dati, ma di esprimere il darsi di certi fatti, *nell'ipotesi* che si verifichi una data condizione. Il condizionale è dunque un modo privilegiato con cui il linguaggio incorpora una sorta di dimensione ideale, astratta; una volta inglobato il momento ipotetico, non è più un mero strumento di descrizione della realtà di fatto, ma diviene strumento per fissare scenari possibili o fantastici.

Vediamo subito una celebre quanto semplice regola che coinvolge il condizionale. Si consideri

1. se è giorno, allora c'è luce
2. non c'è luce
3. dunque non è giorno.

Lo schema sotteso dall'inferenza, detto del *modus tollens*, è allora: $A \rightarrow B, \text{ non } B \Rightarrow \text{non } A$

A. Di nuovo, possiamo convincerci della sua validità adottando la consueta strategia della sostituzione. Per converso, se considerassimo lo schema

$$A \rightarrow B, \text{ non } A \Rightarrow \text{ non } B,$$

avremmo ancora una regola corretta? No, perché potremmo scegliere la seguente istanza dello schema:

1. se Petrarca è fiorentino, Petrarca è toscano
2. Petrarca non è fiorentino
3. dunque Petrarca non è toscano.

Ora le premesse sono vere, la conclusione falsa; ma un'inferenza logica deve per sua natura essere sempre vera, qualunque sostituzione si metta in atto. Dunque lo schema

$$A \rightarrow B, \text{ non } A \Rightarrow \text{ non } B$$

non corrisponde ad un'inferenza corretta (costituisce una fallacia).

Un altro esempio senza commento:

1. se aumenta il prezzo della benzina, allora cresce l'inflazione
2. se cresce l'inflazione, diminuisce il potere d'acquisto degli stipendi
3. dunque se aumenta il prezzo della benzina, diminuisce il potere d'acquisto degli stipendi.

Ovviamente la forma logica corrispondente sarà quella del cosiddetto *sillogismo ipotetico*:

$$A \rightarrow B, B \rightarrow C \Rightarrow A \rightarrow C$$

Passiamo ora ad un altro esempio che racchiude delle differenze sostanziali con i precedenti perché ci porta ad estendere considerevolmente l'analisi logica, introducendo nuove operazioni che non si limitano, come i connettivi, ad operare su enunciati per produrre nuovi enunciati. L'esempio corrisponde ad un sillogismo di seconda figura (CESARE)⁶:

1. nessun parlamentare è disonesto;
2. tutti i filosofi sono disonesti;
3. dunque nessun filosofo è parlamentare

Qui la forma logica è più ardua da scoprire; essa coinvolge i cosiddetti 'quantificatori' corrispondenti a termini come 'tutti', 'ogni', 'nessuno', 'qualche'.

Il sillogismo si lascia trasformare come segue:

1. (per ogni x)(x è parlamentare \rightarrow non è vero che x non è onesto)
2. (per ogni x)(x è filosofo \rightarrow x non è onesto)
3. (per ogni x)(x è filosofo \rightarrow non (x è parlamentare))

Facendo astrazione dagli specifici predicati usati, lo schema corrispondente a 1a)-3a)

diventa

- i (per ogni x)($Px \rightarrow \text{non}(\text{non } Mx)$)
- ii (per ogni x)($Sx \rightarrow \text{non } Mx$)
- iii (per ogni x)($Sx \rightarrow \text{non } Px$)

Le operazioni logiche ‘(per ogni x)’, ‘(esiste un x)’ sono dette *quantificazioni elementari* o del primo ordine, la prima universale e la seconda esistenziale. Esse diventano strumento essenziale per analizzare enunciati che coinvolgono relazioni anche molto complesse, in particolare gli enunciati matematici. Un esempio, che coinvolge il concetto d’infinito, ne potrà illustrare al meglio la potenza e la flessibilità. Si pensi alla fondamentale proposizione di Euclide secondo la quale esistono infiniti numeri primi. Assunti due predicati $Num(x)$ e $Prim(x)$ per esprimere le proprietà di essere numero naturale e numero primo (rispettivamente), nonché un predicato binario ‘ $<$ ’ per rappresentare la consueta relazione d’ordine sui naturali, l’infinità dei primi si lascia allora formalizzare mediante un enunciato che richiede entrambi i tipi di quantificazione:

$$(\text{per ogni } x)(\text{Num}(x) \text{ e } \text{Prim}(x) \rightarrow (\text{esiste } y)(\text{Num}(y) \text{ e } \text{Prim}(y) \text{ e } x < y))$$

Ovviamente, questo è solo l’inizio della teoria della quantificazione, uno dei capitoli centrali della logica contemporanea. A questo proposito, va ricordata la distinzione fondamentale fra la *quantificazione su individui* o oggetti logici (come negli esempi precedenti) e la *quantificazione su proprietà, relazioni, etc.*, che caratterizza la logica del second’ordine. La possibilità di quantificare su proprietà, relazioni, insiemi, etc. potenzia notevolmente gli strumenti definatori ed inferenziali della logica. Basti ricordare qui che il progetto logicista nell’ambito della filosofia della matematica (legato alle figure di Frege e Russell, e di recente ripreso con un qualche successo), cioè l’idea che tutte le verità aritmetiche siano riconducibili a verità logiche, richiede essenzialmente una strumentazione logica del secondo ordine.

Inoltre, la stessa relazione d’identità fra individui si lascia definire mediante la logica del secondo ordine sfruttando *il principio leibniziano d’identità degli indiscernibili*, in base al quale, se due individui a e b hanno le stesse proprietà (sono cioè indiscernibili), allora sono uguali. Formalmente, $a=b$ può essere considerato sinonimo della frase del secondo ordine:

$$(\text{per ogni proprietà } P)(a \text{ gode di } P \leftrightarrow b \text{ gode di } P)$$

3. Dalla forma logica alla semantica

Fin qui ci siamo limitati ad estrarre la forma logica delle regole e degli enunciati e a giustificare la validità in conformità ad un richiamo informale alla tecnica della variazione. Per enucleare il concetto di forma logica e accettare o no un’inferenza logica, abbiamo visto essere fondamentale il significato attribuito alle particelle logiche, in primo luogo ai connettivi. Di tale significato abbiamo dato una versione intuitiva che forse ora conviene fissare un po’ più da vicino e con riferimento alla sola concezione

classica.

L'interpretazione tradizionale assegna agli enunciati dichiarativi semplici uno stato di verità ed uno solo, fra i due possibili del vero e del falso; i connettivi sono allora da interpretarsi come funzioni di verità che permettono di costituire nuovi enunciati, il cui valore resta determinato esattamente dai valori dei rispettivi enunciati costituenti. Basterà soffermarsi un attimo sulla negazione e la congiunzione. La negazione funziona come un'operazione di scambio: trasforma un enunciato vero in uno falso e viceversa; la congiunzione produce invece un enunciato che è vero se e solo se i suoi due costituenti (i congiunti) sono veri. Ciò basta, per esempio, a stabilire che una congiunzione in cui uno dei congiunti è falso è falsa.

Da un punto di vista combinatorio, si può provare in generale che la nostra scelta non è per nulla arbitraria⁷ o casuale: sorprendentemente, qualunque connessione fra enunciati bivalenti (o veri o falsi) che opera come una funzione di verità,⁸ si lascia definire mediante le due operazioni sopra viste, qualunque sia il numero dei suoi componenti (questa asserzione è una versione del cosiddetto teorema di completezza funzionale dimostrato da Emil Post agli inizi degli anni Venti).

Se la logica classica si basa sull'idea che gli enunciati si trovano sempre in uno stato definito di verità, altrettanto cruciale nella concezione tradizionale della verità è l'idea che gli enunciati risultano veri quando corrispondono ai fatti, e sono falsi altrimenti. La 'corrispondenza ai fatti' è una relazione non facile da precisare, filosoficamente problematica, ma intuitivamente richiede questo: deve essere dato una sorta di sistema di riferimento – o, come si dice tecnicamente, una *realizzazione* del linguaggio in cui si lasciano esprimere i concetti base del nostro universo del discorso – rispetto al quale i termini del discorso hanno un significato non ambiguo. Se uso un nome proprio, per es. 'Gianni', deve essere chiaro a quale individuo mi sto riferendo (per es. il mio gatto, o l'amico di mio figlio, etc.); se considero un predicato per es. 'alto' deve essere data la sua estensione (ovvero deve essere determinato di ogni individuo del mio universo se posso attribuirgli o no la proprietà espressa dal predicato in questione); di una relazione binaria, infine, deve essere determinato fra quali coppie ordinate di individui essa sussista, etc. Rispetto a una data realizzazione, ogni enunciato risulta allora perfettamente determinato nel suo valore di verità.

Sistematizzando queste idee e sviluppando la cosiddetta semantica di Tarski⁹, si lascia definire allora il fondamentale concetto di *conseguenza logica* come relazione semantica fra un enunciato A e un insieme T di enunciati: A segue logicamente da T se e solo se A è vero in ogni realizzazione che è modello di T (ovvero verifica simultaneamente tutti gli enunciati di T). Ciò fissa l'intuizione secondo la quale il legame di consequenzialità fra A e T comporta la non-esistenza di un 'mondo possibile' che verifica le leggi di T , ma falsifica A .

Con la definizione della consequenzialità logica, anche la teoria classica dell'inferenza trova, infine, un suo preciso fondamento semantico: corrette sono quelle inferenze le quali garantiscono che la conclusione è conseguenza logica delle premesse.

4. Sui limiti della logica classica

Naturalmente, l'edificio concettuale delineato riposa sulle ipotesi semplificatrici della concezione classica, i cui problemi risultano evidenti quando si considerano asserzioni che coinvolgono la dimensione temporale. Celebre il problema dei futuri contingenti, già discusso da Aristotele nel capitolo 9 del *De Interpretatione*. Si prenda l'enunciato A : «Domani ci sarà una battaglia navale». Se vale il principio della bivalenza, si potrebbe argomentare come segue: o A è vero e allora è già determinato il fatto descritto da A (dunque accadrà necessariamente), oppure è falso e pertanto è già determinato che il fatto non accadrà e dunque necessariamente non accadrà. Ma tutto questo sembra implicare il fatalismo. Ripetendo un ragionamento analogo, o domani passerò l'esame oppure fallirò; mi posso mettere l'animo in pace, dato che l'esito dell'esame è già determinato; posso dunque anche evitare di fare tardi a studiare e andare a divertirmi; non cambia nulla se è destino che passi l'esame. Una possibile soluzione consiste nell'arricchire l'analisi logica, facendo intervenire nell'argomento le cosiddette modalità «è necessario che...», «è possibile che...». Si tratta di osservare che un conto è affermare che *necessariamente* o si dà A oppure non si dà A , un conto affermare invece che o necessariamente si dà A oppure necessariamente non si dà. Il fatalismo emerge solo se si confondono i due enunciati e si assume indebitamente che la necessità – intesa come operatore enunciativo per il quale si adotta il simbolo \Box – preservi la disgiunzione, ovvero se si assume la validità di

$$\Box (A \text{ o } \text{non-}A) \rightarrow \Box A \text{ o } \Box (\text{non-}A),$$

pur accettando la direzione opposta della medesima implicazione.

Naturalmente questo è solo un assaggio superficiale di una problematica assai intricata, e non è l'unica via: si può – come suggerito dal logico polacco Jan Lukasiewicz (1878-1956) – optare per una teoria in cui i possibili stati di verità degli enunciati sono addirittura infiniti e hanno una struttura continua (per es. corrispondono ai numeri reali compresi fra 0 e 1). La logica ad infiniti valori ha avuto una grande ripresa in anni recenti a partire dagli anni Ottanta del secolo scorso, e di essa sono emerse importanti connessioni con parti avanzate della matematica.

È da rilevare che nel caso della logica a infiniti valori vengono meno i due principi cardine della logica aristotelica, cioè il principio del terzo escluso, la stessa legge di non-contraddizione $\text{non}(A \text{ e } \text{non-}A)$, nonché la cosiddetta legge di contrazione

$$(A \rightarrow (A \rightarrow B)) \rightarrow (A \rightarrow B)$$

che afferma operativamente: non conta quante volte si usa una data premessa in un argomento.

Nella direzione di una critica della logica classica, può essere utile richiamare un altro caso, il quale mostra come la situazione, anche a livello di linguaggi naturali, possa essere assai intricata.

Si consideri la seguente inferenza:

1. Se piove, prendo l'ombrello.

2. Se piove, indosso l'impermeabile;
3. Dunque, se piove, prendo ombrello e indosso l'impermeabile.

Essa è corretta e si lascia senz'altro trasformare nella regola, apparentemente innocua e accettabile universalmente:

$$\text{da } C \rightarrow A \text{ e } C \rightarrow B \text{ inferisci } C \rightarrow (A \text{ e } B).$$

Eppure non è così. Infatti, posso immaginarmi un controesempio, vale a dire una situazione nella quale valgono le premesse, ma fallisce la conclusione. Basterà scegliere $C = \text{«Ho 0.90€»}$, $A = \text{«Compro Le Figaro»}$, $B = \text{«Compro Le Monde»}$; allora potranno valere le due premesse, ma in tal caso è assai dubbio che valga la conclusione, cioè che, se ho solo 90 centesimi di euro, acquisti entrambi i giornali¹⁰.

Un altro ambito nel quale la concezione classica deve essere integrata o rivista è quello del ragionare su concetti vaghi, per esempio quelli che corrispondono ad aggettivi come 'grande', 'piccolo'. Seguendo Eubulide di Mileto (IV sec.d.C), basterà menzionare il paradosso del Sorite (soròs= mucchio), che procede dalle seguenti premesse: (i) un singolo granello di sabbia non fa un mucchio di sabbia; (ii) l'aggiunta di un granello di sabbia ad un insieme di granelli che non costituiscono un mucchio, non lo trasforma in mucchio. Dunque: 2 granelli non fanno un mucchio; 3 granelli non fanno un mucchio,... Andando avanti così, siamo condotti alla indesiderata conclusione che neanche una collezione di un numero arbitrariamente grande di granelli costituisce un mucchio.

Tralasciando la discussione di possibili soluzioni, concludiamo ricordando che la logica classica può essere radicalmente criticata se si aderisce ad una interpretazione del significato dei connettivi logici in termini di asseribilità, secondo la quale non sono tanto le condizioni di verità di un enunciato che contano: si deve sapere che cosa conta come prova (evidenza) di A per avere diritto di asserire A . Questo atteggiamento porta ad una radicale reinterpretazione epistemica delle operazioni logiche: così, al fine di affermare $A \rightarrow B$, deve essere dato un metodo che permette di trasformare ogni prova di A in una corrispondente prova di B ; l'asserzione di $\text{non-}A$ richiede che si disponga di un metodo che trasforma ogni prova di A in una prova dell'assurdo, mentre una disgiunzione richiede una prova del primo disgiunto oppure una del secondo.

Non sarebbe allora difficile provare che la classica legge della doppia negazione ($\text{non-non-}A \rightarrow A$), non vale sotto questa interpretazione: infatti, se si giunge ad un assurdo assumendo che una prova di A implichi una contraddizione, non per questo si può concludere di avere una prova di A stessa. Inoltre, il terzo escluso non vale universalmente: accettare A oppure $\text{non-}A$ comporta che si disponga di una prova di A oppure di una prova della sua negazione; che è come sostenere, di fronte a un qualsiasi problema (codificato da) A , che dovrebbe essere sempre possibile risolverlo.

Se si aderisce a questa teoria del significato degli operatori logici, si è inevitabilmente condotti a una revisione critica dei fondamenti della matematica, revisione che apre un affascinante campo di ricerca noto come *intuizionismo*, legato al nome del grande

matematico olandese L. J. E. Brouwer (1887-1963) e in tempi a noi più vicini alla riflessione del logico e filosofo di Oxford Michael Dummett e allo sviluppo della teoria costruttiva dei tipi del logico e matematico svedese Per Martin-Löf.

5. Completezza e complessità logica

Da queste considerazioni sommarie dovrebbe emergere quanto sia azzardato irrigidire la concezione della logica negli stereotipi tradizionali e come vi sia al contrario un ampio spazio di problematizzazione e di arricchimento su specifici temi di ricerca, di cui non possiamo ovviamente dar conto in questo contesto.

Possiamo tuttavia concludere riallacciandoci brevemente al tema iniziale della completezza, che ci porta a convergere sulla figura e l'opera di Kurt Gödel. È possibile fornire un *metodo effettivo*¹¹ per catturare tutte e sole le inferenze logicamente corrette (modulo una prefissata nozione di correttezza logica) o – più in generale – esiste un metodo effettivo per generare esattamente le conseguenze logiche di un dato insieme di assiomi?

Conviene subito ribadire che la risposta dipende dal tipo di strumento adottato per fissare l'analisi formale: è fondamentale il livello logico al quale si situa l'indagine. Un conto è lavorare al livello enunciativo della logica, facendo uso dei soli connettivi proposizionali classici; un conto è ragionare con la logica elementare che è caratterizzata dall'estensione del momento enunciativo con i quantificatori su individui, o addirittura mediante la logica del secondo ordine in cui si quantifica su proprietà e relazioni arbitrarie.

Ora al problema della completezza si dà soluzione positiva agli inizi degli anni Venti (con Hilbert, Bernays e Post) nel caso della logica proposizionale classica e nove anni dopo, nel caso della logica elementare, con il teorema fondamentale contenuto nella tesi di dottorato di Kurt Gödel.

Un fatto essenziale forse non abbastanza sottolineato – sia per il suo rilievo tecnico specifico sia per il suo profondo interesse concettuale – è che il metodo effettivo che permette di generare le conseguenze logiche di una data teoria (enunciativa o elementare) è *semplicemente una versione formale e rigorosa del classico metodo assiomatico* (o ipotetico-deduttivo), che trae le sue compiute radici dagli *Elementi* di Euclide (vissuto ad Alessandria attorno al 300 a. C.) e matura in tutta la sua potenza nell'Ottocento, in particolare nelle mani degli studiosi di geometria. In altri termini: la logica del Novecento offre una risposta del tutto originale al problema del perché si debba rigorosamente assiomatizzare una teoria T , in altre parole perché ciò implica l'esistenza di un programma (in senso tecnico) che genera meccanicamente tutte le conseguenze logiche di T .

In sostanza: dai risultati di Gödel e Turing degli anni Trenta segue che le procedure assiomatiche sono da sussumersi sotto la specie delle procedure effettive, e che la costruzione di teorie può essere assimilata alla costruzione di algoritmi o programmi per produrre meccanicamente conoscenze.

Dunque una meccanizzazione della conoscenza e la realizzazione del sogno leibniziano? Nient'affatto: i risultati d'incompletezza di Gödel mostrano che vi è un nuovo protagonista nella riflessione teorica logico-matematica, la *complessità logica*. Infatti, la meccanizzazione della relazione di conseguenza logica funziona per i primi livelli, ma *non* funziona per livelli superiori e in particolare quando si voglia meccanizzare la nozione di verità aritmetica anche solo elementare, o nel caso della logica del secondo ordine. Il punto è che il concetto di verità aritmetica elementare risulta radicalmente più complesso (in un senso rigorosamente precisabile) di quello di dimostrabilità.

Come la forma logica ci ha fornito all'inizio di questo discorso un modello per giustificare le inferenze logiche corrette, è ancora l'analisi della struttura logica, in un senso più raffinato e pregnante, che ci dà la chiave per cogliere la profonda differenza fra i concetti di base – verità e dimostrazione – della logica, e per avvicinarci ai grandi risultati d'incompletezza.

NOTE

* Questo contributo è una sorta di sommario di temi che sono stati toccati nell'incontro del 27 ottobre svoltosi a Prato nell'ambito di Pianeta Galileo 2005. I temi sono enunciati e schizzati, mai sviluppati o approfonditi. Si spera che questo stile di presentazione possa servire di stimolo ad approfondimenti autonomi. Di fatto, mi sono rivolto agli studenti senza seguire un testo scritto. La conclusione è che il testo qui presentato è ortogonale a una presentazione accademica in senso stretto ed intende rendere lo stile colloquiale adottato durante l'incontro.

¹ È il consiglio che Mefistofele, che ha momentaneamente preso il posto del professor Faust, dà a uno studente: «Mio caro amico, vi consiglio pertanto e in primo luogo il corso di logica» (cito da: W.J.Goethe, *Faust e Urfaust*, trad.it. e cura di G. Amoretti, Milano 1965).

² In tutti quegli ambiti dell'attività pratica e teorica in cui ci serviamo di argomentazioni al fine di accettare determinate conclusioni; si pensi paradigmaticamente all'ambito della giurisprudenza, ma anche alle argomentazioni di un filologo che sta costruendo una edizione critica; o a quelle di un clinico che elabora certe evidenze empiriche per giustificare una data diagnosi.

³ Senza ometterne alcuna e dandone una descrizione esaustiva ed effettiva.

⁴ Ricordiamo qui solo il nome di Diodoro Crono per la scuola megarica, e quelli di Zenone di Cizio e Crisippo per la logica stoica (tutti vissuti fra il IV e il III secolo a.C.).

⁵ Da leggersi semplicemente come: da A oppure B e non A , concludo B .

⁶ Non ci soffermiamo qui sulla classica teoria del sillogismo, che non è comunque necessaria per comprendere l'esempio. Chi volesse averne un quadro compatto, rigoroso, ma accessibile, può consultare ad esempio il capitolo II in [1], oppure il capitolo di M. Mugnai in [2].

⁷ Anche se non è affatto l'unica possibile, né la più economica.

⁸ Ovvero il suo valore è fissato da una tavola finitaria una volta che sono noti i valori di verità degli argomenti.

⁹ Si tratta di uno dei protagonisti della logica del Novecento, il logico polacco Alfred Tarski (1902-1983).

¹⁰ Si tratta di un tipo di esempi che è stato portato in auge solo nella seconda metà degli anni Ottanta dal logico francese J.Y. Girard, che ha iniziato una profonda rielaborazione dei principi della logica a partire da motivazioni di vario genere, non ultime quelle provenienti dalla *computer science*.

¹¹ La spiegazione di che cosa s'intenda per metodo effettivo richiederebbe una specifica discussione; intuitivamente, un metodo siffatto può essere semplicemente identificato con un procedimento che si lascia (almeno in linea di principio) formalizzare in un programma (di un dato linguaggio di programmazione) ed eseguire mediante un calcolatore. Gli algoritmi standard di calcolo che usiamo per fare le quattro operazioni, la procedura per ordinare lessicograficamente un insieme finito di parole della nostra lingua, quella per compilare un orario scolastico, sono tutti esempi di metodi effettivi. L'analisi formale e concettuale della nozione è dovuta all'opera di Alan Turing (1912-1954), ma anche indipendentemente a Post, e ad altri logici e matematici, fra cui lo stesso Gödel.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ballo, E. *et alii*, *Lezioni di Logica*, Muzzio, Padova 1990.
- [2] Casari, E., *Introduzione alla Logica*, Utet, Torino 1997.

IL FASCINO DELL'INFINITO

FRANCA CATTELANI DEGANI

*Dipartimento di Matematica Pura e Applicata «G. Vitali»
Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, sede di Modena*

1. Un tema che riguarda la matematica, ma non solo

«L'infinito! Nessun altro problema ha mai scosso più profondamente lo spirito umano»: sono parole di David Hilbert, uno dei più grandi matematici vissuti tra XVIII e XIX secolo, e facilmente condivisibili.



Basti pensare allo stupore che coglie il bambino quando s'accorge che, scelto un numero comunque grande, se ne può trovare uno ancor più grande, e poi uno ancor più grande e così via, senza mai giungere ad una fine. Si pensi all'enorme difficoltà incontrata da una cultura evoluta come quella greca nel maneggiare l'infinito; si pensi alla ripetizione continua di un fregio, come si ammira in tanti monumenti arabi, quasi per voler dare l'idea dell'immensità e non finitezza di un essere superiore le cui sembianze è vietato ed impossibile riprodurre.

L'infinito è un tema basilare per la matematica, potremmo dire che ne è il pane quotidiano, anche se riguarda in primo luogo la filosofia e la teologia, ma non ne sono esenti altre discipline, come l'arte (l'abbiamo appena detto poc'anzi), la letteratura,

Una delle poesie più note ai nostri studenti è *L'infinito* di Giacomo Leopardi.

*Sempre caro mi fu quest'ermo colle,
e questa siepe, che da tanta parte
dell'ultimo orizzonte il guardo esclude.
Ma sedendo e rimirando, interminati
spazi di là da quella, e sovrumani
silenzi, e profondissima quiete
io nel pensier mi fingo; ove per poco
il cor non si spaura. E come il vento
odo stormir tra queste piante, io quello
infinito silenzio a questa voce
vo comparando: e mi sovvien l'eterno,
e le morte stagioni, e la presente
e viva, e il suon di lei. Così tra questa*

*immensità s'annega il pensier mio:
e il naufragar m'è dolce in questo mare.*

Nel testo, la parola che dà il titolo alla composizione, appare esplicitamente, una sola volta e come aggettivo di *silenzio*; ma a nostro avviso nella prima parte della poesia l'autore riesce a dare l'idea di un infinito spaziale in termini in cui si può trovare una forte assonanza con ciò che si usa in matematica per definire che una successione diverge a $+\infty$: «scelta una costante comunque grande, i termini della successione da un certo punto in poi superano tutti quella costante». Ebbene, nella poesia, la funzione della costante arbitraria è svolta dalla *siepe*, che non si sa bene dove sia, può essere vicina o lontana, ma di là da quella si stendono gli *interminati spazi* fino *all'ultimo orizzonte*.

Nella seconda parte del componimento appare un altro tipo di infinito: l'*infinito temporale*, espresso dall'*eterno*, e che sappiamo essere costituito da un passato (*le morte stagioni*), un presente e – cosa che manca nella poesia – un futuro, forse a causa del pessimismo leopardiano che impedisce all'autore di guardare avanti.

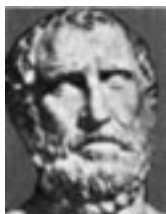
L'infinito spaziale è alla base della geometria. Se vogliamo tracciare una retta, riusciamo a disegnarne solo una porzione e poi pensiamo che essa si estenda da un lato e dall'altro senza fine; così pure, tutte le volte che tracciamo due assi cartesiani, intendiamo che essi individuino un piano che si estende in ogni direzione al di là di ogni confine.

C'è però un altro aspetto dell'infinito con cui la matematica ha spesso a che fare: è l'infinito numerico o come numerosità, ed è ciò su cui vogliamo concentrare la nostra attenzione.

2. Con l'infinito è facile imbattersi in paradossi

Quando disegniamo un segmento o una circonferenza, per noi è naturale pensare che abbiamo sotto gli occhi un insieme costituito da infiniti punti. La cosa non era così ovvia per i greci, che seguendo il diktat aristotelico «Infinitum in actu non datur», accettavano solo l'infinito potenziale e non quello attuale.

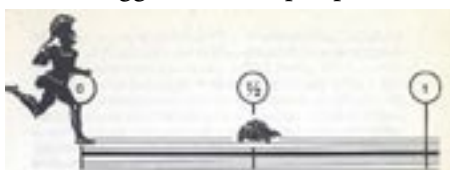
Anche le suddivisioni successive facevano sorgere questioni insolubili e al proposito sono noti i paradossi di Zenone di Elea (~ 450 a.C.), come quello dell'*atleta* o quello del *più veloce Achille e la tartaruga*.



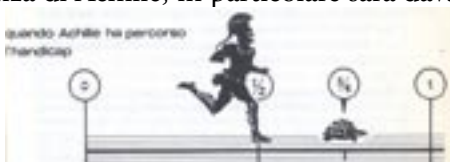
Nel primo caso si suppone che ci sia un atleta che deve percorrere un tragitto, ma: prima di percorrere l'intero tragitto, egli dovrà percorrerne la metà; prima di percorrerne la metà, dovrà percorrerne la metà della metà, cioè $\frac{1}{4}$; prima di percorrerne $\frac{1}{4}$, dovrà percorrere la metà di $\frac{1}{4}$, cioè $\frac{1}{8}$; prima di percorrerne $\frac{1}{8}$, dovrà percorrerne la sua metà,

cioè $\frac{1}{16}$; e così via. Ed il procedimento si prolunga senza fine, quindi Zenone giungeva alla conclusione che l'atleta non potrà mai partire e, di conseguenza, nemmeno arrivare, in evidente contraddizione con ciò che accade nella realtà.

Nel secondo caso si suppone che il *più veloce Achille* gareggi con una tartaruga, il simbolo per antonomasia della lentezza. Si suppone che la velocità di Achille sia per esempio il doppio di quella della tartaruga e che dovendo compiere un certo percorso, alla tartaruga venga dato un vantaggio, ad esempio pari alla metà del percorso.



Achille e la tartaruga partono contemporaneamente e quando Achille giunge al punto medio del percorso, la tartaruga avrà percorso $\frac{1}{4}$ dell'intero cammino, e si troverà ai $\frac{3}{4}$ dal punto di partenza di Achille; in particolare sarà davanti ad Achille.



Quando Achille giungerà ai $\frac{3}{4}$ del percorso, la tartaruga, pur lenta che sia, avrà percorso un altro trattino pari ad $\frac{1}{8}$ del percorso e quindi si troverà a $\frac{3}{4} + \frac{1}{8} = \frac{7}{8}$ del percorso, cioè ancora davanti ad Achille, e così via. Zenone concludeva che allora la tartaruga precederà sempre Achille, mentre sappiamo che nelle condizioni ipotizzate Achille e la tartaruga giungono a fine percorso contemporaneamente e, se la corsa continuasse, Achille precederebbe la tartaruga.

La teoria delle serie geometriche, alcune delle quali furono brillantemente utilizzate già da Archimede¹, permise di dirimere questioni come le due sopra presentate, ma col trascorrere dei secoli fecero capolino nuovi paradossi sull'infinito. Si scontrò con essi anche Galileo.



Nel suo *Discorso e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze* (1638) egli pone sulla bocca di Salviati la domanda: «Onde se io dirò, i numeri tutti², comprendendo i quadrati e i non quadrati, esser più che i quadrati soli, dirò proposizione verissima: non è così?» Galileo ben conosce l'antico assioma euclideo secondo cui «la parte è minore del tutto», e quindi, fa rispondere a Simplicio: «Non si può dir altrimenti».

Salviati però prosegue: «Interrogando io di poi, quanti siano i numeri quadrati, si

può con verità rispondere, lor esser tanti quante son le proprie radici, avvenga che ogni quadrato ha la sua radice, ogni radice il suo quadrato, né quadrato alcuno ha più d'una sola radice, né radice alcuna più d'un quadrato solo».

La situazione può essere ben illustrata dal seguente schema:

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 25, ...				
1,	4,	9,	16,	25, ...
1,	2,	3,	4,	5, ...

Nella prima riga sono elencati in ordine i numeri naturali e nella seconda sono stati selezionati dalla prima riga quelli che sono quadrati perfetti; per le ampie lacune che si creano, questi sembrano di meno dei numeri della prima riga. Nella terza riga, sotto ad ogni quadrato è stata posta la propria radice, ed è evidente che si ritrovano esattamente tutti i numeri della prima riga. Pertanto i numeri della seconda riga non possono essere di meno di quelli della prima.

Galileo conclude: «Infiniti esser tutti i numeri, infiniti i quadrati, infinite le loro radici, né la moltitudine de' quadrati essere minore di quella di tutti i numeri, né questa maggior di quella, ed in ultima conclusione, gli attributi di maggiore e minore non aver luogo ne' gl'infiniti, ma solo nelle quantità terminate». Pertanto, secondo Galileo non è possibile – non ha senso – confrontare tra loro due infiniti.

Nel 1851 uscì postuma l'opera di Bernard Bolzano (1781-1848) dal titolo *I paradossi dell'infinito*³.



Qui l'autore pone le seguenti domande:

- se $[a,b]$ è un intervallo della retta contenuto in $[a,c]$, i punti di $[a,b]$ sono di meno di quelli di $[a,c]$?
- i numeri razionali tra 0 e 5 sono meno dei razionali tra 0 e 12 ?

Sembrerebbe naturale dover rispondere con un sì, ma lo stesso Bolzano fa notare che ogni volta che si sceglie un punto x in $[a,b]$ si può impostare la proporzione:

$$\overline{ab} : \overline{ax} = \overline{ac} : \overline{ay}$$

che, per l'unicità del quarto proporzionale, determina uno ed un solo punto y in $[a,c]$. Ma vale anche il viceversa: ogni volta che si sceglie un y in $[a,c]$, la stessa proporzione determina uno ed un solo x in $[a,b]$.

Similmente, la relazione $5y = 12x$ permette di ricavare

$$x = \frac{5}{12}y \quad \text{e} \quad y = \frac{12}{5}x$$

dalla prima delle quali per ogni numero razionale y tra 0 e 12 se ne ottiene uno tra 0 e 5 , mentre dalla seconda per ogni razionale x tra 0 e 5 se ne ottiene uno tra 0 e 12 .

Pertanto, anche se ci sembra un paradosso, non possiamo dire che i punti dell'intervallo $[a,b]$ sono di meno di quelli di $[a,c]$, come non possiamo dire che numeri razionali tra 0 e 5 sono meno dei razionali tra 0 e 12 .

3. La corrispondenza biunivoca come strumento di confronto

Chi riuscì a far chiarezza su questioni come quelle sopra esposte, fu Georg Cantor (1845-1918).



Nato a Pietroburgo da padre tedesco, studiò a Zurigo e Berlino e nella sua vita non ebbe molta fortuna. I suoi risultati furono fortemente criticati soprattutto da colui che era stato il suo maestro, Leopold Kronecker, cosa che gli provocò profonde depressioni, tanto che concluse i suoi giorni in una casa per malati di mente.

Oggi gli si riconoscono quegli onori che non ebbe in vita, perché è universalmente riconosciuto come il fondatore della teoria degli insiemi, come colui che è riuscito a dar dignità nella matematica all'infinito attuale, «aprendoci le porte – come diceva Hilbert – sul paradiso».

Attraverso il concetto di corrispondenza biunivoca egli ha dato un nuovo significato al concetto di numero naturale. Supponiamo che ad un bambino in età prescolare venga chiesto di apparecchiare la tavola per la sua famiglia composta da papà, mamma, zio, zia, nonno, nonna, il bambino stesso, una sorella; quindi 8 persone in tutto. Magari il bambino non sa ancora contare, ma è semplice per lui capire che deve fare in modo che sulla tavola ogni persona abbia il suo piatto, perché non è educato che due persone mangino nello stesso piatto, ma non deve nemmeno accadere che sul tavolo restino piatti che non sono per nessuno.



Facendo in modo che persone distinte abbiano piatti distinti e che non restino piatti anonimi sul tavolo, il bambino realizza una corrispondenza iniettiva e suriettiva, cioè una corrispondenza biunivoca tra la sua famiglia e l'insieme dei piatti, ma nello stesso tempo conta fino a 8, coglie l'essenza del numero 8 come qualcosa di comune ai

componenti della sua famiglia ed alla totalità dei piatti messi sul tavolo.

Analogamente possiamo chiederci: cos'è il numero 4? È quel qualcosa, quell'entità astratta che nasce dal fatto che si possono porre in corrispondenza biunivoca le stagioni dell'anno coi lati di un quadrato, con le braccia di una croce, coi punti cardinali, con le dita di una mano una volta escluso il pollice, con l'insieme delle lettere $\{x, y, z, t\}$, ... Il 4 è quel qualcosa che accomuna, in termini matematici «la classe di equivalenza» di tutti gli insiemi che possono essere posti in corrispondenza biunivoca con, ad esempio, l'insieme delle stagioni dell'anno.

La corrispondenza biunivoca, detta anche 'uno ad uno', è quindi lo strumento principe, il 'metro' che Cantor scelse per stabilire se un insieme è o no numeroso come un altro.

Gli schemi sottostanti mostrano che l'insieme dei numeri naturali può essere posto in corrispondenza 'uno ad uno' con quello dei quadrati perfetti, e così pure con l'insieme dei numeri pari o l'insieme dei dispari:

1	2	3	4	5	6	...	1	2	3	4	5	6	...	n	...
↓	↓	↓	↓	↓	↓		2	4	6	8	10	12	...	2n	...
1	4	9	16	25	36	...	1	3	5	7	9	11	...	2n-1	...

Pertanto l'insieme dei numeri naturali è 'numeroso' come quello dei quadrati perfetti, o come quello dei numeri pari o dei numeri dispari: sono tutti quanti insiemi *equipotenti*. Cantor infatti diceva che due insiemi che possono essere posti in corrispondenza biunivoca hanno la stessa *cardinalità* o anche la stessa *potenza*, cioè *equipotenti*. Nel caso poi che l'insieme A sia finito e costituito da n oggetti, la sua *cardinalità* o *potenza* sarà indicata con $|A| = n$.

È il concetto di cardinalità che permette di dare una risposta al paradosso individuato da Galileo.

Supponiamo che A sia un insieme e B un suo sottinsieme proprio e non vuoto. Se A è finito con cardinalità n , allora la cardinalità di B è certamente minore di n :

$$\left. \begin{array}{l} |A| = n \\ B \subseteq A, \quad B \neq A \end{array} \right\} \Rightarrow |B| < n;$$

cioè nel caso di insiemi finiti, passando a sottinsiemi propri la cardinalità diminuisce, cosa che in generale non è vera per insiemi infiniti. Infatti gli insiemi **N** dei naturali, **P** dei pari, **D** dei dispari, **Quadr** dei quadrati perfetti sono tutti equipotenti, anche se si ha

$$\mathbf{N} \supset \mathbf{P} \qquad \mathbf{N} \supset \mathbf{D} \qquad \mathbf{N} \supset \mathbf{Quadr}$$

Analogamente, nei casi trattati da Bolzano, gli intervalli $[a, b]$ e $[a, c]$ sono equipotenti, come sono equipotenti l'insieme $\mathbf{Q}[0, 5]$ dei numeri razionali tra 0 e 5 e $\mathbf{Q}[0, 12]$, insieme dei numeri razionali tra 0 e 12, anche se si ha

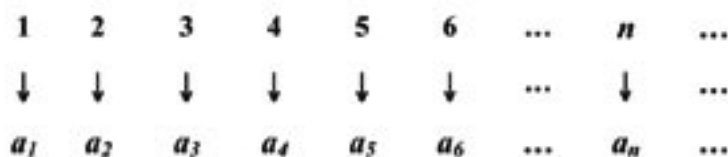
$$[a,b] \subset [a,c]$$

$$Q[0,5] \subset Q[0,12].$$

In conclusione, 'essere parte propria di...' (o 'essere sottoinsieme proprio di ...') non vuol necessariamente dire 'esser meno numeroso di ...', ma vale solo per gli insiemi finiti, mentre un insieme infinito può esser posto in corrispondenza biunivoca (1 a 1) con una sua parte propria. Anzi, questa è una delle caratteristiche fondamentali di un insieme infinito, tanto che può essere assunta a definizione di insieme infinito.

4. L'infinito numerabile

Un insieme A infinito che possa essere posto in corrispondenza biunivoca con l'insieme N dei numeri naturali, è stato definito da Cantor *numerabile* o con la potenza \aleph_0 (si legge 'alef-zero', dove alef è la prima lettera dell'alfabeto ebraico). Cioè, A è numerabile se esiste almeno un modo per associare a ogni numero naturale n un elemento a_n di A, cosicché gli elementi di A vengano etichettati dai numeri naturali in modo che l'ultimo rigo dello schema sottostante contenga tutti gli elementi di A (applicazione suriettiva) e senza ripetizioni (applicazione iniettiva)

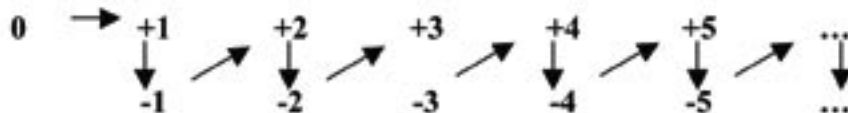


In breve possiamo dire che A è numerabile se e solo se si possono disporre i suoi elementi in fila indiana senza tralasciarne alcuno e senza ripeterne alcuno.

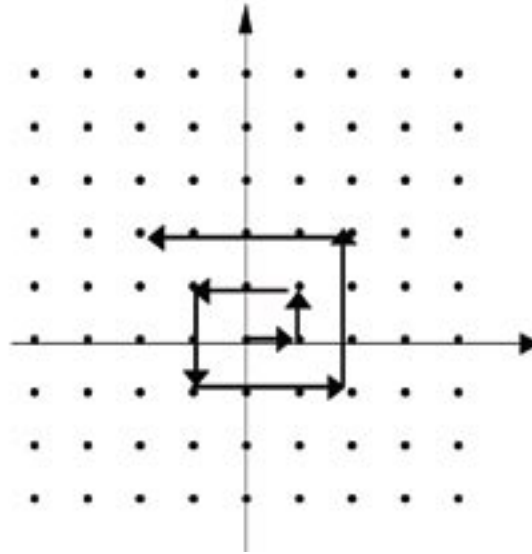
Pertanto i naturali, i pari, i dispari, i quadrati perfetti sono tutti insiemi numerabili:

N	1, 2, 3, 4, 5, ..., n, ...
P	2, 4, 6, 8, 10, ..., 2n, ...
D	1, 3, 5, 7, 9, ..., 2n-1, ...
Quadr	1, 4, 9, 16, 25, ..., n², ...

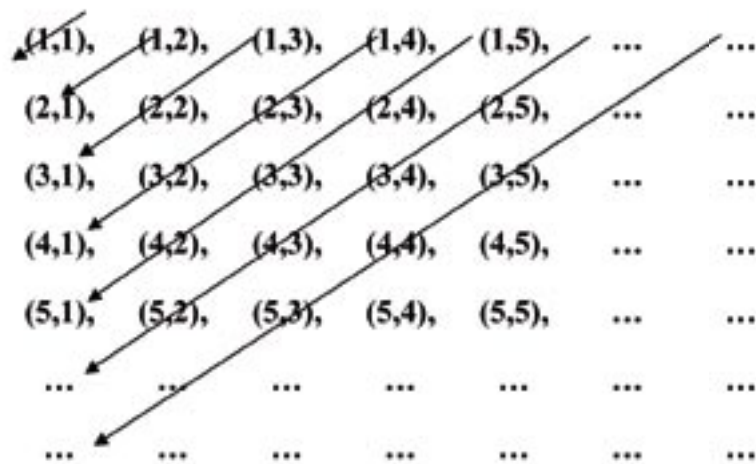
Ma è numerabile anche l'insieme Z degli interi: basta disporre in una prima riga lo zero e gli interi positivi, sotto ad ognuno di questi il proprio opposto e poi costruire una fila indiana secondo il percorso indicato dalle frecce:



Se i punti dello schema seguente indicano i punti del piano cartesiano a coordinate intere, anche questi possono essere posti in fila indiana, ad esempio secondo l'ordine con cui si incontrano a partire dall'origine degli assi nel cammino indicato dalle frecce, anche se non è certo l'unico modo.



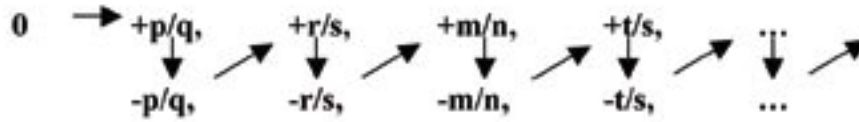
Consideriamo poi l'insieme delle coppie ordinate di numeri naturali disposte come nello schema sottostante secondo infinite righe in ognuna delle quali ci sono infinite colonne.



Le coppie possono essere ridisposte in un'unica fila indiana secondo l'ordine con cui esse si incontrano percorrendo le frecce dalla coda alla punta, a partire da quella che passa per $(1, 1)$ e poi scendendo via via secondo frecce parallele. Il procedimento, ideato dallo stesso Cantor e detto *diagonale*, permette poi di dimostrare che un'infinità numerabile di infinità numerabili è ancora un'infinità numerabile, qualora si pensi che ogni riga sia costituita da una generica fila indiana.

Se riguardiamo ogni coppia (m, n) come la frazione $\frac{m}{n}$, ne deduciamo che l'insieme delle frazioni è numerabile. Supponiamo ora di scorrere in ordine questa fila indiana con tutte le frazioni, muniti di una gomma. Ogni volta che incontriamo una frazione equivalente ad una già incontrata in precedenza, la cancelliamo. Ci resterà ancora una fila indiana di frazioni ognuna delle quali rappresenterà un diverso numero razionale

positivo mentre ogni numero razionale positivo è rappresentato da una di esse. Quindi l'insieme \mathbf{Q}^+ dei numeri razionali positivi è numerabile. Ma allora anche l'insieme dei razionali $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}^+ \cup \mathbf{Q}^- \cup \{0\}$ è numerabile; basta ripetere un procedimento analogo a quello usato per l'insieme \mathbf{Z}



Il risultato è piuttosto sorprendente: è possibile disporre i numeri razionali in un ordine tale che, ad eccezione dello zero – che è il primo della fila – per ogni razionale ce n'è uno immediatamente precedente ed uno immediatamente successivo, mentre sappiamo che sulla retta i numeri razionali sono *densi*, cioè tra due qualunque numeri razionali ve ne sono infiniti. Si tratta però di ordinamenti ben diversi.

A questo punto viene da chiedersi: tutti gli insiemi infiniti sono numerabili? La risposta è no.

5. La potenza del continuo

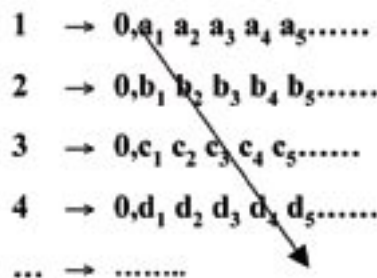
I numeri reali sono troppi per essere disposti 'in fila indiana' e lo si può provare dimostrando che sono già troppi gli elementi dell'insieme

$$\mathbf{E} = \{x \in [0, 1] : x = 0, x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 \dots x_n \dots, \text{ con } x_1 = 0 \text{ oppure } x_1 = 1, \forall i = 1, 2, \dots, n, \dots\}.$$

Appartengono ad \mathbf{E} ad esempio i numeri: **0, 01100101**; **0,100100100** ; **0,1111....**

Per comodità pensiamo che le cifre decimali di ogni elemento di \mathbf{E} siano infinite e – qualora non lo fossero – poniamo degli zeri in coda.

Ragioniamo per assurdo, supponendo che \mathbf{E} sia numerabile; ciò significa che gli elementi di \mathbf{E} si possono disporre in fila indiana, secondo lo schema sottostante, in modo che la fila indiana contenga tutti gli elementi di \mathbf{E} e senza ripetizioni:



Mediante le cifre decimali disposte lungo la freccia, possiamo costruire il numero

$$y = 0, y_1 y_2 y_3 y_4 y_5 \dots y_n \dots,$$

con :

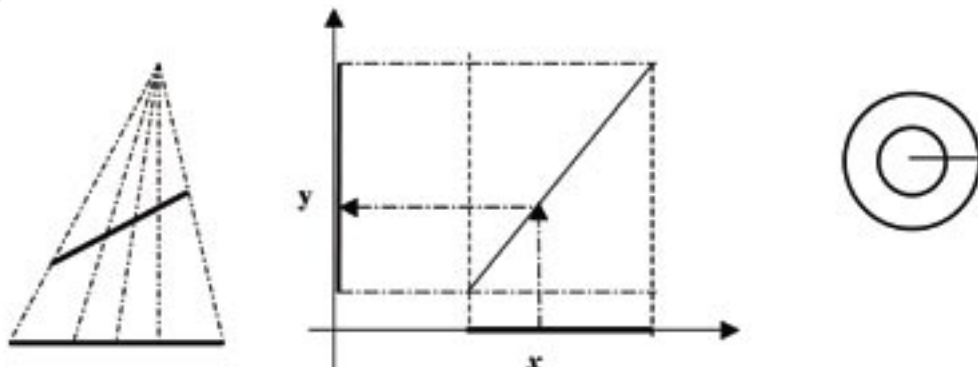
$$\begin{array}{llll}
 y_1 = 0, \text{ se } a_1 = 1 & \text{ma} & y_1 = 1, \text{ se } a_1 = 0 ; \\
 y_2 = 0, \text{ se } b_2 = 1 & \text{ma} & y_2 = 1, \text{ se } b_2 = 0 ; \\
 y_3 = 0, \text{ se } c_3 = 1 & \text{ma} & y_3 = 1, \text{ se } c_3 = 0 ; \\
 y_4 = 0, \text{ se } d_4 = 1 & \text{ma} & y_4 = 1, \text{ se } d_4 = 0 ;
 \end{array}$$

e così via.

Il nuovo numero y è un elemento di \mathbf{E} , perché le sue cifre decimali sono solo 0 oppure 1 , ma è diverso dal primo elemento di \mathbf{E} nella fila indiana, perché ne differisce per la prima cifra decimale; è diverso dal secondo numero, perché ne differisce per la seconda cifra decimale; è diverso dal terzo, perché ne differisce per la terza cifra decimale; e così via. Essendo diverso da tutti gli elementi di \mathbf{E} della fila indiana, non potrà stare in questa; ma ciò è assurdo, perché avevamo supposto che la fila indiana contenesse tutti gli elementi di \mathbf{E} e $y \in \mathbf{E}$. L'assurdo deriva dall'aver supposto che \mathbf{E} sia numerabile.

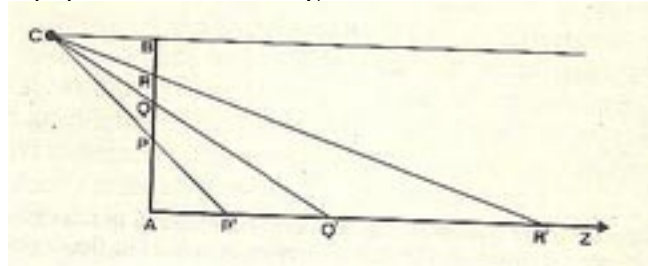
Siamo quindi di fronte ad un nuovo tipo di infinito, *maggiore* rispetto al numerabile, risultato che scardina la concezione galileiana secondo cui «gli attributi di maggiore e minore non aver luogo ne' gl'infiniti». L'insieme \mathbf{E} può essere riguardato anche in un altro modo: i suoi elementi non sono altro che tutti e soli i numeri reali dell'intervallo $[0,1]$ scritti in numerazione binaria. Quindi \mathbf{E} è equipotente all'intervallo $[0,1]$, cosa che ha indotto Cantor a definire tale cardinalità *potenza c* o *del continuo*.

È poi relativamente semplice porre in corrispondenza biunivoca l'intervallo $[0,1]$ con un generico intervallo $[a,b]$ e le immagini sottostanti mostrano come si possano porre in corrispondenza 'uno-a-uno' due qualunque segmenti, proiettando i punti dell'uno su quelli dell'altro a partire dall'intersezione delle semirette passanti per i loro estremi, oppure sistemando un segmento sull'asse delle ascisse, l'altro su quelle delle ordinate e poi associando ad ogni ascissa di un punto del primo segmento l'ordinata del punto immagine sulla diagonale del rettangolo che si proietta, sugli assi, sui due segmenti dati.



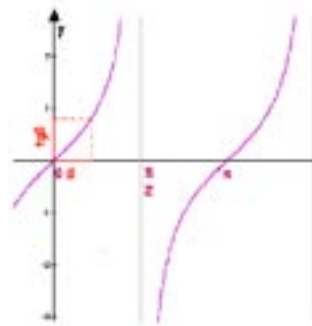
In due circonferenze concentriche, ogni raggio pone in corrispondenza 'uno-a-uno'

un punto di una circonferenza con un punto dell'altra, indipendentemente dalle loro lunghezze. Sono equipotenti anche un segmento e una semiretta: il disegno seguente



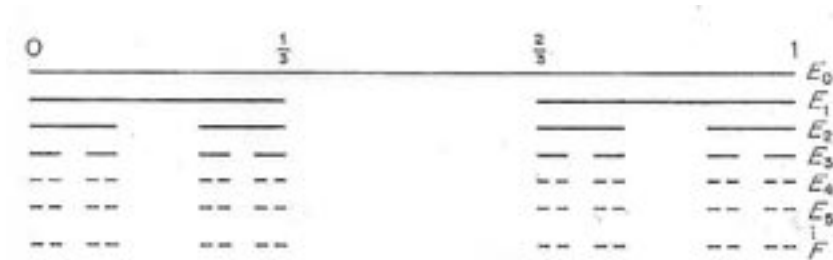
mostra come le semirette uscenti da C permettano di associare ad ogni punto del segmento AB un punto della semiretta AZ (come ad esempio R e R' oppure Q e Q') rispettando le caratteristiche di iniettività e suriettività.

Se poi associamo ad ogni $x \in]\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}[$ l'elemento $y = \tan x$, realizziamo una corrispondenza biunivoca tra l'intervallo $]\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}[$ e l'intero asse delle y .



6. La polvere di Cantor

Dato l'intervallo $[0,1]$, supponiamo di dividerlo in tre parti uguali e poi di cancellare la parte centrale.



Ci restano due intervalli su cui operiamo in modo analogo: dividiamo ognuno di essi in tre parti uguali e poi cancelliamo la parte centrale. Procediamo via via così e ciò che resta al termine del procedimento (che in realtà non termina mai, ma possiamo pensare di giungerne alla fine solo mentalmente) è un insieme detto *polvere di Cantor* o *insieme ternario di Cantor*.

Poniamoci questa prima domanda: quanto misura complessivamente ciò che vado

a cancellare dall'intervallo $[0, 1]$?

Dopo n passi, ho cancellato intervalli per una misura totale pari a⁴

$$\frac{1}{3} + \frac{2}{3^2} + \frac{2^2}{3^3} + \frac{2^3}{3^4} + \dots + \frac{2^{n-1}}{3^n} = \frac{1}{3} \left(1 + \frac{1}{3} + \frac{2^2}{3^2} + \frac{2^3}{3^3} + \dots + \frac{2^{n-1}}{3^{n-1}} \right) = \frac{1}{3} \frac{1 - \left(\frac{2}{3}\right)^n}{1 - \frac{2}{3}} = 1 - \left(\frac{2}{3}\right)^n$$

che al divergere di n si approssima sempre più ad **1** e quindi, alla fine del processo di cancellazione, avrò eliminato intervalli di misura complessiva **1**. Ma allora la polvere di Cantor, che è ciò che resta dell'intervallo $[0, 1]$, sarà un insieme di misura **0**.

Poniamoci poi una seconda domanda: quanti sono i punti dell'insieme di Cantor?

Pensiamo di numerare in base 3. Quando da $[0, 1]$ cancelliamo la parte centrale, eliminiamo tutti i numeri scritti nella forma **0,1...**, mentre manteniamo quelli scritti nella forma **0,0...** e **0,2...**

Al secondo passo cancelliamo tutti quelli della forma **0,01...** e **0,21...**, mentre teniamo tutti quelli della forma **0,00...**, **0,02...**, **0,20...**, **0,22...** Analogamente, al terzo passo eliminiamo tutti i numeri con la terza cifra dopo la virgola uguale ad **1**, mentre teniamo tutti quelli le cui prime tre cifre dopo la virgola sono solo **0** oppure **2**.

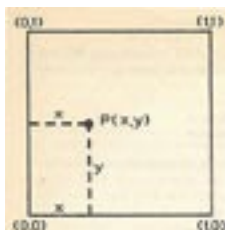
Proseguendo via via così, otteniamo che la polvere di Cantor è costituita da tutti i numeri scritti in base 3 nella forma $\mathbf{0, a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 \dots}$ dove ognuno degli infiniti $\mathbf{a_i}$ è **0** oppure **2**, $\forall i = 1, 2, \dots, n, \dots$

Basta scambiare ogni **2** con un **1** per capire che abbiamo un insieme equipotente all'insieme **E** del paragrafo 5 e quindi la polvere di Cantor ha la potenza del continuo, risultato che sembra paradossale, perché si tratta di un insieme di misura nulla e che non contiene alcun segmento, comunque piccolo lo si pensi.

7. Equipotenza anche con dimensione diversa

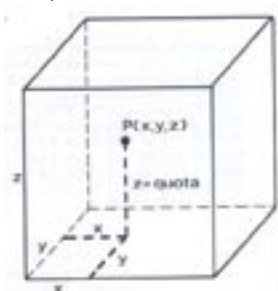
Agli occhi dello stesso Cantor apparve ancor più paradossale il poter dimostrare che i punti del lato di un quadrato (una figura geometrica unidimensionale) sono esattamente tanti quanti i punti dell'intero quadrato (una figura geometrica di dimensione due).

Nel piano cartesiano sia dato il quadrato di lato unitario con vertici in $(0, 0)$, $(1, 0)$, $(1, 1)$, $(0, 1)$.



Si consideri l'applicazione che al generico punto $\mathbf{Q}=(\mathbf{x}^*, \mathbf{0})$, che sta sul lato da $(0, 0)$ ad $(1, 0)$ e con ascissa $\mathbf{x}^*=\mathbf{0, a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 \dots}$, associa il punto del quadrato $\mathbf{P}=(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ con $\mathbf{x}=\mathbf{0, a_1 a_3 a_5 a_7 a_9 \dots}$ ed $\mathbf{y}=\mathbf{0, a_2 a_4 a_6 a_8 \dots}$

È evidente che a due punti Q e Q' diversi vengono associati due punti P e P' diversi, mentre a partire da $P=(x, y)$ con $x=0, x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 \dots$ ed $y=0, y_1 y_2 y_3 y_4 y_5 \dots$ è possibile ritornare a $Q=(x^*, 0)$ con $x^*=0, x_1 y_1 x_2 y_2 x_3 y_3 x_4 y_4 \dots$. Siamo così di fronte ad una corrispondenza biunivoca che prova l'equipotenza tra il lato del quadrato e l'intero quadrato; e non è difficile passare dall'intero quadrato a tutto il piano. Capite le tecniche del gioco, si può ragionare, invece che con un quadrato, con un cubo.



Basta associare a $Q=(x^*, 0, 0)$, con $x^*=0, a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 \dots$ il punto $P=(x, y, z)$ con $x=0, a_1 a_4 a_7 a_{10} \dots$, $y=0, a_2 a_5 a_8 a_{11} \dots$ e $z=0, a_3 a_6 a_9 a_{12} \dots$. Pertanto si ha equipotenza anche tra il lato di un cubo e l'intero cubo, da cui si può poi passare all'intero spazio.

8. Conclusioni paradossali

Tirando un po' di somme da quanto illustrato negli ultimi paragrafi, possiamo dire che i punti dell'insieme *polvere di Cantor* sono esattamente tanti quali quelli

- di un segmento comunque corto
- di un segmento comunque lungo
- di una retta
- di un quadrato
- del piano
- di un cubo
- dello spazio
- dell'intero universo
-

Di fronte a questi risultati Cantor stesso esclamava: «Io lo vedo ma non ci credo!».

«Non ci credo» perché tutto sembra cozzare contro il senso comune, per cui è ampiamente giustificabile la diffidenza nei confronti di tali risultati da parte di contemporanei di Cantor, come Kronecker; ma «lo vedo» perché le tesi sono ottenute mediante la limpidezza ed il rigore del ragionamento matematico.

E a proposito del ragionamento matematico Cantor era solito dire che «l'essenza della matematica è la sua libertà» e che «la matematica nel suo sviluppo è completamente libera e vincolata soltanto all'evidente condizione che i suoi concetti siano in sé non contraddittori e in relazioni fissate mediante definizioni a concetti già esistenti e sicuri».

9. I numeri transfiniti

In analogia al caso degli insiemi finiti, in cui la cardinalità è un numero, Cantor pensò \aleph_0 , cardinalità di un insieme numerabile, come un numero che chiamò *primo numero transfinito*.

Anche se non riuscì a dimostrarlo, considerò poi c , potenza del continuo, come cardinalità di un insieme infinito immediatamente successivo al numerabile, nel senso che riteneva impossibile l'esistenza di un insieme infinito con potenza maggiore del numerabile e minore di c^5 . In base a ciò, chiamò la potenza del continuo \aleph_1 *secondo numero transfinito*. Dimostrò poi che nel passare da un insieme A a quello delle sue parti $P(A)$ la cardinalità aumenta sempre, anche nel caso non finito e ciò gli permise di costruire una successione di numeri transfiniti:

$$\aleph_0 < \aleph_1 < \aleph_2 < \aleph_3 < \aleph_4 < \dots < \aleph_n < \dots$$

Negli anni 1895 – 97 mise a punto un'aritmetica dei numeri transfiniti, con regole per sommarli, moltiplicarli, elevarli ad una potenza, come, per esempio:

$$\aleph_0 + \aleph_1 = \aleph_1 \quad \aleph_1 \times \aleph_3 = \aleph_3 \quad 2^{\aleph_1} = \aleph_1.$$

Accanto a questi numeri transfiniti, detti *cardinali* e ottenuti a partire da insiemi in cui non conta l'ordine degli elementi, Cantor costruì i *numeri transfiniti ordinali*, a partire da insiemi in cui si tiene conto dell'ordine con cui si considerano gli elementi. Come credente ammetteva poi che al di sopra di tutti questi infiniti esistesse un *infinito assoluto* che comprende in sé ogni altro infinito, cioè Dio.

Potremmo chiederci: che senso ha definire questi numeri transfiniti, che non hanno un'utilità pratica? perché stare a costruire regole aritmetiche per operare su di essi? Possiamo però proseguire con un'altra domanda: che senso ha scrivere una poesia, disegnare un quadro, comporre un brano musicale? Questi sono il frutto dell'esternazione dei pensieri dell'autore mediante la sua creatività, così come i numeri transfiniti sono il frutto di un sottile e raffinato ragionamento.

David Hilbert diceva che «l'aritmetica transfinita è il prodotto più stupefacente del pensiero matematico, una delle più belle creazioni dell'attività umana nel campo dell'intelligibile» e di fronte all'esitazione di anime timide, egli esclamava: «Nessuno ci scaccerà mai più dal paradiso che Cantor ha creato per noi».

La libertà della matematica permette di costruire oggetti ideali, che magari sembrano non aver alcun valore se non per il nostro pensiero, anche se poi può accadere che col passar del tempo ciò che sembrava solo astratto trovi applicazioni concrete. È il caso della polvere di Cantor, che oggi è spesso presentato come uno degli esempi fondamentali di frattale, come un oggetto di quella geometria ideata da Mandelbrot solo nel 1975-80 e che da allora si mostra sempre più utile non solo per descrivere la natura, ma per molteplici applicazioni che vanno dalla scenografia cinematografica allo studio del battito cardiaco.

NOTE

¹ Come nell'opera sulla *Quadratura della parabola*, dove dimostra che l'area di un segmento di parabola è $\frac{4}{3}$ di quella del triangolo in esso inscritto calcolando sostanzialmente la somma della serie geometrica di ragione $\frac{1}{4}$. Si veda in proposito [11], pp. 32-41.

² Cioè i numeri naturali: 1, 2, 3,

³ Da allora se ne sono susseguite diverse edizioni, anche recenti. Si vedano in bibliografia [2] e [1].

⁴ Nei calcoli che seguono si usa la formula $1 + q + q^2 + \dots + q^{n-1} = \frac{1 - q^n}{1 - q}$, valida per ogni $q \neq 1$ e che deriva dall'uguaglianza $(1 + q + q^2 + \dots + q^{n-1})(1 - q) = 1 - q^n$

⁵ La congettura di Cantor fu chiamata 'ipotesi del continuo'. Ancor oggi, dopo oltre un secolo, non trova una risposta definitiva. Si vedano [6] e [7].

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bolzano, B., *I paradossi dell'infinito*, Feltrinelli, Milano, 1965.
- [2] Bolzano, B., *I paradossi dell'infinito*, a cura di A. Conte, Bollati Boringhieri, Torino, 2003.
- [3] Boyer, C.B., *Storia della matematica*, Mondadori, Milano, 1980.
- [4] Galilei, G., *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, Elzeviri, Leida, 1638; Barbera, Firenze, 1898.
- [5] Giacomucci, M.C., *L'infinito in matematica*, <http://www.vialattea.net/pagine/infinito>
- [6] Leonesi, S., Toffalori, C., *Il problema del continuo*, Archimede, n. 2, 2003 pp.79-84.
- [7] Leonesi, S., Toffalori, C., Tordini, S., La matematica dell'infinito, *Lettera PRISTEM*, 48, 2003, pp. 37-48.
- [8] Lombardo Radice, L., *L'infinito*, Ed.Riuniti, Roma, 1981.
- [9] Mandelbrot, B., *Gli oggetti frattali: forma, caso e dimensione*, Einaudi, Torino, 1987.
- [10] Mandelbrot, B., *La geometria frattale della natura*, Theoria, Roma, 1989.
- [11] Napolitani, P.D., *Archimede – Alle radici della scienza moderna*, in *I grandi della scienza*, supplemento a «Le Scienze», 22, 2001.
- [12] Rucker, R., *La mente e l'infinito*, Muzzio, Padova, 1994.
- [13] Russel, B., *Introduzione alla filosofia matematica*, traduzione di L. Pavolini, con uno scritto di P. Odifreddi, Longanesi, Milano, 2004.
- [14] Zellini, P., *Breve storia dell'infinito*, Adelphi, Milano, 1993.

MATEMATICA A PARTIRE DAGLI INSIEMI O DALLE CATEGORIE?

GABRIELE LOLLI

Dipartimento di Matematica, Università di Torino

Prima di discutere da dove partire è bene avere presente come la matematica è *arrivata* a insiemi e categorie. Questi concetti sono molto recenti, non erano concepiti come concetti matematici non solo da Euclide, ma neanche da Gauss o Cauchy (primo Ottocento), per i quali la domanda non avrebbe avuto senso, sarebbe stata letteralmente incomprensibile.

1. Matematica

Nella matematica, sia quella di scuola sia quella della ricerca, vige il pluralismo, si trattano tanti tipi di enti che apparentemente non hanno nulla a che vedere gli uni con gli altri: numeri naturali, figure geometriche (sono quelli maggiormente familiari agli studenti), diversi tipi di numeri, i complessi $a + ib$ ad esempio, o i quaternioni $a + ib + jc + kd$, funzioni, varietà geometriche, spazi di Hilbert, grafi, nodi, probabilità ..., e si potrebbe continuare.

A lungo numeri e figure sono stati i soli oggetti della matematica. Ma la proliferazione cresce d'intensità con l'avvicinarsi ai nostri giorni. Pochi probabilmente saprebbero dire che cosa accomuna tutti questi diversi enti sotto la stessa voce 'matematica'.

Tuttavia con il procedere (storico e sistematico) della matematica si nota una tendenza all'unificazione. Vengono concepite nozioni sotto cui cadono diversi tipi di oggetti o che si trasportano come tecniche da uno all'altro campo. Queste nozioni diventano nuovi oggetti matematici, più generali, o più astratti.

Illustriamo il fenomeno con il concetto di 'gruppo', senza pretese di fedeltà e completezza di ricostruzione storica.

1.1 Il concetto di gruppo

L'esperienza dell'addizione con i numeri interi \mathbf{Z} , dove si è abituati alla validità e all'uso di relazioni come

$$\begin{aligned} m + (n + q) &= (m + n) + q \\ m + 0 &= m \\ m + (-m) &= 0 \end{aligned}$$

e altre, si ripete con l'applicazione automatica, formale, delle stesse leggi in quella con i numeri razionali \mathbf{Q} o con i reali \mathbf{R} (tant'è che spesso non si sta a sottolineare su quel tipo di numeri si usino); ma la si ritrova anche in domini non numerici, come nella somma dei vettori.

Addirittura la si riconosce nella moltiplicazione numerica, *mutatis mutandis*, cioè solo i nomi delle operazioni,

$$\begin{aligned} m \cdot (n \cdot q) &= (m \cdot n) \cdot q \\ m \cdot 1 &= m \\ m \cdot (m^{-1}) &= 1. \end{aligned}$$

sia pure con l'inverso definito solo per $m \neq 0$.

Analogie, o qualcosa di più, si riscontrano anche in altri campi, dove si estendono le operazioni dai numeri a complessi di numeri. Tra le matrici (di numeri reali) si può definire una somma con le medesime proprietà sopra ricordate, ma anche una moltiplicazione (righe per colonne), che è pure associativa ed ha una 'unità e l'inverso per le matrici diverse da quella nulla. Si possono tuttavia considerare situazioni ancora più lontane, dove non si abbiano operazioni nel senso numerico. Consideriamo le permutazioni di n oggetti; queste conviene concepirle non in modo statico, ma come un'operazione del permutare. Esse si possono rappresentare nel seguente modo: per $n = 3$, per fissare le idee, si indichi con $\langle i, j, k \rangle$ la permutazione di tre oggetti ordinati che porta l' i -esimo al primo posto, il j -esimo al secondo e il k -esimo al terzo (i, j, k ovviamente sono tre numeri distinti uguali a 1 o a 2 o a 3).

L'azione della permutazione $\langle 2, 3, 1 \rangle$ trasforma la terna di oggetti

$$abc \quad \text{in} \quad bca$$

e la permutazione $\langle 1, 3, 2 \rangle$ trasforma quest'ultima in

$$bac.$$

Dunque la loro *composizione* (con cui si intende l'applicazione consecutiva, prima quella scritta a destra, poi quella a sinistra) trasforma abc in bac , in simboli

$$\langle 1, 3, 2 \rangle \circ \langle 2, 3, 1 \rangle : abc \rightsquigarrow bac$$

esattamente come $\langle 2, 1, 3 \rangle$ ovvero

$$\langle 1, 3, 2 \rangle \circ \langle 2, 3, 1 \rangle = \langle 2, 1, 3 \rangle$$

La permutazione $\langle 1, 2, 3 \rangle$ lascia invariata ogni terna, e si ha quindi

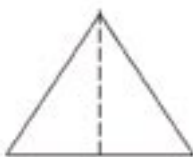
$$\langle i, j, k \rangle \circ \langle 1, 2, 3 \rangle = \langle 1, 2, 3 \rangle \circ \langle i, j, k \rangle = \langle i, j, k \rangle.$$

Ogni permutazione ha un'inversa, ad esempio

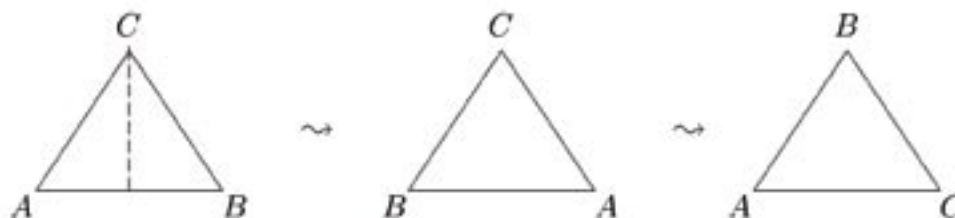
$$\langle 3, 1, 2 \rangle \circ \langle 2, 3, 1 \rangle = \langle 1, 2, 3 \rangle.$$

Un altro caso è quello dei movimenti rigidi nel piano o delle simmetrie di un poligono regolare.

Dato un triangolo equilatero



indichiamo con m la rotazione di 120° in senso orario (intorno al baricentro) e con f la simmetria rispetto all'asse verticale. La composizione di due simmetrie sarà indicata scrivendole una a fianco dell'altra; così ad esempio mf (prima f poi m) ha il seguente effetto



dove le lettere sono state messe ai vertici per aiutare a vedere i movimenti, ma non sono significative: il triangolo è portato in sé da ogni movimento e da ogni composizione dei due movimenti m ed f .

Ci si può chiedere quante e quali diverse simmetrie ci siano. I sia l'identità, nessun movimento. Si ha $f^2 = I$ e $m^3 = I$ (dove scriviamo f^2 per ff e analogamente per m), il che comporta che almeno i due elementi di base abbiano inverso, f stesso per f e m^2 per m .

Queste relazioni, semplificano la scrittura di diverse simmetrie ottenute per composizione iterata di m ed f , ad esempio

$$\begin{aligned} f^2 m &= m \\ m^2 f^2 m^2 &= m \end{aligned}$$

ma il numero di possibili iterazioni di applicazione successiva di m ed f resta infinito,

$$I, m, f, mf, fm, m^2, m^2 f, mf^2, m^2 f^2, mfm, fmf, fm^2 f, \dots$$

Questo è un caso del problema della parola: per due parole formate con le lettere f ed m , cioè due sequenze come quelle indicate sopra, decidere se sono uguali o no, non loro ovviamente, ma ciò che designano – e su questa base possibilmente stabilire quanti sono i movimenti distinti. Vedremo dopo come si può arrivare a una conclusione.

Poco alla volta, da questi e innumerevoli altri esempi, è nato il concetto di 'gruppo', anzi due, quello di gruppo e più tardi quello di 'monoide'. I gruppi sono caratterizzati dagli assiomi, che sono

proprietà associativa	$(a \circ b) \circ c = a \circ (b \circ c)$
elemento neutro o identità	$x \circ e = e \circ a = a$
inverso	$a \circ (-a) = e$

che sono verificati in tutte le situazioni di somma e nelle permutazioni e nelle simmetrie, che abbiamo considerato, che offrono pertanto diversi esempi di gruppi, alcuni finiti altri infiniti.

I monoidi sono caratterizzati solo dai primi due assiomi, hanno cioè un'operazione binaria associativa e con un elemento neutro; sono verificati anche nelle situazioni di moltiplicazione che abbiamo indicato.

L'unificazione realizzata con un nuovo concetto ha un valore non solo perché introduce questo concetto, senza annullare quelli che vi cadono sotto, ma perché risulta anche essere una illuminazione: ah, era questo l'importante!

Di aspetti importanti ne esistono tuttavia sempre parecchi, per cui è possibile che altre illuminazioni siano non meno utili – e non incompatibili. Dove si riscontrano analogie, viene da indagare anche dove inizino le differenze. Negli esempi considerati, in quelli numerici vale per l'operazione in esame anche la

$$\text{proprietà commutativa} \quad a \circ b = b \circ a$$

ma non negli altri, permutazioni, simmetrie e moltiplicazione di matrici, come si verifica con immediati controesempi.

Come si dimostrano le proprietà dei gruppi, quelle che valgono per tutti i gruppi? Da una parte derivandole dagli assiomi, dall'altra con ragionamenti generali sulle strutture (discusse dopo); spesso si lavora anche su singoli gruppi, poi si generalizza, se si può. Ad esempio un importante teorema sui gruppi finiti, di Lagrange, fu dimostrato inizialmente per le permutazioni, e solo in seguito fu esteso a tutti.

Anche se gli assiomi sono logicamente sufficienti per derivare i teoremi validi in ogni gruppo, ciascun gruppo particolare si avvale di tecniche esclusive che derivano dal primitivo interesse che ha portato a elaborare quello specifico concetto. Le proprietà numeriche giocano un ruolo nello studio dell'addizione, l'intuizione geometrica in quello delle simmetrie, e così via; e talvolta si ha una mutua fecondazione e un trasporto da un caso all'altro delle tecniche particolari.

Abbiamo sopra indicato con lettere i vertici del triangolo, per aiutare a vedere i movimenti. Indicare un triangolo con tre lettere per i vertici è un'abitudine radicata, ma non essenziale: un triangolo può anche essere individuato da tre rette, e in una trattazione analitica può essere meglio. Ma in questo caso è facile accorgersi che uno qualunque dei movimenti rigidi considerati produce una permutazione dei vertici, e dopo qualche considerazione si vede che tutte possono essere realizzate in questo modo; si ha precisamente la corrispondenza

I	$\langle 1, 2, 3 \rangle$
m	$\langle 2, 3, 1 \rangle$
m^2	$\langle 3, 1, 2 \rangle$
f	$\langle 2, 1, 3 \rangle$
mf	$\langle 1, 3, 2 \rangle$
m^2f	$\langle 3, 2, 1 \rangle$

dalla quale deriva la soluzione del problema della parola: ogni parola su f ed m corrisponde a una delle sei permutazioni ed è quindi uguale a una delle sei simmetrie indicate.

Ciò significa che i due gruppi sono lo stesso gruppo o, come si dice, sono isomorfi; l'unica differenza consiste nelle notazioni.

La tavola delle possibili trasformazioni distinte, e della loro composizione risulta essere la seguente:

	<i>I</i>	<i>m</i>	<i>m</i> ²	<i>f</i>	<i>mf</i>	<i>m</i> ² <i>f</i>
<i>I</i>	<i>I</i>	<i>m</i>	<i>m</i> ²	<i>f</i>	<i>mf</i>	<i>m</i> ² <i>f</i>
<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i> ²	<i>I</i>	<i>mf</i>	<i>m</i> ² <i>f</i>	<i>f</i>
<i>m</i> ²	<i>m</i> ²	<i>I</i>	<i>m</i>	<i>m</i> ² <i>f</i>	<i>f</i>	<i>mf</i>
<i>f</i>	<i>f</i>	<i>m</i> ² <i>f</i>	<i>mf</i>	<i>I</i>	<i>m</i> ²	<i>m</i>
<i>mf</i>	<i>mf</i>	<i>f</i>	<i>m</i> ² <i>f</i>	<i>m</i>	<i>I</i>	<i>m</i> ²
<i>m</i> ² <i>f</i>	<i>m</i> ² <i>f</i>	<i>mf</i>	<i>f</i>	<i>m</i> ²	<i>m</i>	<i>I</i>

come si può verificare considerando le seguenti relazioni rilevanti:

$$\begin{aligned}
 fm &= m^2f \\
 mfm &= f \\
 fmf &= m^2 \\
 fm^2f &= m
 \end{aligned}$$

che si possono controllare geometricamente, dalle quali si ricavano le altre semplificazioni necessarie.

In questo modo si dimostra anche che le simmetrie considerate, generate da *f* ed *m*, comprendono tutte quelle che lasciano invariato il triangolo: si sarebbe potuto pensare che anche le simmetrie rispetto agli altri due assi dovessero essere prese in considerazione, ma non è necessario: lo si può provare esaminando tutti i casi, ma attraverso il collegamento con le permutazioni si ottiene il risultato in un colpo solo, e senza lavoro. (*mf* e *m*²*f* sono le simmetrie rispetto alle altre due bisettrici.)

1.2 Il metodo assiomatico

Nello stesso modo sono nati altri concetti, che ora costituiscono l'argomento dell'algebra astratta. Ma non solo in algebra si è diffusa questa impostazione: anche in analisi non ci si basa più sui reali, o sui complessi, ma ad esempio su spazi metrici, concetto nato da un'analoga generalizzazione.

Tali movimenti di unificazione e astrazione alla fine dell'Ottocento sono diventati le increspature superficiali di più estesi movimenti complessivi. Uno di questi è la ripresa e la riformulazione del metodo assiomatico, prima ristretto alla sola geometria, ora esteso a tutte le teorie relative ai nuovi concetti, e reinterpretato in modo da ammettere sempre una pluralità di interpretazioni¹. Questo in larga misura è il *deus ex machina* che permette la proliferazione, come strumento tecnico – le spinte derivano invece dalla sempre più estesa matematizzazione.

La formazione di concetti come quello di gruppo realizzavano unificazioni parziali, o locali, ma anche nello stesso tempo una autonomizzazione delle relative aree: strutture

algebriche, strutture geometriche e argomenti numerici risultavano in una certa misura indipendenti, per lo meno quanto alla loro giustificazione. Ne risultò una tensione, se non un contrasto, con un'altra tendenza e un'aspirazione a una unificazione globale, o a una grande unificazione.

2. Insieme

Forse la più importante motivazione di questa tendenza è stata la necessità di precisare il concetto di «funzione». All'inizio del calcolo infinitesimale, le funzioni erano le curve disegnabili senza interruzioni, quindi a un livello un po' più formale le espressioni algebriche: per Eulero le funzioni erano le espressioni algebriche formate con variabili, costanti e i simboli di operazione.

Jakob Bernoulli dice esplicitamente che

Una funzione di una quantità variabile è un'espressione analitica composta in qualunque maniera da quella quantità variabile e da numeri o quantità costanti.

Per le necessità delle applicazioni e dello sviluppo armonioso della teoria si è via via ampliato il campo delle funzioni, arricchendo gli strumenti analitici che per mettevano di definirle, ad esempio con le serie di potenze, le serie di Fourier, e poi con limiti di serie.

L'aspirazione era quella di dominare matematicamente tutte le funzioni. Ma restava sempre sfuggente, proprio alla luce delle successive estensioni, il concetto di «funzione arbitraria», che pure si sarebbe voluto catturare, e che Leibniz aveva anticipato parlando di «una quantità formata in qualche modo da indeterminate e costanti».

Hermann Weyl riassume sconcolato, ancora avanti nel Novecento:

Nessuno può spiegare cosa è una funzione, ma quello che importa in matematica è questo: una funzione f è data quando ad ogni numero reale a è associato un numero b ..., detto il valore della funzione per l'argomento a .

La soluzione soddisfacente fu trovata identificando le funzioni con il loro grafo, cioè con l'insieme delle coppie $\langle x, y \rangle$ delle coordinate dei punti sulle curve. Questa idea generalizzava quella di una tabella di dati, non necessariamente legati da una legge, o da una legge nota, accordandosi anche al caso in cui la legge fosse nota e analiticamente esprimibile.

La soluzione fu considerata accettabile per la circostanza che nel frattempo era diventato familiare e diffuso il linguaggio insiemistico. Gli insiemi di punti della retta, o di numeri reali, con sempre maggior frequenza erano stati oggetto di attenzione, nello studio dei punti critici, di discontinuità o massimo, delle funzioni. All'inizio disturbavano persino le funzioni con in numero finito di punti di discontinuità, poi se ne sono incominciate a studiare con infiniti punti critici (e si è arrivati ai frattali, alla curva di Peano), e dalla topologia della retta è nata la teoria degli insiemi.

La definizione insiemistica di funzione è un sottoprodotto di minimo peso rispetto alle novità introdotte da questa teoria, ed è tarda rispetto alla costruzione della teoria,

ma forse quella che ha fatto di più per convincere i matematici ad accettare la nuova impostazione.

3. La grande unificazione

Una conseguenza della definizione insiemistica di “funzione” è stata la possibilità di avere anche una nozione insiemistica soddisfacente, senza lacune dovute alla presenza di altre nozioni primitive indefinite, di “struttura”.

Si può dire ora cosa è un gruppo: un insieme G con un'operazione binaria, una unaria e un elemento speciale, l'elemento neutro: $\langle G, \circ, -, e \rangle$. Ma un'operazione a sua volta non è altro che una funzione, in questo caso $\circ \subseteq (G \times G) \times G$ e $- \subseteq G \times G$. Anche le relazioni, come quelle di ordine, sono insiemi.

Si presenta così la possibilità di un avvicinamento, anche se in una tensione non del tutto pacifica, con l'impostazione assiomatica. Le strutture come i gruppi sono i modelli delle teorie relative, cioè le strutture del tipo adeguato nelle quali gli assiomi sono veri. Gli insiemi forniscono una semantica per le teorie assiomatiche.

Forniscono anche strumenti per ottenere risultati su tutte le strutture di un certo tipo, ad esempio i gruppi.

3.1 matematica

Con i gruppi e tutte le altre algebriche algebriche (e geometriche) si è abbastanza avanti nel ricondurre ogni discorso matematico agli insiemi; restano i numeri, anzi questo è stato l'argomento trainante a partire dalla metà dell'Ottocento.

Anche per i numeri si è trovata una definizione in termini di insiemi. Dopo i numeri naturali, a partire da questi, si definiscono con operazioni insiemistiche gli altri sistemi: gli interi, i razionali, i reali².

Nel corso del Novecento la grande unificazione è stata realizzata per mezzo del concetto di ‘insieme’. L'unificazione si è compiuta attraverso una riduzione a un unico concetto o, se si vuole, mediante l'introduzione di un nuovo concetto matematico³.

Il riduzionismo è stato un forte impulso, in parte esterno. Perché paradossalmente quello che ha decretato il successo del linguaggio insiemistico è che la parola ‘insieme’ era un termine generico, simile nella sua funzione a quello di ‘cosa’; per un po’ ha avuto i suoi sinonimi come ‘collezione’, ‘aggregato’, ‘classe’, ‘mucchio’ ...

La familiarità con i passaggi logici che fanno intervenire questa parola è una competenza logica e linguistica importante; di per sé non è teoria degli insiemi e non implica l'assunzione di un riduzionismo forte. Se la si coltivasse senza chiamarla «teoria degli insiemi» o «insiemistica» si farebbe opera utile senza metterla a repentaglio con il suo alone filosofico.

Le unificazioni parziali hanno un senso, una motivazione interna alla crescita autonoma della matematica, quella totale un po’ meno. Da un punto di vista tecnico, del fare matematica, le persone continuano in effetti a essere pluraliste, se non per una oggettiva invasione di metodi insiemistici, che si adattano allo studio delle strutture. Ma gli oggetti matematici non sono concepiti direttamente in termini di insiemi; nascono

quando si matematizza un nuovo campo, e sono inizialmente descritti nei termini dei problemi da cui nascono.

I concetti matematici sono presentabili in termini insiemistici solo nella misura in cui quello degli insiemi è un linguaggio generale per parlare di cose indeterminate, e nella misura in cui si diffonde sempre più l'abitudine a usarlo; ma normalmente esso interviene, in modo rigoroso, solo in un secondo tempo, se interviene del tutto. Qualche volta è più comodo e naturale un linguaggio specifico più ricco di suggestioni. Naturalmente gli argomenti matematici non sono indipendenti, e le intersezioni ci sono: un geometra qualche calcolo ogni tanto deve pur farlo. Ma i collegamenti non richiedono necessariamente definizioni uniformi: non c'è bisogno di dire che una pezza di lana e una di cotone o di seta sono stoffa, se si devono fare confronti, anzi chiamarle tutte stoffa può provocare equivoci.

3.2 filosofica

La grande unificazione ha invece un senso (se pur discutibile e discusso) da un punto di vista filosofico: appare naturale cercare di far ricadere tutta l'attività matematica (che in fondo è classificata come una disciplina unica e dà origine a una corporazione unica) sotto una sola manifestazione di capacità umane, come rispondente a una sola definizione. Tanto meglio se poi si scopre che tutto dipende da quasi nulla, cioè da capacità che paiono appartenere al bagaglio minimo universale degli esseri umani: la competenza necessaria risulta, nella fondazione insiemistica, una mossa cos'ì generica come quella di «mettere insieme delle cose», cioè la capacità di categorizzazione che è presente anche nella formazione dei nomi comuni. La divaricazione delle discipline all'interno di questo quadro unitario consisterebbe di sfumature, e stili differenti, magari anche fortemente marcati, tuttavia mai con il carattere di totale alterità.

4. Categorie

Per quel che riguarda le categorie, la loro storia è più recente, e la definizione del loro status non è univoca. Mentre la teoria degli insiemi è stata studiata, sperimentata e limata per molti decenni, con la partecipazione di tutto il mondo matematico, i categoristi sono di meno e hanno avuto finora meno tempo per esercitare la loro influenza.

I concetti fondamentali sono nati intorno alla metà del Novecento, nei lavori di S. Eilenberg e S. Mac Lane sulla omologia e coomologia, in questioni di topologia algebrica, ma all'inizio si presentano solo come un contributo di «idee e metodi che possono essere usati anche da chi lavora in altri campi»⁴.

In seguito, «con la recente intensificazione del loro uso, è venuta in primo piano la questione di una adeguata fondazione. Qui gli esperti sono ancora in disaccordo»⁵.

La nascita e il successivo sviluppo delle nozioni categoriali si collocano nel contesto della matematica avanzata. Il loro corretto apprezzamento non può prescindere da tali conoscenze. Tuttavia l'ambizione totalizzante di alcuni cultori ha fatto sì che anche la matematica elementare ne venisse investita, cosicché è possibile provare a dare un'idea del punto di vista categoriale, seppur pallida e forse poco convincente.

Il nuovo linguaggio (categorie, funtori, trasformazioni naturali, controvarianza, funtori aggiunti ...) non vuole sostituire quello tradizionale ma, inizialmente, vi si aggiunge, lo integra. Grazie soprattutto a felici notazioni, esso induce tuttavia un punto di vista diverso, distinguendo tra una considerazione locale e una globale, tra una interna ed una esterna.

4.1 Locale e globale

Consideriamo un esempio in dettaglio. L'unione di due insiemi X e Y si definisce di solito come

$$X \cup Y = \{x : x \in X \vee x \in Y\}.$$

Le proprietà dell'unione si dimostrano tutte inizialmente sulla base di questa definizione.

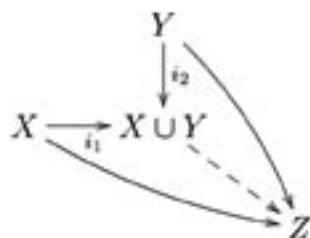
Tra l'altro, si arriva a dimostrare che $X \cup Y$ è il più piccolo insieme (rispetto a \subseteq) che contiene (nel senso di \subseteq) sia X sia Y , ossia soddisfa le tre condizioni:

$$\begin{aligned} X \subseteq X \cup Y & \quad Y \subseteq X \cup Y \\ \forall Z (X \subseteq Z \wedge Y \subseteq Z \rightarrow X \cup Y \subseteq Z) \end{aligned}$$

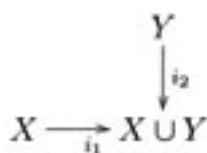
Ad esempio per $X \subseteq X \cup Y$ si ragiona in questo modo: se $x \in X$ allora per la legge logica $A \rightarrow A \vee B$ (B qualunque) si ha $x \in X \vee x \in Y$. Analogamente, anche se meno diretta, la terza parte.

Questa proprietà è globale nel senso che si riferisce a come si colloca $X \cup Y$ in relazione agli altri insiemi dell'universo, e non a cosa succede dentro a $X \cup Y$; essa può essere assunta come definizione, per la condizione «il più piccolo ...», che individua un unico insieme.

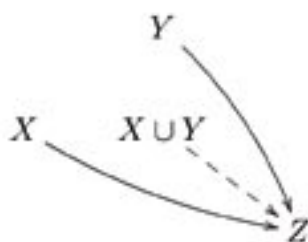
Se si usa una rappresentazione diagrammatica mediante frecce, dove le frecce continue indicano funzioni date (in questo caso iniezioni) e frecce tratteggiate funzioni che esistono in funzione di quelle date, la definizione si riassume in



dove $X \xrightarrow{i_1} X \cup Y$ e $Y \xrightarrow{i_2} X \cup Y$



traducono le prime due condizioni, e il resto del diagramma



la terza.

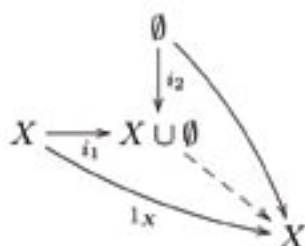
Analogamente per l'intersezione, il prodotto cartesiano e altre operazioni. Perché sarebbero preferibili queste definizioni? La differenza tra i due tipi di definizione è che nella prima si caratterizza un insieme attraverso condizioni sui suoi elementi, nella seconda attraverso condizioni sui suoi rapporti con altri insiemi.

Ne viene un modo diverso di impostare ragionamenti e dimostrazioni. Nei discorsi sulle operazioni insiemistiche, con le definizioni usuali, si lavora con frasi del tipo $x \in X$, e quantificatori sugli elementi, e hanno un ruolo importante le regole logiche dei connettivi.

Ad esempio per dimostrare che $X \cup \emptyset = X$ si osserva che da una parte $X = X \cup \emptyset$; per la già dimostrata $X \subseteq X \cup Y$ e viceversa: se $x \in X \cup \emptyset$ allora $x \in X \vee x \in \emptyset$, ma $x \notin \emptyset$ per la regola logica del sillogismo disgiuntivo, quindi $x \in X$.

Questo tipo di argomenti logici presentano la difficoltà, anche psicologica, che mentre si vuole parlare di un livello (quello delle variabili maiuscole) le dimostrazioni devono scendere a un livello inferiore (quello delle variabili minuscole).

L'impostazione categoriale non è di per sé più semplice, quanto segue un ordine diverso. La proprietà $X \cup \emptyset = X$ ad esempio viene dal diagramma

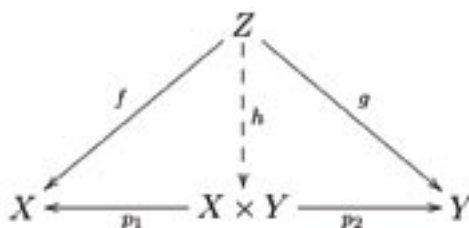


che si ottiene per specializzazione da quello della definizione⁶.

Il nuovo simbolismo dei diagrammi, nel quale è sostituito dall'iniezione N e riportato nell'ambito generale delle funzioni comporta anche che le frasi di base

sono del tipo $X \longrightarrow Y$, che esprimono una relazione tra oggetti che sono insiemi. Il vantaggio logico è che, salendo di tipo gli oggetti del discorso, si semplificano le frasi relative, che coinvolgono meno livelli: spesso affermazioni insiemisticamente articolate, se traducibili in un diagramma, diventano di tipo combinatorio. Dal punto di vista psicologico, si impara «come vivere senza usare gli elementi»⁷.

Nei ragionamenti le regole logiche sono sempre le stesse, ma il nuovo livello induce diversi percorsi e diverse strategie di pensiero. E si finisce per vedere altre cose. Le definizioni categoriali mettono in evidenza proprietà universali delle costruzioni. Nel caso del prodotto cartesiano



la coppia $\langle p_1, p_2 \rangle$ è universale tra le coppie di funzioni da un insieme a X e Y perché ogni tale coppia $\langle f, g \rangle$ si fattorizza in modo unico attraverso la coppia $\langle p_1, p_2 \rangle$ e una funzione h .

4.2 Il concetto di categoria

Il concetto di “categoria” non comporta l’aggiunta di un ulteriore tipo di enti, ma si applica a quelli tradizionali: si parla della categoria dei gruppi, della categoria degli spazi topologici e di altre, inclusa la categoria degli insiemi⁸. Ogni tipo di struttura dà origine alla sua categoria.

Ma una categoria non è soltanto la totalità di tutte le strutture di un certo tipo, essa è a sua volta strutturata dalle mutue relazioni tra gli elementi della totalità.

Ad esempio, data la categoria degli insiemi, che cosa possiamo chiederci su di essi? Possiamo ad esempio confrontarli a coppie rispetto alla cardinalità, e chiederci quindi se esiste una iniezione di uno nel secondo, o una suriezione; e possiamo chiederci quante ce ne sono; in alcuni casi potrebbe essercene una sola (se il secondo insieme ha un solo elemento).

Alcune strutture speciali si caratterizzano proprio attraverso le relazioni che hanno con tutti le altre. Nella categoria dei gruppi, il gruppo che consiste del solo elemento neutro ha la caratteristica di essere immergibile in ogni gruppo, in un modo unico, ed è tale che ogni gruppo si può applicare in un solo modo su di esso.

In tutti questi casi si vede che le domande o le risposte si riferiscono a funzioni. Tali relazioni si esprimono infatti per mezzo del concetto centrale di ogni indagine di stile categoriale, che è quello di morfismo tra oggetti. Gli oggetti possono essere molto complicati, di solito sono appunto strutture, ma queste vengono per cos’i dire considerate dall’esterno, e ciascuna è un «oggetto» della categoria.

La nozione di «morfismo», e la parola stessa, viene dall’algebra, da quella di

«omomorfismo», che inizialmente è stato definito, in termini insiemistici, come una funzione che conserva la struttura (la forma).

Nel caso dei gruppi, un omomorfismo è una funzione $f: G \longrightarrow H$ tale che (con un simbolismo trasparente)

$$\begin{cases} f(x \circ_G y) = f(x) \circ_H f(y) \\ f(e_G) = e_H \\ f(-_G x) = -_H f(x) \end{cases}$$

Nel caso degli spazi topologici, i morfismi sono le funzioni continue; nel caso degli insiemi, che non hanno una struttura da conservare, sono le funzioni usuali.

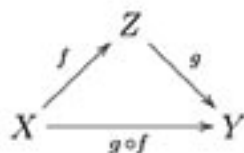
Dal punto di vista categoriale queste mappe sono nozioni primitive rette da pochi assiomi della teoria generale delle categorie e da assiomi specifici per ogni categoria, che individuano le loro proprietà in grande.

Gli assiomi generali di una categoria sono i seguenti:

1. esistono due tipi di enti, gli oggetti e i morfismi
2. a ogni morfismo f sono associati due oggetti detti rispettivamente il dominio $\text{dom}(f)$ e il codominio $\text{cod}(f)$ del morfismo (che viene indicato con $f: \text{dom}(f) \longrightarrow \text{cod}(f)$)
3. per ogni oggetto a esiste un morfismo 1_a detto identità su a
4. per ogni coppia di morfismi f e g tali che $\text{dom}(g) = \text{cod}(f)$ esiste un morfismo composizione indicato con $g \circ f: \text{dom}(f) \longrightarrow \text{cod}(g)$
5. la composizione è associativa
6. $1_b \circ f = f = f \circ 1_a$ se $a = \text{dom}(f)$ e $b = \text{cod}(f)$.

Per esprimere in modo operativamente utile queste condizioni si è rivelato essenziale l'uso dei diagrammi, e la notazione con le frecce, o meglio sono nati assieme.

I diagrammi vanno letti in modo da esprimere affermazioni, e quindi in un modo dinamico. Quando si disegna un diagramma di frecce si intende, anche se non lo si dice, che sia commutativo, vale a dire che seguire percorsi diversi da un'origine a un termine dia lo stesso risultato. Così ad esempio che $g \circ f: X \longrightarrow Y$ sia la composizione di $f: X \longrightarrow Z$ e $g: Z \longrightarrow Y$ è espresso dal seguente diagramma:



Si dice anche che $g \circ f$ si fattorizza attraverso f e g .

Le frecce e il loro uso per indicare funzioni precedono di poco le categorie; il primo che ha usato la notazione $f: X \longrightarrow Y$ per le funzioni, in senso insiemistico, è stato W. Hurewicz in topologia, intorno al 1945.

La costruzione di diagrammi quali quelli sopra mostrati ha fatto fare un salto di qualità all'uso delle frecce. Si ricordi l'osservazione di Henri Poincaré:

Nelle scienze matematiche una buona notazione ha la stessa importanza filosofica di una buona classificazione nelle scienze naturali.

Una conferma viene da Gregorio Ricci Curbastro:

Lo stesso si può dire dei metodi, perché è proprio dalla loro scelta che dipende la possibilità di costringere una moltitudine di fatti senza alcun legame apparente tra loro a raggrupparsi secondo le loro affinità naturali.

Si può dire che questo è un caso in cui «una notazione ha condotto a un concetto»⁹.

4.3 Morfismi

Inizialmente si è apprezzata soprattutto la capacità di unificazione: «diagrammi di frecce unificano e semplificano proprietà di sistemi matematici»¹⁰. Quindi si è scoperta la riformulazione in termini di morfismi di tanti concetti di base; è sorprendente quanto spesso le definizioni interne possano essere riformulate e generalizzate in termini di morfismi, senza parlare di elementi (per i categoristi, sempre).

Ad esempio alla nozione di funzione iniettiva corrisponde quella di monomorfismo. Un morfismo $i : Y \longrightarrow Z$ è un *monomorfismo* se per ogni coppia di morfismi $f, g : X \longrightarrow Y$ tali che $if = ig$

$$X \begin{array}{c} \xrightarrow{f} \\ \xrightarrow{g} \end{array} Y \xrightarrow{i} Z$$

si ha $f = g$. Si dice anche che è cancellabile (da $if = ig$) a sinistra.

Un morfismo $i : X \longrightarrow Y$ è un *epimorfismo* (generalizzando la nozione di funzione suriettiva) se per ogni coppia di morfismi $f, g : Y \longrightarrow Z$ tali che $fi = gi$

$$X \xrightarrow{i} Y \begin{array}{c} \xrightarrow{f} \\ \xrightarrow{g} \end{array} Z$$

si ha $f = g$: cancellabile a destra.

A un morfismo $f : X \longrightarrow Y$ si associano due possibili inversi, un morfismo $g : Y \longrightarrow X$ tale che $gf = 1_X$

$$X \xrightarrow{f} Y \xrightarrow{g} X$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{1_X}$

che si chiama una *retrazione* di f ; e un morfismo $h : Y \longrightarrow X$ tale che $fh = 1_Y$

$$Y \xrightarrow{h} X \xrightarrow{f} Y$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{1_Y}$

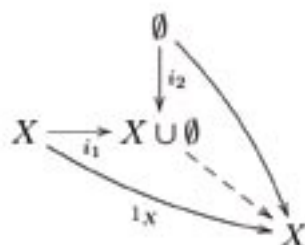
h si chiama *sezione* di f : l'assioma di scelta si può formulare dicendo che ogni f ha una sezione.

Se f ha una retrazione, f è un monomorfismo (esercizio).

Un isomorfismo è un morfismo $f : X \longrightarrow Y$ per cui esiste $g : Y \longrightarrow X$ tale che $gf = 1_X$

$$= 1_X \circ f \circ g = 1_Y$$

Il precedente diagramma



si legge nel seguente modo: se si dà per acquisito che \emptyset è un *oggetto iniziale*, nel senso che per ogni W esiste un solo morfismo da \emptyset a W , ne segue che i_1 ha una retrazione, quindi è un monomorfismo, e poi con altre considerazioni che X e $X \cup \emptyset$ sono di fatto isomorfi.

4.4 Funtori

La costruzione del prodotto cartesiano (e in generale tutte quelle che generalizzano le definizioni insiemistiche) è detta *funtore* perché si applica (nell'impostazione categoriale) sia a insiemi che a funzioni.

In generale un funtore T tra due categorie, o da una categoria in se stessa, è un'applicazione che manda oggetti dell'una in oggetti dell'altra, e morfismi tra due oggetti dell'una in morfismi tra i corrispondenti oggetti dell'altra, in modo da essere un morfismo di categorie, cioè che $T(g \circ f) = T(g) \circ T(f)$, e $T(1_a) = 1_{T(a)}$. Significa che la corrispondenza tra gli oggetti non è arbitraria o astrusa, in quanto rispetta le relazioni che gli oggetti hanno tra di loro.

Ad esempio nella categoria degli insiemi se ad ogni insieme X si associa l'insieme potenza (o insieme di tutti i sottoinsiemi) $\mathcal{P}(X)$, allora in modo automatico e naturale a ogni funzione $f: X \rightarrow Y$ si associa una funzione

$$\mathcal{P}(f): \mathcal{P}(X) \rightarrow \mathcal{P}(Y)$$

che a ogni $Z \subseteq X$ associa $\{y \in Y: \exists x \in Z (f(x) = y)\}$, quello che di solito si indica impropriamente $f(Z)$, o propriamente $\text{im}(f|Z)$.

Ma in modo altrettanto naturale si associa una funzione

$$\mathcal{P}'(f): \mathcal{P}(Y) \rightarrow \mathcal{P}(X)$$

che a ogni $Z \subseteq Y$ associa $\{x \in X: \exists y \in Z (f(x) = y)\}$, o $f^{-1}(Z)$.

Il primo è un esempio di funtore *covariante*, che è propriamente la definizione sopra riportata, il secondo di funtore *controvariante* (perché inverte la direzione delle frecce).

In algebra abbondano i funtori. Ad esempio, senza entrare nei dettagli, per ogni gruppo G l'insieme dei prodotti dei commutatori $xyx^{-1}y^{-1}$ è un sottogruppo normale di G , e il quoziente dà un gruppo abeliano; la corrispondenza è un funtore perché un

omomorfismo di gruppi manda commutatori in commutatori.

Invece se si associa a ogni gruppo il suo centro, cioè il sottoinsieme $\{a \in G : xa=ax\}$ per ogni x , non si ha un funtore, perché un omomorfismo può mandare elementi del centro fuori del centro.

Un *isomorfismo* di categorie è un funtore $T : C \longrightarrow B$ da C a B che è una biiezione, sia sugli oggetti sia sulle frecce (o c è un isomorfismo se c è un funtore $S : B \longrightarrow C$ tale che entrambi i composti $S \circ T$ e $T \circ S$ sono il funtore identico).

Una nozione più generale è quella di equivalenza di categorie. Dati due funtori $S, T : C \longrightarrow B$, una *trasformazione naturale* $\tau : S \longrightarrow T$, o un morfismo di funtori, è una funzione che assegna a ogni oggetto c di C una freccia $\tau c : Sc \longrightarrow Tc$ in modo che per ogni freccia $f : c \longrightarrow c'$ il diagramma

$$\begin{array}{ccc} Sc & \xrightarrow{\tau c} & Tc \\ sf \downarrow & & \downarrow \tau f \\ S c' & \xrightarrow{\tau c'} & T c' \end{array}$$

commuti.

Se ogni τc è invertibile si ha una equivalenza naturale, o un isomorfismo naturale. Un esempio è il seguente, nel confronto tra la categoria **Ford** degli ordinali finiti, ovvero dei numeri naturali (si ricordi che $n = \{0, 1, \dots, n-1\}$) con quella degli insiemi finiti **Fset**. Siccome ogni ordinale è un insieme, l'inclusione S è un funtore **Ford** \longrightarrow **Fset**. A ogni insieme finito X si può associare $\#X$ il numero di elementi di X , e si può scegliere una biiezione θ_x tra X e $\#X$.

A ogni funzione $f : X \longrightarrow Y$ tra insiemi finiti si può quindi associare una corrispondente funzione $\#f : \#X \longrightarrow \#Y$ con $\#f = \theta_y f(\theta_x)^{-1}$; il diagramma

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{\theta_x} & \#X \\ f \downarrow & & \downarrow \#f \\ Y & \xrightarrow{\theta_y} & \#Y \end{array}$$

commuta e $\#$ è un funtore. Se X è un ordinale finito, si può prendere come θ_x l'identità, in modo che $\# \circ S$ è il funtore identico I_{Ford} in **Ford**. Viceversa $S \circ \#$ non è il funtore identico su **Fset**. Tuttavia il diagramma di sopra mostra che $\theta : I_{\text{Fset}} \longrightarrow S \circ \#$ è un isomorfismo naturale.

In una tale situazione si dice che $\#$ e S stabiliscono un'equivalenza di categorie, che come nell'esempio possono essere molto diverse in grandezza.

4.5 Teorie algebriche

Vediamo ora come si presentano le teorie algebriche in contesto categoriale. Le teorie algebriche studiano di fatto proprietà di operazioni, espresse dagli assiomi, quasi sempre in forma equazionale. Si pensa di solito che gli assiomi parlino degli elementi di una struttura, ma in realtà parlano delle operazioni; è stato il rendersi conto di questo fatto,

e che le proprietà delle operazioni sono le stesse in diverse situazioni dove gli elementi non hanno nulla a che vedere gli uni con gli altri, che ha permesso di elaborare i concetti algebrici. Queste teorie sono quindi adatte a una presentazione categoriale. Le uguaglianze si traducono nella commutatività di diagrammi.

Un monoide ad esempio, cioè una struttura con un'operazione binaria associativa e un elemento neutro, si può presentare come prima approssimazione come un insieme con due funzioni

$$\circ : M \times M \longrightarrow M \quad \eta : 1 \longrightarrow M$$

dove insiemisticamente $1 = \{0\}$ e $\eta(0)$ è l'elemento neutro e (ma 1 è usato anche per la funzione identica, senza indice quando è ovvio). $\eta(0)$ è la funzione che sceglie un elemento speciale di M .

L'associatività si può esprimere in via intermedia con il disegno

$$\begin{array}{ccc} \langle x, y, z \rangle & \xrightarrow{1 \times \circ} & \langle x, y \circ z \rangle \\ \circ \times 1 \downarrow & & \downarrow \circ \\ \langle x \circ y, z \rangle & \xrightarrow{\circ} & (x \circ y) \circ z = x \circ (y \circ z) \end{array}$$

che non è un vero diagramma categoriale, essendo riferito agli elementi.

Ma basta ora, per caratterizzare un monoide in termini di morfismi, chiedere che il seguente diagramma commuti:

$$\begin{array}{ccc} M \times M \times M & \xrightarrow{1 \times \circ} & M \times M \\ \circ \times 1 \downarrow & & \downarrow \circ \\ M \times M & \xrightarrow{\circ} & M \end{array}$$

così come il seguente per l'elemento neutro

$$\begin{array}{ccccc} 1 \times M & \xrightarrow{\eta \times 1} & M \times M & \xleftarrow{1 \times \eta} & M \times 1 \\ & \searrow \lambda & \downarrow \circ & \swarrow \rho & \\ & & M & & \end{array}$$

dove λ e ρ sono le ovvie biiezioni.

Per avere un gruppo allora, un gruppo essendo un monoide con inverso, basta aggiungere la richiesta di una funzione $\zeta : M \longrightarrow M$ tale che il seguente diagramma commuti (dove δ è la diagonale e $M \longrightarrow 1$ è l'unico morfismo di un insieme su un singoletto):

$$\begin{array}{ccccc} M & \xrightarrow{\delta} & M \times M & \xrightarrow{1 \times \zeta} & M \times M \\ \downarrow & & & & \downarrow \circ \\ 1 & \xrightarrow{\eta} & & & M \end{array}$$

In una impostazione rigorosamente categoriale non ci si limita ovviamente a proporre i diagrammi di sopra come abbreviazioni: ci si mette in una categoria con opportune proprietà di chiusura, e in essa M è un oggetto della categoria, e le frecce sono morfismi. Questa definizione quindi ne condensa molte, al variare della categoria: se siamo nella categoria degli spazi topologici gli stessi diagrammi definiscono un gruppo topologico.

Questa circostanza è importante perché in matematica di solito si studiano strutture miste; ad esempio se si ha un'operazione, e un modo di misurare la distanza, ci si chiede se argomenti vicini hanno valori vicini: se due numeri sono vicini, i loro quadrati quanto sono vicini? si considera cioè la continuità delle funzioni, e la struttura è algebrica e topologica insieme.

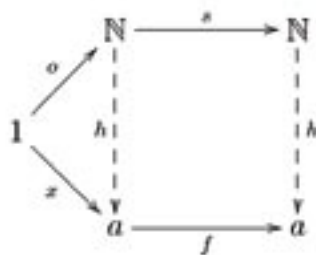
Se gli oggetti M sono strutture, l'aggiunta di \circ arricchisce la struttura stessa: si osservi ad esempio che un monoide nella categoria dei gruppi abeliani è un anello¹²: l'operazione \circ del monoide è la moltiplicazione, che a differenza dell'addizione, non ha (sempre) inverso; l'addizione è implicita nel fatto che siamo nella categoria dei gruppi abeliani, quindi M è già dotato di suo di un'operazione che chiamiamo addizione.

5. La fondazione categoriale

Anche i numeri naturali possono essere caratterizzati in termini diagrammatici. Anche i numeri naturali possono essere caratterizzati in termini diagrammatici. L'oggetto «numeri naturali» è presentato, in categorie con opportune proprietà di chiusura, come un oggetto N con una coppia di morfismi

$$1 \xrightarrow{o} N \xrightarrow{s} N$$

tale che per ogni inserire i simboli seguenti ma meglio allineati $1 \xrightarrow{x} a \xrightarrow{f} a$ esiste un unico h per cui



In questo diagramma sono condensate due proprietà sostanziali dei numeri naturali. Una è la minimalità di N tra i sistemi semplicemente infiniti (secondo la definizione di Dedekind). L'altra è il principio di ricorsione, dimostrato sempre da Dedekind per le funzioni ricorsive primitive (che poi si estende alle ricorsive). Queste due proprietà risultano equivalenti, come si sapeva già dimostrare, per il semplice fatto che sono espresse dallo stesso diagramma.

Sulla base di situazioni di questo tipo i sostenitori delle categorie hanno iniziato a vederla come una teoria fondazionale nel senso tradizionale, una teoria a cui tutte le altre possono ricondursi.

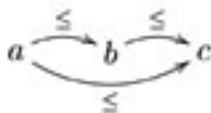
Addirittura si può cercare di definire in esse tutti gli strumenti del pensiero logico. L'esempio della definizione di unione può far immaginare come anche gli operatori logici possano essere concepiti in termini categoriali. La definizione del prodotto ad esempio dà la congiunzione in una categoria nella quale gli oggetti siano le proposizioni e i morfismi le deduzioni.

I categoristi vedono in questo la prosecuzione del processo che nel corso dell'Ottocento ha portato a rendere centrale in matematica il concetto di funzione, ma che sarebbe stato deviato verso una presentazione statica dalla versione insiemistica delle funzioni, e dalla prevalenza di questo linguaggio. Un esempio di come una versione statica può essere sostituita da una dinamica è la definizione di preordine. Insiemeisticamente, un preordine è un insieme M con una relazione $\leq \subseteq M \times M$ che sia riflessiva e transitiva.

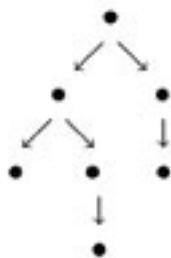
Dal punto di vista categorico, il preordine $\langle M, \leq \rangle$ è esso stesso una categoria con M come insieme degli oggetti e tale che per ogni coppia a e b di oggetti $\text{hom}(a, b)$ non è vuoto e ha un solo morfismo se e solo se $a \leq b$.



Le identità esistono per la proprietà riflessiva. La composizione esiste per la proprietà transitiva:



La soluzione proposta per trasformare un preordine in una categoria non sorprende chi è familiare con le strutture degli alberi. Un albero è in effetti un preordine, che si suole rappresentare in questo modo



In questo esempio particolare finito ogni nodo a ha al più due successori immediati, cioè elementi b tali che $a \leq b$ e per nessun c diverso da a e b vale $a \leq c \leq b$; se b è un successore immediato di a si usa la rappresentazione $a \rightarrow b$; c è una sola radice, vale a dire un elemento che non ha predecessori, e ci sono foglie, elementi senza successori. La crescita verso il basso è una consuetudine convenzionale consolidata.

Un funtore covariante tra due preordini corrisponde ad una funzione monotona, che conserva l'ordine.

6. Da dove incominciare

Alla domanda se si debba incominciare dagli insiemi o dalle categorie rispondiamo distinguendo: per fare matematica, da nessuno dei due, a meno che non si lavori proprio in una delle due teorie. Per una fondazione della matematica, da una qualunque, a seconda delle preferenze. Per l'insegnamento, la risposta più ragionevole è ancora: da nessuno dei due.

I concetti matematici nascono e vivono in modo autonomo e indipendente (finché non si scoprono fecondi e inaspettati collegamenti) a seconda degli atti di matematizzazione che li generano, delle intuizioni e degli usi che li guidano. Cercare di ridurli a pochi concetti, o a uno solo, al di là dei collegamenti che sono scoperti nella ricerca e che si rivelano utili e significativi, può essere una forzatura.

Le frecce sono molto usate e giustamente come ausilio didattico, questo forse può far nascere equivoci sull'importanza didattica delle categorie; ma si presti attenzione che nello spirito categoriale ogni freccia sta per una funzione, non per l'azione su un elemento, mentre questa è la rappresentazione utile nell'introduzione del concetto di funzione.

Non sembra plausibile che la definizione di monomorfismo come di un morfismo semplificabile a sinistra sia più comprensibile e utile della definizione di funzione iniettiva con l'azione sugli elementi, dove si vede che due frecce non convergono mai a colpire lo stesso elemento (meglio la rappresentazione delle non iniettive, con il controesempio). Tuttavia la considerazione esterna aiuta nel processo di astrazione, quando è maturo.

Vale per le categorie quello che si è detto per l'insiemistica; è bene fare tesoro dei suggerimenti utili, ma si eviti quando non è necessario di reificarle in una teoria, che tra l'altro è dubbio quale sia per i suoi stessi cultori.

NOTE

¹ Si veda [2].

² Si veda [1].

³ Nelle critiche filosofiche al riduzionismo in genere, in vari campi, si trascura di solito questo aspetto.

⁴ Si veda [3].

⁵ Ivi.

⁶ Più avanti faremo qualche commento aggiuntivo.

⁷ Si veda [3].

⁸ Poi, nella foga fondazionale, si cerca di dare un senso anche alla considerazione della categoria delle categorie.

⁹ Si veda [3].

¹⁰ Ivi.

¹¹ Nella categoria degli insiemi, questa diventa una definizione alternativa esterna dell'insieme vuoto. Un oggetto terminale 1 è un oggetto tale che per ogni oggetto X esiste un solo morfismo $X \longrightarrow 1$; nella categoria degli insiemi i singoletti $\{x\}$ sono terminali.

¹² Il tipico anello è Z .

BIBLIOGRAFIA

- [1] Lolli, G., *Dagli insiemi ai numeri*, Bollati Boringhieri, Torino 1994.
- [2] Lolli, G., *Da Euclide a Gödel*, Il Mulino, Bologna 2004.
- [3] S. Mac Lane, *Categories for the Working Mathematician*, Springer, New York 1971.

L'IMPOSTAZIONE CATEGORIALE DELLA MATEMATICA*

ALBERTO PERUZZI

Dipartimento di Filosofia, Università di Firenze

1. Considerazioni preliminari

Nel Novecento c'è stata una crescita, senza pari nella storia, di nuovi settori dell'indagine scientifica. A questa crescita si è accompagnato un corrispondente incremento di curricoli formativi sempre più specializzati. Al contempo, il Novecento ha visto nascere e svilupparsi straordinari progetti di unificazione del sapere. L'esigenza di dar conto di fatti anche molto particolari, ben *all'interno* di un ambito di ricerca, può far avvertire la necessità di un più nitido assetto dei fondamenti teorici; e, quando ci si impegna in questo compito, il lavoro di ricerca conduce non di rado a sentire l'esigenza di un linguaggio in grado di esprimere *relazioni sistematiche* fra le conoscenze relative all'ambito in questione e quelle relative ad altri ambiti della stessa disciplina. Si creano allora le condizioni per un tentativo di unificazione del sapere, che può propagarsi in ambiti inizialmente non intesi e poi in discipline diverse.

Ciò che contraddistingue alcuni dei principali progetti di unificazione coltivati nella scienza del Novecento è il fatto che essi hanno dato alla riflessione (meta-teorica) sui fondamenti di una disciplina uno status rigoroso e ne hanno fatto un oggetto di studio alla pari degli oggetti concretamente indagati nella disciplina stessa. Per esempio, in fisica si studiano i principi d'invarianza delle leggi fisiche. Accanto ai progetti di unificazione che non hanno ancora avuto un chiaro esito o che sono stati abbandonati, ci sono quelli che hanno avuto un successo tale da farne un elemento portante della nostra attuale immagine del mondo, producendo significative trasformazioni anche nella didattica di numerose discipline scientifiche.

In biologia, la scoperta del DNA ha permesso di fornire una descrizione unitaria dei mattoni fondamentali della vita, a partire dai quali le differenze tra le varie specie sono riconducibili a sequenze diverse in uno stesso codice. In fisica, a partire dalla teoria relativistica della gravità e dalla meccanica quantistica, si è avviata la ricerca di una grande unificazione che, determinando i principi di correlazione fra le quattro forze fondamentali, integri in un quadro coerente microfisica e cosmologia. In linguistica, si è giunti a una teoria generale delle grammatiche come algoritmi di produzione di frasi, in grado di identificare la struttura di ogni lingua naturale.

In matematica, i vari ambiti tradizionali (teoria dei numeri, algebra, analisi e geometria) hanno trovato espressione unitaria prima nel linguaggio della teoria degli insiemi e poi nel linguaggio della teoria delle categorie. La matematica è strumento

essenziale della fisica; la fisica fa da sfondo alla chimica; e la biologia molecolare odierna s'impenna sulla chimica organica; ma la matematica è anche strumento essenziale della teoria linguistica. Il modo in cui la matematica trova la sua unificazione non è privo di conseguenze sulle applicazioni che la matematica ha in settori già consolidati delle scienze o in settori di frontiera. Per esempio, le basi dell'informatica non sono indifferenti alla scelta di un'impostazione insiemistica o categoriale.

Ci sono subito due considerazioni da fare, in corrispondenza con due diffusi fraintendimenti. Uno riguarda la natura della matematica e un altro la funzione che in essa svolgono teorie come quella degli insiemi e delle categorie.

Quanto al primo, si sente dire spesso che la matematica è un linguaggio, che è poi il linguaggio canonico della scienza. Il che non è semplicemente falso: è assurdo. Un linguaggio non fornisce di per sé conoscenze, ma soltanto un mezzo per esprimerle. Dunque non esisterebbe un sapere matematico, mentre invece esiste. E si articola in teoremi su procedure di calcolo, strutture algebriche, spazi ... Chi suppone, altresì, che la matematica esprima un sapere esclusivamente su linguaggi simbolici, introduce un uso improprio (che direi metafisico) del termine "linguaggio" oppure confonde numeri, derivate, gruppi e superfici con i simboli che usiamo per descriverli. Infine, non va dimenticato che esistono teorie matematiche alternative: ci sono geometrie diverse, formulabili nello stesso linguaggio, che si diversificano per i teoremi in esse dimostrabili; esiste un'analisi standard (con proprietà archimedeo del campo dei reali, definizione ε - δ di continuità, ecc.) e una non-standard, ci sono varie teorie degli insiemi e perfino logiche diverse, che concordano su alcuni risultati e divergono su altri. Per la maggior parte degli usi pratici, non è necessario tenere conto di queste differenze, ma la molteplicità di sistemi cui esse conducono è, oltre che una delle caratteristiche primarie della matematica del Novecento, un oggetto di studio della matematica stessa.

Il secondo fraintendimento è dovuto all'idea che la teoria degli insiemi fornisca, se non *il* linguaggio, *l'unico* quadro teorico in cui formulare, con il rigore richiesto, le nozioni e i principi basilari delle varie branche della matematica. Ora, anche a prescindere dal fatto già ricordato che ci sono più teorie degli insiemi (e, visto il loro sviluppo, si può ormai considerare 'la' teoria degli insiemi come una vera e propria branca fra le altre della matematica), il linguaggio insiemistico e i principi in esso esprimibili rappresentano una scelta tutt'altro che scontata. Il loro impiego corrente nella didattica, a partire dall'*insiemistica*, oltre a non tener conto delle reali motivazioni che giustificano l'introduzione di questo linguaggio, lascia supporre che non ci sia altro modo di presentare le nozioni fondamentali della matematica. Il che è falso, perché la teoria delle categorie offre appunto un modo diverso e non meno efficace, anche se sul piano didattico l'opportunità di impiegare l'una o l'altra può dipendere dall'argomento trattato. (Passando sotto silenzio le motivazioni, tanto varrebbe continuare a usare la nozione di insieme come intuitiva e tornare a insegnare analisi e geometria come in passato.)

È vero che anche in matematica, così come in fisica, biologia e linguistica, per

limitarci alle aree su menzionate, ci sono molte cose che si possono dire sensatamente, e sul piano didattico forse in maniera più efficiente, senza chiamare in causa i principi primi, cioè, i fondamenti teorici a partire dei quali ricostruiamo, nella maniera più generale, le conoscenze circa la nostra ordinaria esperienza di fatti (fenomeni, dati, sistemi) fisici, biologici, linguistici ... e appunto matematici. Ciononostante, già in relazione a problemi matematici elementari si può trarre vantaggio orientando l'attenzione su nozioni e procedure ricorrenti da un problema all'altro, se si dispone di un quadro teorico di riferimento che unisca flessibilità, facilità d'uso in nuovi casi (trasferibilità) e profondità concettuale.

La teoria degli insiemi e la teoria delle categorie sono due straordinarie conquiste del pensiero umano. Entrambe combinano semplicità dei concetti di base e potenza dei loro sviluppi, entrambe offrono un linguaggio *universale* e un corrispondente quadro teorico di riferimento, entrambe si propongono di unificare tutta la matematica; hanno però principi, motivazioni e modalità costruttive alquanto diversi. Anche se qui non è possibile entrare nel dettaglio delle loro differenze, né soppesare i rispettivi vantaggi e svantaggi, è opportuno richiamare l'attenzione su alcuni aspetti generali del confronto, perché la stessa didattica della matematica ne è toccata – e in maniera sostanziale.

Purtroppo, l'esistenza della teoria delle categorie non è molto nota e, comunque, si tende ad assimilarla a una specie di algebra generalizzata la cui utilità resta appunto confinata all'algebra. In tal modo diventa arduo capire come la teoria delle categorie permetta allo stesso tempo di introdurre una nozione più generale di insieme, reimpostare i principi della logica, fondare l'analisi, descrivere un concetto di spazio di cui quello accessibile mediante la topologia degli insiemi di punti è solo un caso particolare, e fornire una cornice appropriata per la semantica dei linguaggi di programmazione.

Allorché si riduce il confronto fra insiemi e categorie a quello fra linguaggi alternativi, si cade nel primo fraintendimento su considerato. L'impostazione categoriale non porta agli stessi risultati ottenibili servendosi della teoria degli insiemi: è falso che tutto quanto è esprimibile e dimostrabile mediante metodi categoriali lo sia già nel quadro insiemistico standard.

C'è un ultimo preliminare da rendere esplicito – ed è di carattere propriamente "pedagogico". Tanto la teoria degli insiemi quanto la teoria delle categorie offrono una sistemazione generale del pensiero matematico in un disegno unitario, ma questo non implica che si debbano introdurre i giovani alla matematica *partendo* dai fondamenti che l'una o l'altra teoria fornisce alla matematica nel suo complesso. Ciò, per il semplice motivo che, al fine di apprezzare il significato del rispettivo disegno fondazionale, occorre già sapere un bel po' di matematica – è un'osservazione di Lolli che condivido pienamente e alla quale mi limito ad aggiungere che proprio nell'impostare problemi concreti di algebra e di geometria si capisce il senso ... e la bellezza dei principi.

Tuttavia, nessun linguaggio nasce sotto vuoto; e usarlo *come se* fosse sotto vuoto produce più danni che benefici. Questo è specialmente riconoscibile se si tiene conto che la matematica è da sempre il frutto di sistematiche correlazioni fra entità e costrutti

di tipo diverso: numeri, figure, algoritmi, simmetrie ... È proprio a tale proposito che la teoria delle categorie mostra un significativo vantaggio sulla teoria degli insiemi, perché orienta a pensare in termini di rapporti dinamici fra strutture invece che statici, in termini uniformi e invarianti invece che caso per caso, e a recuperare, per quanto ciò di primo acchito possa suscitare incredulità, le capacità intuitive di organizzazione razionale dei pensieri, attraverso la valorizzazione dell'aspetto diagrammatico e procedurale.

Della teoria degli insiemi, in versione intuitiva o in versione assiomatica, si possono trovare molte, e ben fatte, esposizioni in italiano, unitamente a testi che ora ne ricostruiscono lo sviluppo storico, ora ne affrontano la problematica filosofica, ora ne discutono le modalità di presentazione sul piano didattico. Al contrario, sulla teoria delle categorie ci sono pochissime pubblicazioni, tanto meno accessibili a un pubblico di non specialisti. Fra quelle esistenti, la più elementare è costituita da [4], che però non fornisce un'introduzione storica; limitatamente all'algebra, l'impiego sistematico delle categorie è documentato in [5]; mentre l'unica esposizione che ricostruisce alcuni momenti dello sviluppo storico della teoria è fornita da [6], ma è orientata a metterne in evidenza gli aspetti di rilievo per la logica. Cercherò dunque di dare un'idea, in forma estremamente succinta, delle motivazioni che stanno all'origine della teoria delle categorie (§2), passando poi a indicarne i concetti centrali e a menzionare alcuni risultati significativi (§3); accennerò infine ai problemi concernenti il rapporto tra prospettiva categoriale e insiemistica (§4).

2. Motivazioni e sviluppi

Nel 1945 Samuel Eilenberg e Saunders Mac Lane pubblicarono un articolo che è considerato il lavoro inaugurale della teoria delle categorie. Al concetto di categoria si era giunti come al distillato di una serie di passaggi da nozioni complesse a ciò che era richiesto per definirle in modo corretto: dalla nozione di trasformazione naturale a quella di funtore e da questa, infine, alla nozione di categoria.

Consideriamo uno spazio vettoriale V di dimensione finita sul campo dei reali \mathbf{R} . L'insieme V^* delle applicazioni lineari a valori in \mathbf{R} è anch'esso uno spazio vettoriale, con $(f \oplus g)(v) = f(v) + g(v)$ e $(\lambda f)(v) = \lambda \cdot f(v)$ per ogni vettore v di V e ogni scalare λ in \mathbf{R} . V^* si chiama *spazio duale* di V . Dato che la dimensione di V è finita, V^* risulta isomorfo a V , ma non c'è alcun modo 'naturale' (canonico) di definire questo isomorfismo, cioè un modo che sia indipendente dalla base. Tuttavia, per il duale di V^* , cioè il *doppio duale* di V , questo modo c'è. Per definire l'isomorfismo (canonico) $V \rightarrow V^{**}$ basta associare a ogni $v \in V$ l'applicazione $v^\sim: V^* \rightarrow \mathbf{R}$ t. c. $v^\sim(f) = f(v)$ che è biettiva e lineare; così facendo, si trasforma l'applicazione lineare identica su V ($v \mapsto v$) nell'applicazione che associa a V il doppio duale V^{**} – e ciò in modo naturale.

Ma come si può dire, in generale, cos'è una trasformazione «naturale»? Per rispondere bisogna prima aver precisato alcuni concetti implicitamente usati. Vediamo quali, attraverso un esempio paradigmatico. Infatti, all'origine della teoria c'era anche

un motivo più sostanzioso, dovuto all'esigenza di descrivere la sistematica correlazione fra spazi e gruppi che è al centro della topologia algebrica. Questa correlazione si precisa in vari modi, ma forse quello più intuitivo passa per l'associazione a ogni spazio del suo gruppo fondamentale di omotopia.

Dato uno spazio X , un cammino in X è una funzione continua $f: I \rightarrow X$, ove I è l'intervallo chiuso $[0,1] \subset \mathbf{R}$. Il punto iniziale del cammino sarà il punto a di X tale che $a = f(0)$ e quello finale sarà il punto b di X tale che $b = f(1)$. Quando $f(0)=f(1)$, il cammino è chiuso. Due cammini f e g si possono comporre quando il punto finale del primo è il punto iniziale del secondo. Il cammino nullo è quello costante. Quando due cammini f, f' che per semplicità abbiano lo stesso punto iniziale $f(0) = f'(0)$ e finale $f(1) = f'(1)$ sono deformabili con continuità l'uno nell'altro si dicono omotopi. Quella di omotopia è una relazione di equivalenza e ripartisce appunto i cammini in classi di equivalenza. Supponiamo che lo spazio X sia connesso, cioè, non possa essere diviso in due aperti non vuoti disgiunti U, V tali che $U \cup V = X$. Allora, una volta fissato un arbitrario punto base x_0 in X l'insieme dei cammini chiusi su x_0 , ciascuno dei quali è identificato a meno di tale equivalenza, forma un gruppo che non dipende da x_0 e che si chiama (primo) gruppo (fondamentale) di omotopia $\pi_1(X)$. Per esempio, il gruppo di omotopia di una sfera è diverso da quello di un toro.

Ora si tratta di mettere insieme i fatti seguenti: spazi omeomorfi $X \cong Y$ hanno gruppi di omotopia isomorfi $\pi_1(X) \cong \pi_1(Y)$; ogni funzione continua fra spazi $f: X \rightarrow Y$ induce un omomorfismo f^* di gruppi di omotopia; se $g: Y \rightarrow Z$ è un'altra funzione continua, la composta $gf: X \rightarrow Z$ è continua e $(gf)^* = (g^*)(f^*)^*$; la composizione di funzioni continue è associativa e tale è pure quella di omomorfismi di gruppi. Nel caso che $Z = X$, $g = f^{-1}$ e biiettiva, si ha $X \cong Y$ e $(f^{-1})^*(f^*)^* = (f^{-1})^*(f^*)^*$ è l'identità su $\pi_1(X)$, mentre $(f^*)^*(f^{-1})^*$ è l'identità su $\pi_1(Y)$, ovvero f^* è un isomorfismo di gruppi.

Dobbiamo trovare un nome alla corrispondenza generale $'^*$ tra spazi e gruppi. Per un oggetto X arbitrario di un dato tipo, indicheremo l'identità su X con 1_X . Diremo che ogni corrispondenza F tra oggetti di un tipo e oggetti di un altro che conservi l'identità, cioè $F(1_X) = 1_{F(X)}$ e che conservi la composizione $F(gf) = F(g)F(f)$ è un *funtore* (covariante). Ma come è già chiaro dall'esempio, non stiamo considerando soltanto due tipi di 'cose' – tutti gli oggetti di un tipo (spazi) e tutti quelli di un altro (gruppi) –, ma anche due modi di correlare tra loro gli oggetti: il modo di correlare tra loro oggetti del primo tipo e il modo di correlare tra loro quelli del secondo tipo, dunque non solo spazi e gruppi, ma anche funzioni continue tra spazi e omomorfismi tra gruppi. Allora, che cosa devono essere queste due totalità che un funtore collega? Devono essere ... *categorie*.

Una categoria \mathbf{C} è costituita da *oggetti* A, B, C, \dots , e da *morfismi* f, g, h, \dots tra oggetti, ove ciascun morfismo $f: A \rightarrow B$ ha A come *dominio* e B come *codominio* – si scrive solitamente $A \xrightarrow{f} B$ e, dati $A \xrightarrow{f} B$ e $B \xrightarrow{g} C$, è definito un morfismo $A \xrightarrow{g \circ f} C$ che è la composizione di f e g (il simbolo \circ è solitamente omissivo). Inoltre, per ogni oggetto X c'è un morfismo *identità* (sull'oggetto dato), che come sopra si scrive

1_X , ed è caratterizzato dal fatto che, per qualunque f da un arbitrario Y a X , $1_X \circ f = f = f \circ 1_Y$. Infine, la composizione gode della proprietà associativa, cioè $h(gf) = (hg)f$, purché le varie composizioni siano definite.

La categoria **Set** degli insiemi è formata da oggetti che sono, appunto, gli insiemi e da morfismi che sono le usuali funzioni: l'identità è la funzione che associa a ogni elemento a di un insieme X lo stesso a , $1_X(a) = a$ e le funzioni si compongono in modo ovvio. La categoria **Top** degli spazi topologici ha come oggetti spazi e come morfismi funzioni continue. La categoria **Grp** dei gruppi ha come oggetti i gruppi e come morfismi gli 'omomorfismi'. Un altro esempio è fornito dalla categoria degli ordini lineari in cui un oggetto è un qualsiasi ordine lineare di punti e un generico morfismo f da un ordine lineare A a un altro B è una corrispondenza univoca da A a B che conserva la relazione di "venire prima di" tra punti: se p e q sono punti di X e $p \leq q$ in A allora $f(p) \leq f(q)$ in B . Si noti che \leq non è una funzione. La categoria **Prop** delle proposizioni ha come oggetti proposizioni ϕ, ψ, \dots , e come morfismi $\phi \rightarrow \psi$ le prove di ψ a partire da ϕ .

Date due categorie **C** e **D**, la totalità dei funtori da **C** a **D** forma una categoria, prendendo come morfismi $\tau: \mathbf{F} \rightarrow \mathbf{G}$ tra due funtori da **C** a **D** le *trasformazioni naturali*, definite in modo che indipendentemente da quali siano gli oggetti X, Y di **C** e i morfismi h tra essi, il diagramma seguente risulti commutativo, cioè: $G(h) \circ \tau_X = \tau_Y \circ F(h)$.

$$\begin{array}{ccc}
 \mathbf{C} & & \mathbf{D} \\
 \boxed{\begin{array}{c} X \\ \downarrow h \\ Y \end{array}} & \begin{array}{ccc} F(X) & \xrightarrow{\tau_X} & G(X) \\ F(h) \downarrow & & \downarrow G(h) \\ F(Y) & \xrightarrow{\tau_Y} & G(Y) \end{array} &
 \end{array}$$

Se consideriamo le categorie come oggetti e i funtori come morfismi tra essi, otteniamo la categoria delle categorie: **Cat**. Come l'insieme V di tutti gli insiemi dava luogo a un paradosso, perché (Teorema di Cantor) l'insieme potenza $\mathcal{P}(V)$ dovrebbe essere più grande di V , anche in questo caso sorgono problemi che si evitano limitando la 'taglia' delle categorie che possono essere oggetti in **Cat**.

Tutte queste definizioni non possono dare un'idea delle costruzioni categoriali che, con elegante uniformità, consentono di caratterizzare in maniera appropriata prodotti, quozienti e vari altri modi di ottenere nuove strutture, algebriche e topologiche, a partire da strutture date. Nondimeno, è già possibile rendersi conto che il quadro risultante è guidato dalla preoccupazione di fornire un linguaggio e una teoria in grado

di cogliere le proprietà che legano fra loro i vari tipi di nozioni matematiche, con l'intento di mettere in risalto un'architettura modulare il più possibile aderente a ciò che i matematici fanno, quando costruiscono strutture per poi analizzarne i componenti (si pensi alla fattorizzazione di un gruppo in sottogruppi) e indagarne le proprietà mappando strutture di un tipo in quelle di un altro (si pensi alla misurazione).

Per più di un decennio la teoria delle categorie restò confinata all'algebra e alle sue diramazioni. Alla fine degli anni cinquanta, si verificarono due scoperte decisive. Da un lato, fu introdotto un concetto che poi è risultato quello centrale per lo sviluppo della teoria delle categorie e per le sue applicazioni alla logica e all'informatica teorica: il concetto di *aggiunzione* fra funtori. Dall'altro, il matematico francese Alexandre Grothendieck si servì delle categorie per risolvere una serie di problemi di geometria algebrica e, nel fare questo, introdusse un altro concetto chiave: il concetto di *topos*, come spazio generalizzato, non più dipendente dalla nozione di punto, ma dato in termini di ricoprimenti sugli oggetti di una opportuna categoria (*sito*).

Nel corso degli anni sessanta, il matematico americano Bill Lawvere riuscì a capire come si potevano descrivere in linguaggio puramente categoriale, senza fare uso del concetto di appartenenza (\in) le proprietà degli insiemi; insieme a Myles Tierney introdusse nel 1971 il concetto di topos elementare e riuscì a mostrare come tutti i concetti della logica si potevano ottenere in termini di funtori aggiunti. (Insieme al concetto di aggiunzione anche quello di topos elementare sarà definito nel §3.) L'idea stessa di fondamenti della matematica ne veniva profondamente modificata: gli assiomi posti come principi fondamentali devono corrispondere ai principi universali che guidano la pratica matematica nei suoi più diversi ambiti, e non semplicemente un insieme di principi grazie ai quali si possa garantire l'esistenza di opportuni insiemi (assioma dell'infinito, assioma di scelta). Si può dire che il periodo dal 1958 al 1971 è stato il periodo eroico della teoria delle categorie, cui è seguito un periodo di espansione verso nuovi settori di ricerca, di sempre più accurata formulazione, nonché di sistemazione organica dei risultati conseguiti. Quello che sembrava un *nonsense* astratto, in cui non si capisce di che cosa si parla e in cui non si vede quali teoremi dimostrare che non si dimostrassero già, è diventato un potente strumento euristico che ha permesso di ottenere risultati non solo di notevole importanza ma neppure lontanamente immaginabili prima del suo impiego.

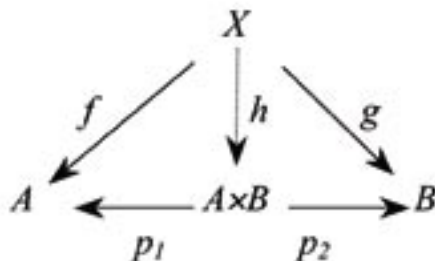
3. Concetti universali

Tanto per cominciare, una nozione basilare della matematica moderna, che la teoria delle categorie consente di definire in modo *indipendente dalla particolare categoria considerata*, è quella di *isomorfismo*: due oggetti A e B di una categoria sono isomorfi quando esiste un morfismo $f: A \rightarrow B$ che sia invertibile, cioè per il quale c'è un $g: B \rightarrow A$ t. c. $gf = 1_A$ e $fg = 1_B$. Quindi $g = f^{-1}$ e $f = g^{-1}$.

Inoltre, tutte le nozioni insiemistiche sono riottenibili in forma puramente categoriale: per esempio, il fatto che una funzione f da un insieme A a un insieme B sia *iniettiva* si

esprime dicendo che, per ogni h, k da qualsiasi X ad A , $fh = fk$ implica $h = k$. Questa proprietà categoriale definisce un *monomorfismo*. L'inclusione di un sottoinsieme in un insieme è una particolare funzione iniettiva. In termini di monomorfismi si definisce in una categoria arbitraria \mathbf{C} il concetto di *sottoggetto*, come classe di equivalenza di monomorfismi: un monomorfismo $U \rightarrow A$ è equivalente a un altro $V \rightarrow A$ quando U e V sono isomorfi in \mathbf{C} . La nozione di sottoggetto è intrinseca, quella di sottoinsieme no. Per esempio, in \mathbf{Grp} i sottoggetti non sono meri sottoinsiemi ma sottogruppi, in \mathbf{Top} i sottoggetti devono essere sottospazi, quindi devono ereditare una topologia dallo spazio ambiente. La nozione duale di monomorfismo è quella di *epimorfismo*: per ogni h, k da A a un qualsiasi X , $hf = kf$ implica $h = k$. In \mathbf{Set} questa nozione coincide con quella di funzione suriettiva; in altre categorie non è così.

Passiamo alle modalità di costruzione di nuovi oggetti. Il concetto di prodotto cartesiano è usualmente definito facendo riferimento a coppie (n-ple) di elementi dei fattori, ma in linguaggio categoriale il prodotto può essere dato senza fare riferimento agli elementi e in modo tale da rendere la definizione indipendente dalla particolare categoria ambiente (si tratti del prodotto di gruppi o di uno spazio prodotto, per esempio). Una categoria \mathbf{C} ha prodotti se per ogni due oggetti A, B esiste un oggetto $A \times B$ con due morfismi 'di proiezione' $p_1: A \times B \rightarrow A$ e $p_2: A \times B \rightarrow B$, tali che per ogni oggetto X e ogni $f: X \rightarrow A, g: X \rightarrow B$, esiste un unico $h: X \rightarrow A \times B$ che rende *commutativo* il seguente diagramma, cioè $p_1 h = f$ e $p_2 h = g$.



L'oggetto così definito è unico a meno di isomorfismi: in effetti, $A \times B \cong B \times A$. Nel caso di \mathbf{Grp} questa costruzione universale dà il prodotto di gruppi e nel caso di \mathbf{Top} dà lo spazio prodotto. Inoltre, se la categoria è un insieme parzialmente ordinato dall'inclusione, l'esistenza del prodotto di due oggetti esprime il fatto che esiste la loro intersezione; mentre nella categoria \mathbf{Prop} l'esistenza del prodotto così definito esprime le proprietà logiche che caratterizzano la congiunzione. Si noti che la *definizione* di prodotto su illustrata non sarebbe possibile nella teoria degli insiemi, ove i morfismi (cioè, le funzioni) sono introdotti come relazioni univoche – cioè le R tali che $R(x,y)$ e $R(x,z)$ implica $y = z$ –, perché le relazioni sono sottoinsiemi di un prodotto cartesiano, che dunque deve essere dato prima del concetto di funzione e non dopo.

In una categoria con prodotti, dati $f: A \rightarrow C$ e $g: B \rightarrow D$, risulta definito anche il morfismo prodotto $f \times g: A \times B \rightarrow C \times D$. La definizione di prodotto si riferisce a due oggetti, ma si estende facilmente a un arbitrario numero finito di oggetti: si può

dimostrare che $(A \times B) \times C \cong A \times (B \times C)$. Nel caso che questo numero finito sia zero, si ha come caso particolare il semplice fatto che esiste un oggetto 1 tale che per ogni X c'è uno e un solo morfismo $X \rightarrow 1$. Tale oggetto, che si chiama *oggetto terminale* di \mathbf{C} è unico a meno di isomorfismi; il morfismo unico $X \rightarrow 1$ si indica con $!_X$. Nella categoria degli spazi, 1 è lo spazio con un solo punto; in \mathbf{Grp} è il gruppo banale con il solo elemento neutro. In \mathbf{Set} è un qualsiasi singoletto $\{\bullet\}$. Dato che c'è una corrispondenza biunivoca fra A e i morfismi (funzioni) $\{\bullet\} \rightarrow A$, ciascuno di questi può essere pensato come un *elemento* di A .

Il duale della nozione di prodotto è quella di coprodotto (o somma) e si ottiene invertendo tutti i morfismi nella figura precedente – le proiezioni diventano iniezioni degli addendi nella somma. Nella categoria degli insiemi il coprodotto di due insiemi è la loro unione disgiunta (dunque questa viene prima, per ragioni strutturali, della semplice unione: gli elementi comuni non possono essere contati due volte). Il duale dell'oggetto terminale è l'oggetto *iniziale*: una categoria \mathbf{C} ha oggetto iniziale se esiste un oggetto 0 tale che esiste uno e un solo morfismo $0 \rightarrow X$, per ogni X in \mathbf{C} . In \mathbf{Grp} è di nuovo il gruppo banale, in \mathbf{Set} è ... l'insieme vuoto.

Fondamentali in matematica sono le categorie che oltre ad avere prodotti (finiti) sono *chiuse*, nel senso che la collezione dei morfismi da un oggetto A a un oggetto B è a sua volta un oggetto B^A ('spazio di funzioni' da A a B) che è individuato dalla seguente proprietà universale: per ogni $f: A \times B \rightarrow C$, esiste un unico morfismo $f^\wedge: B \rightarrow C^A$ che rende commutativo il diagramma seguente, ove il morfismo ev_{AC} non è altro che la valutazione in C di un morfismo f per un argomento in A . Cioè: $f = ev_{AC} \cdot (1_A \times f^\wedge)$.

$$\begin{array}{ccc}
 & A \times C^A & \\
 & \uparrow I_A \times f^\wedge & \searrow ev_{AC} \\
 A \times B & \xrightarrow{f} & C
 \end{array}$$

Le categorie che oltre ad avere prodotti soddisfano questa proprietà si dicono *cartesiane chiuse*. In informatica teorica, il passaggio da f a f^\wedge è di grande utilità perché serve a trasformare in parametri le variabili aggiuntive di una funzione di più argomenti (in figura solo due). Nel caso di un dominio X formato da procedure di calcolo che dovessero essere sempre applicabili l'una all'altra senza uscire dal dominio, bisognerebbe che $X^X \cong X$. Un tale X non può essere un insieme, perché l'unico insieme tale che le funzioni da X in X non siano più degli elementi di X è un singoletto. Esistono invece categorie non banali che permettono questa rappresentabilità interna delle procedure di calcolo.

Come ci si può immaginare, anche il modo in cui si dimostra qualcosa in teoria

delle categorie è un po' diverso da quello divenuto consueto con l'uso della teoria degli insiemi. In particolare, invece di sfruttare ragionamenti per induzione, si sfruttano le proprietà che contraddistinguono un oggetto a meno di isomorfismo e le costruzioni universali che sono possibili nella categoria data, espresse in forma diagrammatica, come nel caso del prodotto. Questa forma corrisponde alla priorità accordata a un linguaggio equazionale, che è appunto il tipo di linguaggio in cui si esprime al meglio la nostra conoscenza della natura.

I rapporti con la logica vanno ben oltre l'esempio della congiunzione. Anche gli altri connettivi sono definibili in forma diagrammatica e, soprattutto, le proprietà che definiscono i quantificatori (universale \forall ed esistenziale \exists) sono riottenibili mediante equazioni. A questo scopo è stato decisivo il concetto di aggiunzione, che in realtà è il concetto centrale di tutta quanta la teoria delle categorie. La nozione di prodotto e le altre che ho introdotto a partire da quelle di categoria e di funtore, fino a coprire tutte le costruzioni che ricorrono da una teoria matematica all'altra, sono infatti esprimibili come aggiunzioni. Vediamo allora come si definisce un'aggiunzione (un primo esempio fu identificato da Galois, con la 'corrispondenza' che reca il suo nome in teoria dei campi).

Un funtore $F: \mathbf{C} \longrightarrow \mathbf{D}$ si dice AGGIUNTO sinistro di un funtore $G: \mathbf{D} \longrightarrow \mathbf{C}$ quando c'è un isomorfismo ϕ tra $\{g: X \longrightarrow GY\}$ e $\{f: FX \longrightarrow Y\}$ che è *naturale*, nel senso che, per ogni $Fb: FX' \rightarrow FX$ e per ogni $Gk: GY \longrightarrow GY'$, la corrispondenza isomorfa si estende da quella tra g a f a quella da gGk a fFb . Se F è aggiunto sinistro di G , G è aggiunto destro di F . Ebbene, per quanto vi possa sembrare incredibile, anche tutte le nozioni logiche si possono descrivere come aggiunti; più in generale, situazioni di aggiunzione si ritrovano ogniqualvolta abbiamo a che fare con costruzioni di concetti che individuano strutture «universali».

Per esempio, ogni volta che si fissano i generatori di uno specifico tipo di struttura, la costruzione di una struttura libera sui dati generatori è un caso particolare di aggiunzione (un caso istruttivo è quello del gruppo libero). Si può infatti dimostrare che tutte le nozioni categoriali precedentemente introdotte (prodotti, coprodotti, ecc.) sono casi particolari di aggiunzione tra funtori. In più, i funtori aggiunti svolgono in logica una funzione decisiva quando si studiano i modelli di una teoria (cioè le strutture in cui la teoria può essere interpretata e in cui i suoi assiomi risultano veri) perché garantiscono la preservazione di formule che esprimono proprietà 'geometriche'.

Sempre per quanto riguarda la logica, l'impostazione categoriale ha anzi consentito di riprendere e sviluppare in modo nuovo la *teoria dei tipi*, con particolare riferimento ai suoi impieghi nell'informatica, ove un *tipo-di-dati* si presenta come un oggetto che può consistere a sua volta di procedure da un tipo-di-dati a un altro. Data una categoria di tipi-di-dati e una base di operazioni primitive «tipate» e alcuni «costruttori», si producono nuovi tipi e nuove operazioni, più complesse, tutte espresse da costruzioni categoriali. La semantica per i linguaggi di programmazione funzionale 'a oggetti' è essenzialmente fornita mediante categorie opportune, fornendo vantaggi analoghi

all'analisi dimensionale in fisica.

Per tornare agli ambiti classici della matematica, è possibile assiomatizzare l'aritmetica in termini puramente categoriali, senza far uso di \in e con un solo assioma invece dei cinque usuali nella formulazione di Dedekind-Peano, cfr. [4], ed è possibile costruire successivamente gli altri sistemi di numeri. Tuttavia, si scopre che il continuo dei numeri reali costruito in termini di successioni convergenti e il continuo costruito mediante sezioni di Dedekind non coincidono più come nella matematica classica. Quanto all'analisi, è possibile svilupparla recuperando un'idea originaria: quella secondo cui gli infinitesimi d sono 'elementi' nilpotenti $d^2=0$. Per un'introduzione particolarmente elegante e didatticamente efficace, che si sforza di ridurre al minimo l'apparato categoriale da cui è scaturita, si veda [1]. L'ambiente ideale in cui sviluppare l'analisi è fornito da un topos di tipo particolare, in cui tutte le funzioni risultano lisce, cioè infinitamente differenziabili e a fortiori continue. Con questi strumenti a disposizione, il programma di rifondare la dinamica in termini categoriali è stato avanzato da Lawvere ed è tuttora in corso di elaborazione.

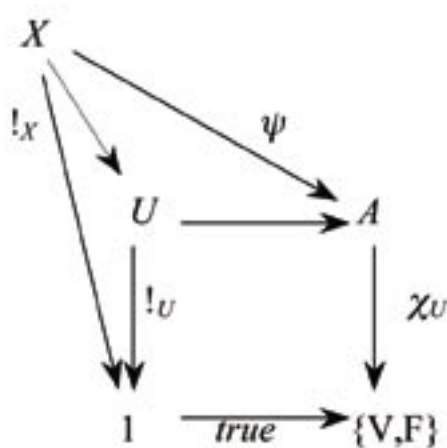
C'è un aspetto importante che contraddistingue alcune delle differenze tra i risultati ottenibili con la teoria delle categorie e quelli ottenibili con la teoria degli insiemi. Nel corso del Novecento sono stati proposti diversi tipi di matematica costruttiva, molti dei quali convergono sul rifiuto del principio logico del terzo escluso e quindi delle dimostrazioni per assurdo, ma anche di numerose definizioni date per distinzione dei casi. Uno dei principali orientamenti è stato quello che va sotto il nome di *matematica intuizionistica*. Le sue motivazioni sono state essenzialmente di tipo epistemico: non si può asserire l'esistenza di qualcosa che non si è in grado di costruire e non si può asserire di aver provato una disgiunzione 'o p o q ' se non si è in grado di provare p o di provare q .

Ora, la logica che risulta dalla struttura stessa di un topos è appunto intuizionistica, ma non per tali motivazioni, bensì per le proprietà categoriali che lo definiscono. La matematica classica, anche una volta riformulata categorialmente, diventa un caso limite di una matematica in cui in primo piano sono totalità di oggetti variabili (non rigidamente fissati una volta per tutte) e coesivi (non polverizzati nei loro elementi), su cui si ragiona in modo costruttivo. Senza sviluppare questo punto come meriterebbe, è opportuno notare che nell'impostazione categoriale, accanto al processo di ulteriore algebrizzazione che l'accompagna, un aspetto emergente è anche il recupero del ruolo del pensiero geometrico, che torna finalmente a occupare una posizione centrale e acquista priorità anche nei confronti della stessa logica, cfr. [7].

Per arrivare alla formulazione categoriale del concetto astratto di insieme, dobbiamo prima introdurre un ultimo concetto. Quando si considerano insiemi astratti, una loro proprietà fondamentale è che, per ciascuno di essi, diciamo A , si può formare l'insieme delle parti (o sottoinsiemi) $\mathcal{P}(A)$. A ogni parte $U \subseteq A$ corrisponde una funzione 'caratteristica' $\chi_U: A \rightarrow \{0,1\}$, ove $\chi_U(x) = 1$ se $x \in U$ e $\chi_U(x) = 0$, se $x \notin U$, per ogni x in A . E viceversa: a ogni funzione $f: A \rightarrow \{0,1\}$ corrisponde un

sottoinsieme di A . Entrambe le corrispondenze sono univoche, perciò $\mathcal{P}(A) \cong \{0,1\}^A$. Qualunque formula esprima una proprietà relativa ad A individua il sottoinsieme degli elementi di A che soddisfano alla proprietà così espressa. Per esempio, la formula $\phi(x)$ che afferma $\exists y (x = 2y)$ interpretata sugli interi positivi individua il sottoinsieme dei numeri pari. Allora possiamo, in questo contesto, pensare i due elementi 1 e 0 di $\{0,1\}$ come rispettivamente il Vero (V) e il Falso (F). Per evitare confusioni, in quanto segue conviene appunto sostituire $\{V,F\}$ a $\{0,1\}$.

Indichiamo con *true* il morfismo $\{\bullet\} \rightarrow \{V,F\}$ che a \bullet associa V. Quel che abbiamo appena notato sulla corrispondenza fra sottoinsiemi e funzioni caratteristiche può quindi essere espresso dicendo che per ogni sottoggetto $\phi: U \rightarrow A$ esiste un morfismo caratteristico $\chi_U: A \rightarrow \{V,F\}$, tale che $\chi_U \cdot \phi = \text{true} \cdot !_U$ e il diagramma commutativo associato a quest'equazione è universale, nel senso che ogni altro diagramma $\chi_U \cdot \psi = \text{true} \cdot !_X$, per qualsiasi $\psi: X \rightarrow A$, è tale che esiste sempre un solo $b: X \rightarrow U$ tale che $\psi = \chi_U \cdot b$ e ovviamente $!_X = !_U \cdot b$.



In categorie diverse da **Set**, formate per esempio da strutture algebriche variabili in modo continuo su uno spazio, il modo in cui le parti di un oggetto sono identificate non è necessariamente lo stesso che in **Set**. Così al posto di $\{V,F\}$ possiamo avere un oggetto Ω con molti più valori di verità, strutturati in modo più complesso. Una categoria che ha un oggetto Ω che soddisfa alla proprietà illustrata nel diagramma precedente si dice che ha un «classificatore di sottoggetti». Un *topos elementare* è appunto una categoria cartesiana chiusa con classificatore di sottoggetti. Ci sono molti topos (il termine, essendo un acronimo, non è tenuto ad aver il plurale greco: topoi). Ogni topos può servire come un universo per fare matematica, in funzione di specifiche proprietà aggiuntive. Ci sono topos particolarmente adatti per la computabilità e altri per l'analisi. Ebbene, Lawvere ha scoperto che **Set** è contraddistinta da assiomi puramente categoriali. **Set** è infatti un topos elementare che in più soddisfa alle condizioni seguenti:

- il principio di *estensionalità*, ora nella forma: per ogni due morfismi $f,g: A \rightarrow B$, se $\forall x: 1 \rightarrow A (fx = gx)$ allora $f = g$.

- la *bivalenza*, cioè $\Omega \cong \{V, F\}$
- l'assioma di *scelta*, ora riformulabile come: per ogni epimorfismo $f: A \rightarrow B$ esiste un $g: B \rightarrow A$ tale che $fg = 1_B$ (esiste una sezione di f).

Ci sono topos che non soddisfano a nessuna di queste tre proprietà aggiuntive e altri che soddisfano a qualche loro versione modificata. La teoria dei topos è una delle principali branche della teoria delle categorie ma non la esaurisce.

4. Questioni filosofiche

Le prospettive aperte dalla teoria delle categorie sono vaste e molto articolate. Ma, accanto alle difficoltà che si devono ancora superare per servirsene come strumento nelle scienze naturali (a partire dalla fisica), ci sono anche difficoltà di carattere fondazionale e filosofico, nel momento in cui la teoria si propone come alternativa alla tradizionale teoria degli insiemi, basata sul concetto di appartenenza.

Un'obiezione ricorrente è quella che rimprovera alla teoria delle categorie di dipendere da assunzioni di tipo insiemistico. Ne abbiamo visto un esempio allorché siamo arrivati a una categoria 'grande' com'è appunto la categoria di tutte le categorie. Ma si potrebbe più semplicemente notare che una categoria è definita come totalità di oggetti e morfismi, dunque come insieme.

A quest'obiezione sono state date risposte diverse, tutt'altro che convergenti. C'è chi si accontenta di una nozione intuitiva di collezione, non necessariamente catturata dalla teoria assiomatica degli insiemi, chi si preoccupa di misurare l'impegno che il riferimento alla nozione di insieme comporta, e chi sostiene che la dipendenza è solo apparente, perché dispensabile nella metateoria.

Personalmente, ritengo che la terza opzione sia quella da perseguire, adottando la linea del matematico francese Jean Benabou, cfr. [2]: molte costruzioni categoriali comportano il rimando a famiglie indicate di oggetti, ma non è affatto detto che l'indicazione debba essere in termini di insiemi, come oggetti di una particolare categoria. Questa linea porta al concetto di fibrazione, cruciale al pari di quello di aggiunta nell'architettura della matematica. Purtroppo, il concetto di fibrazione richiede molti presupposti, che qui non è possibile fornire (il concetto di spazio di fibre in geometria algebrica e quello di fibrato tangente in fisica sono esempi da cui partire, ma non consentono di raggiungere il livello di generalità richiesto).

Come l'ultima questione toccata suggerisce, la filosofia della matematica che si appoggia alla teoria delle categorie non è univoca. Nondimeno, essa differisce dalle principali scuole fondazionali del Novecento: logicismo, formalismo e intuizionismo. Inoltre, non è vincolata al privilegio accordato dagli informatici alle procedure computazionali, almeno nel senso in cui la nozione di calcolabilità ha trovato sistemazione a partire dagli anni trenta (funzioni ricorsive, macchine di Turing, lambda-calcolo); e tanto meno è riducibile a una qualche teoria assiomatica degli insiemi, senza con ciò escludere minimamente l'importanza del concetto di insieme. È un modo di pensare la matematica e di fare matematica, che ha permesso un approfondimento di concetti

come *spazio, numero, verità logica, grandezza, figura*, cfr. [3], portando a ridisegnare l'impianto delle conoscenze matematiche già acquisite e aprendo nuove strade alla ricerca in molteplici settori.

Nel quadro categoriale l'incremento sostanziale di unità, ottenuto grazie a legami espressi in forma di aggiunzioni, si accompagna al riconoscimento che le sorgenti del pensiero matematico non sono di un unico tipo. Anzi, la stessa idea dei fondamenti cambia. Dall'idea della matematica come un edificio a forma di piramide rovesciata, che poggia sul vertice (costituito da assiomi globali che abbracciano tutte le possibili totalità e poi non permettono di spiegare come mai, fra esse, proprio quelle corrispondenti al reale pensiero matematico si sono realizzate), si passa all'idea di molteplici unità modulari, combinate secondo principi universali di correlazione.

Si potrebbe anche dire che, come da un sistema di riferimento privilegiato, qual era quello identificato da Newton in uno spazio e in un tempo assoluti, si è passati allo spazio-tempo relativistico e a sistemi di riferimento collegati da principi di invarianza, così si passa da un universo omogeneo di entità matematiche a una molteplicità di universi collegati da principi trasversali, individuati appunto nella teoria delle categorie.

Il che non significa, sul piano didattico, che questi principi possano essere colti, apprezzati e impiegati sotto vuoto e senza precedenti conoscenze. Al pari dei principi della teoria degli insiemi, possono essere gradualmente introdotti di pari passo con la conoscenze via via acquisite nei vari ambiti della matematica. Ma soprattutto, a differenza quanto meno del modo in cui l'*insiemistica* è impiegata (con funzione di igiene linguistica, dispensabile operativamente quando si studiano grandezze geometriche e si fanno calcoli), l'impostazione categoriale può orientare la presentazione, da parte del docente, di ciò che è centrale in ciascun ambito, perché così facendo si facilita la comprensione di come concetti di natura diversa (come quelli della logica, dell'algebra, della geometria, dell'analisi e infine della fisica matematica) si integrano fra loro in modi nient'affatto arbitrari.

NOTE

* Il presente testo è una versione ampliata della 'lezione-incontro' tenuta a Livorno il 18 ottobre 2005, nell'ambito delle manifestazioni di *Pianeta Galileo*. Ringrazio gli allievi e i docenti dell'ITG Buontalenti per l'interesse mostrato.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bell, J. L., *A primer of infinitesimal analysis*. Cambridge University Press, Cambridge 1998.
- [2] Benabou, J., Fibered categories and the foundations of naive category theory, *Journal of symbolic logic*, 50, 1985, pp. 10-37.
- [3] Lawvere, F. W., Categorie e spazio, *Lettera matematica Pristem*, 31, 1999, pp. 35-50.
- [4] Lawvere, F. W., Schanuel, S., *Teoria delle categorie: un'introduzione alla matematica*, Franco Muzzio, Padova 1994.
- [5] Mac Lane, S., Birkhoff, G., *Algebra*, Mursia, Milano 1975.
- [6] Mangione, C. Logica e teoria delle categorie, in *Storia del pensiero filosofico e scientifico*, a cura di L. Geymonat, vol. 7, pp. 519-653, Garzanti, Milano 1976.
- [7] Peruzzi, A., Il contenuto della forma logica, in *Forma e contenuto*, a cura di R. Lanfredini, pp. 211-222, LED, Milano 2002.

L'IDEA DI NATURA NEL MONDO ANTICO*

DANIELA FAUSTI

(CON INTERVENTI DI DORALICE FABIANO, KATIA VERDIANI, SILVIA ZAMBON)

Dipartimento di Studi Classici, Università di Siena

L'affascinante ma impegnativo tema che ci è stato assegnato si limita, per le nostre competenze, al mondo greco-romano; cercheremo perciò di esaminare come la natura era concepita: le teorie sulle origini del mondo, lo studio degli elementi che compongono gli esseri viventi, in particolare l'uomo, il rapporto con gli animali e le piante e le relative valenze simboliche e culturali.

In linea generale possiamo trovarci di fronte a due tipi di testimonianze, quella letteraria/poetica, che si esprime attraverso i miti e i racconti tradizionali e quella scientifica, o più esattamente razionalistica; chiaramente nell'ambito della manifestazione *Pianeta Galileo* ci occuperemo di questo aspetto, tenendo però presente l'importanza dell'altro. Bisogna infatti ricordare che nella storia della medicina antica l'attenzione concentrata sui testi spesso ha portato a trascurare i professionisti che non hanno lasciato traccia scritta della loro attività e che curavano secondo i metodi tradizionali senza creare sistemi fondati su principi teorici; le conoscenze pratiche potevano avere successo, ma non avendo principi di ricerca, ci si limitava ad un'attività medica senza teoria e senza possibilità di evoluzione. Talvolta però veniamo a conoscenza delle credenze tradizionali e popolari attraverso la testimonianza degli stessi medici, che le riferiscono, sia pure per controbatterle¹ o per dire che conviene tollerarle, magari per ragioni psicologiche.²

1. Origine del mondo

Se l'azione dei poemi omerici è dominata dalle divinità ed Esiodo nella *Teogonia* ci racconta i vari passaggi attraverso cui si arriva dal caos al *kosmos*, all'ordine universale rappresentato da Zeus, è a Mileto, colonia greca della Ionia, in Asia Minore, che nel VI a.C. per prima volta si definiscono le origini del mondo senza chiamare in causa gli dei, ad opera di quelli che Aristotele chiama fisiologi,³ perché formulano teorie sulla natura *perì physeōs*. Se ci soffermiamo sui primi tre, Talete, Anassimandro e Anassimene,⁴ legati fra loro da rapporti di discepolato, notiamo che sono accomunati dalla ricerca dell'*arché*, l'elemento naturale da cui tutto deriva e che viene identificato rispettivamente con l'acqua, con l'infinito (*apeiron*) e l'aria, da cui attraverso un processo di rarefazione e condensazione, derivano fuoco, acqua e terra, l'elemento più denso. Questo passaggio è importante perché compaiono i quattro elementi che saranno codificati nelle teorie empedoclee, confluiranno nel pensiero medico con le corrispondenti qualità ed infine

arriveranno fino a noi nella teoria dei temperamenti.

All'interno del *Corpus Hippocraticum*, la collezione di scritti medici convenzionalmente attribuita al grande medico greco Ippocrate,⁵ esiste un trattato *La natura dell'uomo*, attribuito a Polibo, genero di Ippocrate,⁶ secondo cui il corpo dell'uomo è costituito da quattro umori: flegma, sangue, bile gialla e nera (cap. 4) che sono in relazione con le quattro qualità (caldo, freddo, secco e umido e le stagioni (capp. 7-8). La perfetta mescolanza degli umori (*krasis*) corrisponde ad uno stato di salute, la separazione di uno di questi (*krisis*), genera uno squilibrio e quindi la malattia. La teoria umorale accomuna i trattati del *Corpus*, ma il numero degli umori è variabile, si va dai due di *Malattie I* (cap. 2 bile e flegma) o del *Regime* (cap. 3 fuoco e acqua, elementi complementari) al numero indeterminato di qualità⁷ dell'*Antica Medicina* (cap. 14). Anche grazie alla scelta di Galeno, grande medico del II d. C., che commenta *La natura dell'uomo* fondandovi il suo canone ippocratico, la teoria dei quattro umori si rivela vincente e attraverso vari passaggi nel XII secolo compaiono i termini latini *Phlegmaticus*, *Sanguineus*, *Cholericus*, *Melancholicus*, che hanno dato origine a quelli che noi usiamo per indicare quattro temperamenti.

Fra gli scritti ippocratici ne esiste uno, *La natura della donna*⁸, che, nonostante il titolo, non è il corrispettivo teorico de *La natura dell'uomo*, ma un prontuario terapeutico con scopi didattici; tuttavia attraverso la descrizione delle malattie e delle cure si può evidenziare un certo tipo di struttura del corpo femminile, che ugualmente risente dello squilibrio degli umori come causa di malattie, anche se non c'è una precisa teorizzazione.

2. Il mondo vegetale

Anche per ciò che riguarda la rappresentazione del mondo vegetale, a parte le menzioni nei testi letterari, negli scritti medici le piante compaiono regolarmente utilizzate per la composizione di medicinali oppure esaminate in relazione alla dieta e alle loro qualità,⁹ ma non c'è alcuna attenzione per la forma delle piante. Questa situazione dura fino a Teofrasto (370-286 a.C.) allievo e successore di Aristotele alla direzione del Liceo, che inizia la sua opera dichiarando che chi vuole prendere in considerazione le diversità fra le piante e la loro natura, deve considerare le loro parti, le loro qualità, la loro nascita e la loro vita successiva (*Ricerche sulle piante* I 1, 1). Gli organismi vegetali vengono studiati con acuto spirito di osservazione, poiché Teofrasto¹⁰ è il primo a porsi il problema della funzione delle varie parti, ad es. il rapporto fra fiore e frutto e a fare una classificazione sulla base della descrizione morfologica delle piante, diventando il fondatore della tassonomia botanica. Come scrive Cicerone,¹¹ l'opera di Teofrasto proseguiva ciò che Aristotele aveva fatto per gli esseri viventi, segnalando l'interesse per gli aspetti esterni: *figurae*.

Con Dioscoride, nel I d.C., anche se la ricerca consiste nell'osservazione delle piante nel loro *habitat* naturale e la descrizione è molto precisa, tutto è finalizzato all'interesse farmacologico e terapeutico, come del resto avviene anche nell'opera di Plinio il

Vecchio. Alcuni papiri di epoca immediatamente posteriore (II d.C.) ci conservano i primi 'ritratti' delle piante,¹² iniziando la tradizione dell'illustrazione botanica legata ai ricettari.

Per finire, possiamo notare che già alla fine del V sec. a.C. il mondo vegetale era stato usato all'interno del *Corpus Hippocraticum* come termine di paragone per spiegare con un ragionamento analogico fenomeni che all'epoca non era possibile verificare, come lo sviluppo dell'embrione all'interno dell'utero. Un solo esempio molto chiaro, dove viene istituito un paragone con gli alberi che non hanno spazio nella terra e crescono storti, per spiegare le malformazioni del feto che, trovandosi nelle stesse condizioni, ugualmente cresce storto (*Sulla generazione*, cap.10). Con la conoscenza della natura visibile delle piante si cerca di spiegare la natura nascosta dell'uomo.

LA DETERMINAZIONE DEL SESSO NELL'EMBRIOLOGIA ANTICA: RAFFRONTI TRA FILOSOFI PRESOCRATICI E MEDICINA IPPOCRATICA

DORALICE FABIANO

L'argomento di questo intervento è un caso specifico dei rapporti e degli influssi tra medicina ippocratica e filosofia presocratica, cioè quello dell'embriologia e in particolare del problema della determinazione del sesso del nascituro.¹³

Occorre innanzitutto ricordare com'era rappresentata la differenza tra i sessi:¹⁴ la medicina antica attribuiva al maschio una natura calda e secca, cioè positiva perché il caldo e il secco erano associati al calore vitale, mentre la donna era ritenuta dotata di una natura umida e fredda, che veniva invece giudicata inferiore e imperfetta rispetto a quella maschile (*Arie Acque e Luoghi* 10; *Natura del bambino* 15; Aristotele, *La generazione degli animali* 728 a17; 737 a). Tali giudizi sono resi possibili da una conoscenza anatomica piuttosto approssimativa: fino all'età alessandrina, infatti, non veniva praticata la dissezione dei cadaveri e quindi non era possibile avere un quadro chiaro dell'anatomia umana.

Il primo quesito dell'embriologia antica è spiegare se la donna contribuisca alla riproduzione attivamente con un proprio seme, dal momento che i Greci nulla sapevano né delle ovaie né dell'ovulo femminile, mentre avevano ben chiaro il fatto che il seme maschile fosse l'origine della vita. Di fronte a tale domanda, le risposte si articolano in due filoni principali, come ci ricorda Aristotele (*La generazione degli animali*, II 7 e sgg.): quello che ammette l'esistenza di un apporto attivo della donna alla creazione del bambino, e quindi ammette l'esistenza di un seme femminile, e quello che invece la nega, attribuendo l'unico principio generativo all'uomo, mentre la donna fornirebbe solo il luogo dello sviluppo dell'embrione.

Al primo appartengono Ippone¹⁵ (Diels-Kranz 38 A 14), Diogene di Apollonia (Diels-Kranz 64 B 6), alcuni pitagorici (Diels-Kranz 58 B 1a), e probabilmente Anassagora (Diels-Kranz 59 A 107). Tale opinione, sostenuta anche da Eschilo nelle *Eumenidi* (vv. 658-666), si appoggiava a un retroterra mitico e tradizionale, che faceva

riferimento ad analogie con l'ambito agricolo, paragonando la donna alla terra e l'uomo al seme. Il ruolo passivo della madre nella generazione rispondeva al bisogno una società patriarcale di considerare il figlio come esclusiva proprietà del padre e all'esigenza di confermare la passività sociale della donna all'interno della società.

Nel secondo filone, quello che ammetteva l'esistenza di un seme femminile, annoveriamo Alcmeone (Diels-Kranz 24 A 14), Parmenide (Diels-Kranz 28 B 18), Empedocle (Diels-Kranz 31 B 63), e soprattutto Democrito (Diels-Kranz 68 A 142). Questi autori ammettevano che anche la donna fornisse seme con determinate qualità che potevano essere trasmesse al figlio, e costituiscono gli antecedenti del pensiero ippocratico. Nel trattato *La Generazione – La natura del bambino*, infatti, Ippocrate sostiene che entrambi i genitori emettono seme e che la trasmissione dei caratteri avviene sulla base della prevalenza quantitativa (*epikrateia*) di uno o dell'altro dei due semi, riprendendo una teoria avanzata per la prima volta da Democrito.

In entrambi i casi, cioè che si neghi o si affermi l'apporto attivo della donna alla generazione, si pone necessariamente il secondo quesito dell'embriologia antica, il problema della differenziazione sessuale dell'embrione, cioè, che cosa ne causi l'essere maschio o femmina. In particolare anche in presenza di due semi, quello dell'uomo e della donna, dal momento che l'uomo è migliore e più forte della donna, e quindi produce un seme migliore e più forte, perché non nascono solo maschi?

Le risposte dei filosofi furono le più disparate. Parmenide (Diels-Kranz 28 A 53) sosteneva che il seme proveniente dalla parte destra del corpo fosse maschile e quello proveniente dalla parte sinistra femminile, e la determinazione del sesso fosse comunque basata sul criterio dell'*epikrateia*. Secondo Empedocle (Diels-Kranz 31 B 65-67), il nascituro sarà maschio se al momento del concepimento l'utero è caldo, femmina se è freddo. Empedocle infatti pensava che il calore dell'utero variasse mensilmente, più caldo se vicino alle mestruazioni, più freddo se lontano da esse. Tali concezioni rimandano da un lato al fatto che la natura maschile era ritenuta calda, quindi vitale, e positiva, mentre quella femminile era fredda e umida, perché all'uomo erano attribuite caratteristiche positive e alla donna negative, dall'altro al fatto che alla parte destra era attribuita una preminenza sulla parte sinistra, in quanto caratterizzata da maggiore forza e calore. È solo con Democrito (Diels-Kranz 68 A 141-143) e la citata nozione di *epikrateia* che si perde per la prima volta in ambito scientifico la nozione di essere femminile come "diminuzione", "menomazione" di un maschio potenziale.

Per noi è importante notare che la visione medico-biologica della donna era condizionata pesantemente da quella sociale; la donna rimaneva, anche nel pensiero medico, una creatura di una razza diversa, fisicamente inferiore all'uomo, un essere originato da qualche imperfezione nello sviluppo fetale (maggior lentezza nella formazione dell'embrione, minor completezza nello sviluppo a causa del minore calore). Nella scienza antica, dunque, la classificazione precede la raccolta dei dati, è anzi il dato empirico che viene raccolto e interpretato sulla base di una convinzione precedente: l'*a priori* di inferiorità che la società proiettava sulla donna era tanto forte da determinare

la lettura biologica del suo corpo riuscendo a condizionare profondamente la visione della scienza.

GLI ANIMALI E L'UOMO NEL MONDO ANTICO: L'ALVEARE COME RAPPRESENTAZIONE DELLA SOCIETÀ UMANA

KATIA VERDIANI

Gli animali hanno sempre rivestito un ruolo fondamentale nella vita dell'uomo, accompagnandolo sia negli aspetti pratici sia in quelli teorici dell'esistenza. Utilizzati per l'alimentazione, sono stati allevati e cacciati, hanno aiutato l'uomo nei lavori dei campi e sono stati sfruttati a scopo ludico o di guardia già nell'antichità. Al tempo stesso, però, il rapporto continuo ha portato l'uomo a riflettere sulla loro natura e ad elaborare teorie anche complesse sulle caratteristiche che li contraddistinguono sia in quanto singoli, sia considerati all'interno della propria collettività di riferimento (il branco, lo sciame, il gregge ecc.). Secondo una celebre definizione di Claude Lévi- Strauss, uno dei padri dell'antropologia, gli animali sono «bons à penser», cioè «buoni per pensare o da pensare»¹⁶. Gli animali, insomma, costituiscono uno spunto interessante su cui riflettere e talvolta i loro comportamenti possono rappresentare per l'uomo esempi positivi da imitare o negativi da evitare. In un certo senso si potrebbe affermare che «nella storia dell'umanità, l'importanza dell'animale come oggetto culturale non sia stata poi così inferiore a quella dell'animale in carne ed ossa. Di conseguenza l'animale è anche molto “buono da studiare”, non solo per la quantità delle interazioni complesse che intrattiene con il mondo umano, ma anche per la sua importanza come figura dell'immaginario nelle tradizioni culturali delle società passate e presenti»¹⁷.

I punti di contatto tra l'organizzazione della società umana e quella dell'alveare sono numerosi e nel mondo antico gli elementi di somiglianza sono molti di più rispetto a quelli avvertiti dalla nostra cultura. Intorno alle api ruotano tutta una serie di significati culturali, per cui diventano paradigma di perfezione sia individuale, sia, soprattutto, collettiva e testimonianze in tal senso si possono raccogliere nei testi greci e latini. Le connotazioni culturali dell'ape sono molteplici¹⁸. Per ricordarne soltanto alcune, l'ape è l'animale puro per eccellenza¹⁹, che rifugge da tutto ciò che è putrido, non è soggetto ai piaceri di Venere, è in continuo contatto sia con gli uomini sia con gli dei, perché ha in sé il germe del divino, è dotato di poteri divinatori, ed è capace di indicare con la propria presenza anche l'esito di eventi futuri o la fortuna di grandi uomini. Inoltre, la superiorità delle api rispetto agli altri animali emerge in maniera molto chiara nell'organizzazione della vita della comunità.

Il primo autore che ci parla dell'ape come animale sociale è Aristotele, il quale, nell'*Historia animalium*, 488a, annovera questi insetti tra gli animali che vivono in un gruppo organizzato, guidato da un re, in cui tutti i membri si adoperano per un fine comune, proprio come fanno l'uomo, le vespe, le formiche e le gru. Plinio il Vecchio, parlando a lungo delle api nell'undicesimo libro della *Naturalis Historia* (1-12), arriva

addirittura ad affermare che questi insetti agiscono in funzione del bene dell'intero gruppo perché «conoscono solo l'utile comune». L'alto livello di socialità delle api e la loro vicinanza alla comunità umana si riscontrano prima di tutto nella scelta del luogo in cui le due comunità andranno ad abitare, che obbediscono a criteri molto simili. Secondo Varrone, *De re rustica*, III, 16, 12, infatti, l'alveare deve essere posto nei pressi della fattoria, in un punto in cui non c'è eco, rivolto verso oriente nei mesi invernali, in una zona dal clima temperato con intorno abbondante pascolo ed acqua pura. In particolare, la presenza di acqua limpida, non stagnante, rappresenta una costante nelle fonti che parlano del luogo adatto per porre un'arnia. Ne parlano Virgilio, *Georgica* IV, 18-24; 48-50 e Columella, che dedica alla descrizione del luogo adatto in cui porre l'alveare un intero paragrafo del *De re rustica* (IX, 5). Questo non deve essere né troppo caldo, né troppo freddo, ma, soprattutto lontano da ogni tipo di odore nauseabondo, come quello delle latrine e dei letamai, del pantano e delle paludi. La relazione tra i luoghi paludosi e le api permette di stabilire un rapporto piuttosto stretto tra insediamento ideale per gli alveari ed insediamento ideale per la comunità umana, che obbediscono ad analoghi precetti di ordine igienico²⁰. Varrone afferma più volte nel I libro del *De re rustica* che nell'atto di costruire un fattoria bisogna porre attenzione alla scelta di un luogo salubre, che sia vicino ad un corso d'acqua, ma non ad una palude, perché in essa si sviluppano animali piccoli ed invisibili che penetrano nell'organismo e provocano malattie pericolose per gli occhi e per le vie respiratorie²¹.

Vitruvio nel *De Architectura*, I,4,1, consiglia di evitare la vicinanza di una palude anche nella scelta del luogo adatto per l'edificazione di una città. Gli uomini e le api, infatti, abitano gli stessi luoghi perché fanno parte di una comunità ugualmente organizzata e civilizzata: l'ape, lontana dalla natura selvaggia ed incolta è "metafora" dell'uomo civile. Questo avviene anche per le forme di organizzazione sociale adottate sia dalla comunità degli uomini sia da quella delle api. L'alveare, infatti, costituisce spesso nelle fonti antiche l'*explanans* della *respublica*, così come accade frequentemente che la *respublica* rappresenti il filtro metaforico attraverso il quale si descrive l'alveare. L'immagine dell'alveare come archetipo e simbolo dell'organizzazione sociale circola diffusamente nella cultura greca e romana, attraverso il Medioevo e sopravvive, confermata e rinnovata, nell'età moderna e contemporanea²².

Già Platone fa ricorso all'*exemplum* della società delle api in ambito politico²³, citando il re dell'alveare come modello ideale cui ispirarsi per perseguire l'interesse dei cittadini e dello stato. In Cicerone, *De Officiis*, I, 157, le api, proprio come gli uomini, sono descritte come animali sociali per natura²⁴, spinte a costruire i favi proprio in virtù di questa loro naturale tendenza a vivere in comunità. Il dato per noi più interessante non è tanto la loro tendenza a vivere in gruppo, quanto la qualità della loro socializzazione²⁵, che permette all'alveare di assurgere a paradigma di ogni altra collettività. Le api si distinguono perché riescono a condividere una precisa attività lavorativa e produttiva ed a dividersi tra loro i compiti in maniera razionale, proprio come accade all'interno di una *civitas*. Tuttavia, se prendiamo in esame la rigorosa disciplina dell'alveare, vedremo

che questa assomiglia molto più a quella che vige all'interno di un accampamento militare, piuttosto che alle abitudini di una città in tempo di pace.

Plinio XI, 20 sgg., descrive l'alveare proprio come se si trattasse di un esercito: lo sciame di api operaie che lavora fuori dall'alveare è chiamato *agmen*, così come le api incaricate di andare in cerca di pascoli nuovi e freschi prendono il nome di *speculatores*, termine usato nel linguaggio militare che, propriamente, indica la spia. Inoltre, la giornata e le attività sono scandite da ritmi molto simili a quelli di un accampamento: durante il giorno una guardia sorveglia le porte, al mattino una di loro dà a tutte la sveglia con un ronzio che è simile ad uno squillo di tromba, ed alla sera, poi, un'altra, volando intorno all'alveare ed emettendo lo stesso ronzio che al mattino le aveva svegliate, ordina a tutte di riposare e di fare silenzio²⁶.

Plutarco nella *Vita di Licurgo* 25, 5 racconta che il legislatore abituò i suoi concittadini a non saper vivere da soli, ma a formare sempre un corpo unito al totale servizio del re, proprio come fanno le api. Questo particolare si carica ovviamente di grande significato se si considerano il forte accentramento e la militarizzazione della società spartana. L'alveare, infatti, se analizzato da questo punto di vista, rappresenta una società in cui tutti i membri perseguono un utile comune, ma anche in cui non è data possibilità di una scelta autonoma. Basti pensare che le api riescono a rimanere unite soltanto finché alla loro testa c'è un re, forse proprio per la loro naturale incapacità di libero arbitrio (*Georgiche*, IV, vv.210-215) e che l'ape-re è oggetto di un rispetto e di una venerazione anche maggiori di quelli attribuiti ai sovrani orientali, pur non esercitando sull'alveare alcun potere tirannico. La regalità esercitata dal re dell'alveare diviene perciò anche il paradigma di una "provvida regalità". Il sovrano rappresenta infatti l'emblema dell'unità dell'alveare e solo la sua presenza rende possibile la spontanea convergenza delle azioni e dei sentimenti dei singoli membri che costituiscono la *civitas* di cui lui è a capo.

A conferma di ciò, un passo di Plinio, XI, 17, dimostra che l'obbedienza delle api, per quanto sorprendente, non è motivata dal timore della sanzione, dal momento che il re non ricorre alla forza e non ha bisogno di imporsi o di fare ricorso alla violenza, anche perché non usa il pungiglione, del quale, per altro, gli antichi discutono se sia fornito o meno. Seneca, nel *De Clementia*, I, 19, 2-3, guarda alle api proprio in questa prospettiva: le api costituiscono per lui il modello di un ordine naturale e spontaneo, entro il quale l'autorità trova fissati i suoi limiti. L'alveare dimostra che la carica del re non è un costrutto convenzionale, ma è un portato della natura stessa. La natura ha creato la figura del re, facendo in modo che costui si distinguesse per le dimensioni e lo splendore del proprio corpo, e che godesse di alcuni privilegi, come il fatto di essere alloggiato nel luogo più interno dell'alveare e di essere esente dal lavoro, ma anche che, essendo il solo privo di pungiglione, si segnalasse per il carattere pacifico e per l'incapacità di nuocere. La conclusione di Seneca, è dunque che il re dell'alveare, in virtù delle sue caratteristiche, dovrebbe costituire il modello di riferimento per tutti i grandi re, proprio perché la natura di solito offre grandi esempi nelle cose più piccole.

L'ETOLOGIA DELL'USIGNOLO NELLA CULTURA ANTICA

SILVIA ZAMBON

Con questo contributo mi propongo di sviluppare una breve analisi di alcune testimonianze antiche relative all'etologia di *aedón* e *luscinia*, nomi classici – il primo greco ed il secondo latino – che designano quell'animale che nelle classificazioni zoologiche è registrato come *Luscinia megarhyncha*, un uccello migratore che giunge nel bacino del Mediterraneo in aprile, dove poi rimane per le cove e l'allevamento dei nidiacei sino a settembre²⁷.

Dalla lettura dei testi classici, non solo di carattere prettamente naturalistico, si evince una larga esperienza da parte di Greci e Romani di questo uccello, stimolata dall'osservazione continua dell'animale, di cui essi registrano le abitudini ed il comportamento, e che analizzano sia nel suo habitat naturale sia in gabbie. L'usignolo veniva, infatti, catturato per mezzo di una apposita trappola, munita di un congegno a scatti e di reti²⁸.

I principali testi di riferimento che si trova ad affrontare chi si occupa dell'etologia dell'usignolo nel mondo antico sono la *Historia animalium* di Aristotele e il libro X della *Naturalis Historia* di Plinio, che spesso si richiama alla trattazione aristotelica. Qualche curiosità zoologica si rinviene anche nel primo libro del trattato *De natura animalium* di Claudio Eliano, un autore greco del II-III d.C. che, rifacendosi all'opera di Aristotele, mette in continuo rapporto l'etologia dell'uccello con la sua tradizione mitica. È questo il principale limite delle testimonianze antiche relative alle caratteristiche di questo uccello: il dato ricavato dall'osservazione naturalistica viene spesso contaminato con materiale proveniente da fonti mitografiche e letterarie, le quali descrivono l'usignolo come una figura metamorfica di madre in lutto, che gode di larga fama nell'immaginario greco-latino²⁹.

Nella tassonomia animale, l'usignolo rientra nell'ordine dei passeracei, di cui condivide le esigue dimensioni, l'assenza di una colorazione vistosa e la straordinaria voce melodiosa. Gli autori del mondo classico non mancano mai di rilevare come questo uccello, di cui tutti apprezzano la prodigiosa abilità vocale, la mirabile capacità di emettere una successione volubile di note e di intonare sapienti arie, sia in realtà un minuscolo animale, un pennuto di piccolissima taglia dal bruno piumaggio. Ed in effetti l'imbarazzo, lo stupore verso il corpicino della *aedón-luscinia* insieme alla curiosità verso le peculiarità foniche del gorgheggio dell'uccello canterino si riscontrano in tutta la produzione antica. L'eccezionalità della presenza in un corpo d'animale minuto di una così mirabile tecnica di modulazione di temi musicali viene rilevata, in modo particolare, in un brano plutarco, su cui è opportuno soffermarsi.

All'interno dei *Moralia*, in un passo tratto dalla raccolta degli *Apophthégmata Laconicá* (233 A, 15), si racconta il caso di un povero usignolo finito nella mani di un essere umano che si mise a strappargli le penne una ad una. La brevità dell'apoteigma non rivela nulla a proposito della finalità di questa operazione investigativa: possiamo

supporre che l'anonimo personaggio, probabilmente incuriosito dalla straordinaria vibrazione di suoni nella gola dell'uccellino, agisse con l'intenzione di scoprire quale segreto congegno si potesse celare sotto le piume del prodigioso cantore. Ma venutosi a trovare tra le mani un insignificante corpicino, non gli restò che rivolgere al malcapitato usignolo le seguenti parole: «Una voce tu sei e null'altro». L'usignolo è, dunque, per gli antichi «l'animale dalla voce soave, il più canoro di tutti gli uccelli», ed è questa una definizione che rinveniamo nell'idillio dodicesimo di Teocrito (vv. 6 s.).

Abbiamo avuto modo di scoprire come sia connaturata nell'usignolo la predisposizione al canto. Apprendiamo, inoltre, dalla testimonianza degli antichi che le femmine di usignolo non esiterebbero ad uccidere i piccoli nati muti; gli usignoli afoni alla nascita verrebbero infatti soppressi dalla madre, come se si trattasse di una discendenza degenera³⁰.

Ma non è soltanto questa la caratteristica etologica che distingue l'usignolo dalle altre creature dell'aria e che ne fa il cantore per eccellenza: della *aedón-luscinia* viene registrata nei testi classici non solo la soavità del canto, ma anche la predisposizione ad imitare il linguaggio umano e ad apprendere il greco e il latino. Proprio come storni, corvi e pappagalli³¹, anche gli usignoli sarebbero dotati di una straordinaria capacità di imitazione vocale. Stando alle osservazioni degli antichi, si tratta, quindi, di creature alate che, se opportunamente educate dagli istruttori, si rivelano in grado di articolare le lettere in modo da riprodurre la parlata degli esseri umani. Ed effettivamente Greci e Romani riconoscono agli usignoli la peculiarità di saper adattare la propria lingua alla produzione di suoni diversi, e addirittura di impartire una vera e propria forma di educazione agli implumi. Secondo Plinio, gli usignoli più giovani si eserciterebbero ricevendo porzioni di canti da imitare; l'allievo ascolterebbe con grande attenzione e cercherebbe di ripetere la frase musicale, e a turno scolaro e maestro tacerebbero. Secondo lo scrittore latino, sarebbe addirittura possibile cogliere la correzione da parte dell'uccello che è stato ripreso ed un certo biasimo in quello che insegna³².

Sempre dalla testimonianza pliniana apprendiamo anche come i giovani Cesari avessero usignoli che imparavano facilmente il greco e il latino, che inoltre si esercitavano assiduamente e che di giorno in giorno dicevano parole nuove, per di più combinandole in una frase via via sempre più lunga. L'insegnamento agli uccelli doveva essere impartito in un luogo nascosto, dove nessun'altra voce si mescolasse ed il maestro sedeva loro vicino per ripetere spesso quei vocaboli che voleva fissare nella loro memoria e li blandiva col cibo³³.

Alla base di questa abilità di natura linguistica e musicale andrebbe ravvisata, secondo gli studi naturalistici di Aristotele e di Plinio, la peculiare conformazione della lingua degli usignoli: la voce plasmabile e mimetica di questi uccelli sarebbe favorita dalla natura non appuntita dell'organo fonatorio³⁴. Come gli usignoli, tutte le specie di uccelli che imitano il linguaggio umano – si pensi alle gazze ed ai tordi, ad esempio – sarebbero dotate, secondo gli autori classici, di una lingua piatta e più larga.

NOTE

* Il presente testo è ricavato dai contributi all'incontro avvenuto il 25 ottobre 2005 ad Arezzo presso il Liceo Classico "F. Petrarca". La redazione scritta, sia pure in forma molto ridotta per motivi di spazio, riflette l'ordine espositivo seguito nell'incontro; le dott.sse D. Fabiano, K. Verdiani, S. Zambon stanno svolgendo la loro tesi nel Dottorato di Antropologia del Mondo antico dell'Università di Siena.

¹ Possiamo farci un'idea della situazione attraverso la polemica contenuta nel trattato ippocratico *La malattia sacra* o anche le *Leggi* di Platone (720a-c e 857c-e).

² Sorano (II d. C.) motiva così l'accettazione dell'uso di amuleti (3.42).

³ *Metafisica* 983b.

⁴ Si veda su questi autori [1].

⁵ Su Ippocrate, la collezione ippocratica e le teorie più importanti si vedano [2], [3] e [4]. Il nucleo più importante del *Corpus* è databile agli ultimi decenni del V a. C.

⁶ Secondo la testimonianza di Aristotele (*Ricerche sugli animali*, 512b-513a).

⁷ Ad es. il salato, l'amaro, il dolce ... e infinite altre (qualità) dotate di proprietà diverse.

⁸ Si veda su questo trattato [5].

⁹ Si veda ad es. *Sul regime* II, 54 il famoso catalogo degli ortaggi.

¹⁰ Per notizie generali su Teofrasto e Dioscoride nell'ambito della letteratura scientifica, vedi [6], pp. 193-195 e 348 s.

¹¹ *Sul fine dei beni e dei mali*, V 10.

¹² Sul tema dell'illustrazione botanica dall'antichità al Cinquecento cfr. [7] e le relative indicazioni bibliografiche.

¹³ Per un'introduzione generale al pensiero di Ippocrate, vedi [4a]

¹⁴ Per la concezione della differenza sessuale nel pensiero medico-biologico antico vedi [1a] pp. 83-96 e [2a] pp. 80-81.

Sull'anatomia femminile nel mondo greco vedi [5a] pp. 44-60.

¹⁵ Per tutti i filosofi presocratici che citerò, l'edizione di riferimento è [3a].

¹⁶ Si veda [5b], p. 126.

¹⁷ Cit. da Franco 2003, per cui si veda [4b] p. 64.

¹⁸ Per un'analisi della valenza simbolica delle api e dell'alveare nell'orizzonte culturale greco si veda [6b]. Per un'analisi più approfondita del significato culturale ed antropologico dell'ape nella cultura romana si rimanda a [1b], pp. 205-255.

¹⁹ Sicuramente interessante notare che anche oggi le api sono impiegate come indicatori biologici della purezza dell'aria.

²⁰ Come dimostra l'analisi condotta da Federico Borca a partire dai vv.48-50 del IV libro delle *Georgiche*, per la quale si veda [2b].

²¹ Anche in Plinio, *Naturalis Historia*, XVIII, 33 troviamo un consiglio molto simile a quello di questo passo di Varrone.

²² Per l'analisi dell'alveare come immagine dello stato e per la fortuna del tema si rimanda a [3b].

²³ Si vedano *Repubblica*, 520 b e *Politico*, 301 d-e.

²⁴ Cfr. Varrone, III, 16, 4.

²⁵ Plinio, *Naturalis Historia*, XI, 11 descrive la società dell'alveare come copia perfettamente organizzata della società umana: *rem publicam habent, consilia privatim quaeque, at duces gregatim et, quod maxime mirum sit, mores habent praeter cetera [...]*. Virgilio, *Georgiche*, IV, 201 arriva addirittura ad apparentare in maniera inequivocabile la società dell'alveare non con una città qualsiasi, ma direttamente con Roma, chiamando le api *parvos Quirites*.

²⁶ In Varrone III, 16, 9, l'assimilazione con l'esercito è totale: *Omnes ut in exercitu vivunt*.

²⁷ Per uno studio abbastanza recente in lingua italiana, che prenda in considerazione in modo organico le testimonianze latine dell'etologia di questo uccello, rinvio a [2c], pp. 314-319 e pp. 409-411. Per il mondo greco, invece, cfr. [7c], pp. 16-22.

²⁸ Si tratta della cosiddetta *páge*, di cui ci rimane una descrizione nel trattato *De Avibus* di Dionisio (libro III, cap. XIII). A tale riguardo si veda [1c], pp. 757-761.

²⁹ Nella tradizione culturale greco-romana, il verso armonioso e struggente dell'usignolo ha sempre evocato un grido di disperazione materna, un lamento femminile intriso di dolore e malinconia: l'uccellino continuerebbe, infatti, a modulare senza posa i gemiti di Procne, una mitica donna assassina del proprio figlio Iti, la quale, dopo aver subito l'ornitomorfismo in usignolo, non cesserebbe mai di intonare canti di lutto. Ecco quindi che, nell'antichità, la voce dell'usignolo, trasformata in un segno della lingua umana, è stata interpretata fonosimbolicamente come una reiterata invocazione del nome Iti. Del resto, come osserva opportunamente Cardona per il quale si veda [3c], p. 89, «diffusa esigenza è quella di trasformare in segno linguistico i richiami degli animali; di rendere cioè in sequenze per noi pronunciabili l'amplessissima gamma di suoni da essi prodotta». Il linguaggio degli uomini può infatti «proiettarsi su quello degli uccelli, capendolo nei suoi propri termini, dando senso umano a voci e richiami» (*ibid.*, p. 93). Sulla tradizione mitica dell'usignolo si vedano [4c], [5c] e [8c].

³⁰ Dionisio, *De avibus* I, 20.

³¹ Sull'apprendimento e l'imitazione del linguaggio umano da parte di questi uccelli cfr. Plutarco, *De sollertia animalium* 973 a; Claudio Eliano, *De natura animalium* VI, 19; XVI, 3.

³² Plinio, *Naturalis Historia* X, 83. A tale riguardo cfr. [6c], pp. 85 s. Sull'apprendimento musicale dei piccoli di usignolo si vedano anche le testimonianze di Dionisio, *ibid.*; Aristotele, *Historia Animalium* IV, 9, 536 b; Plutarco, *De sollertia animalium* 973 b; *id.*, *Bruta animalia ratione uti* 992 c; Porfirio, *De Abstinencia* III, 6, 5.

³³ Plinio, *ibid.* X, 120.

³⁴ Cfr. Aristotele, *Historia Animalium* IV, 9, 616 b 8-9 e Plinio, *Naturalis Historia* X, 85.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Lami, A. (a cura di), *I Presocratici (da Talete a Empedocle)*, BUR, Milano 1991.
- [2] Vegetti, M., *Ippocrate. Opere*, UTET, Torino 1976.
- [3] Di Benedetto, V., *Il medico e la malattia, La scienza di Ippocrate*, Einaudi, Torino 1986.
- [4] Jouanna, J., *Hippocrate*, Fayard, Paris 1992 (trad. it. *Ippocrate*, SEI, Torino 1994).
- [5] Andò, V., *Ippocrate. Natura della donna*, BUR, Milano 2000.
- [6] Mastroianni, I. e Zumbo, A. (a cura di), *Letteratura scientifica e tecnica di Grecia e Roma*, Carocci, Roma 2002.
- [7] Fausti D., La tradizione dell'erbario illustrato: qualche esempio, in *La Complessa Scienza dei Semplici*, a cura di D. Fausti, Atti delle Celebrazioni del V Centenario della Nascita di P. A. Mattioli, Siena 2001, *Atti dell'Accademia dei Fisiocritici*, Suppl. tomo XX s. XV, 2001, Tipografia Senese, Siena 2004, pp.17-36.
- [1a] Campese S., Manuli P., Sissa G., *Madre Materia: sociologia e biologia della donna greca*, Boringhieri, Torino 1983.
- [2a] Cantarella E., *L'ambiguo malanno: condizione e immagine della donna nell'antichità greca e romana*, Editori Riuniti, Roma 1986.
- [3a] Diels H. e Kranz W., *Die Fragmente der Vorsokratiker*, 3 voll. Berlin Weidemann 1967-1969 (tr. it. a cura di A. Pasquinelli, *I Presocratici: frammenti e testimonianze*, 2 voll., Einaudi, Torino 1976.
- [4a] Jouanna J., *Ippocrate*, SEI, Torino 1994.
- [5a] Sissa G., *La verginità in Grecia*, Bari- Roma, Laterza 1992.
- [1b] Bettini, M., *Antropologia e cultura romana*, Nis, Roma 1986.
- [2b] Borca, F., *Altae neu crede paludi*, in *Sileno*, 21 (1-2), 1995, pp. 161-165
- [3b] Costa, P., *Le api e l'alveare. Immagini dell'ordine tra "antico" e "moderno"*, in *Ordo Iuris*, a cura di M. Sbriccoli, Giuffrè, Milano 2003, pp. 375- 409.
- [4b] Franco, C., *Animali e analisi culturale*, in *Buoni per pensare*, a cura di F. Gasti ed E. Romano, Collegio Ghisleri, Pavia 2003, pp. 63-81.
- [5b] Lévi-Strauss, C., *Le totémisme aujourd'hui*, Presses Universitaires de France, Parigi 1962. (Trad. it. *Il totemismo oggi*, Feltrinelli, Milano 1972.
- [6b] Roscalla, F., *Presenze simboliche dell'ape nella Grecia antica*, La Nuova Italia, Firenze 1998.
- [1c] Capponi, F., *La «trasenna» della commedia Plautina*, *Latomus*, 22, 1963, pp. 747-772.
- [2c] Capponi, F., *Ornithologia latina*, Istituto di Filologia Classica e Medievale, Genova 1979.

- [3c] Cardona, G. R., *I sei lati del mondo. Linguaggio ed esperienza*, Laterza, Roma-Bari 1985.
- [4c] Cazzaniga, I., *La saga di Itys nella tradizione letteraria e mitografica greco-romana*, Istituto Editoriale Cisalpino, Varese-Milano 1950-1951.
- [5c] Forbes Irving, P. M. C., *Metamorphosis in Greek Myths*, Clarendon Press, Oxford 1990.
- [6c] Goguey, D., *Les animaux dans la mentalité romaine*, Éditions Latomus, Bruxelles 2003.
- [7c] Thompson, D'A. W., *A Glossary of Greek Birds*, Olms, Hildesheim 1966.
- [8c] Zaganiaris, N. J., Le mythe de Térée dans la littérature grecque et latine, *Platon*, 25, 1973, pp. 208-232.

ARISTOTELE, GALILEO, NEWTON: FORZA, VELOCITÀ E ACCELERAZIONE

ANDREA FROVA

Dipartimento di Fisica, Università di Roma 'La Sapienza'

V'è un concetto che lega i tre grandi pensatori con un ideale filo rosso. Aristotele scrisse: «La Natura non produce nulla che non sia utile», Galileo: «E sempre gustai della semplicità e facilità della Natura, che non intraprende a fare quello che non può essere fatto, non opera con molte cose quello che può con poche», e Newton infine: «La Natura non fa nulla di inutile, giacché il *più* non serve, quando basta il *meno*: essa ama la semplicità e disdegna il fasto delle cose superflue». E così un altro concetto, che limiterò all'enuciazione fatta da Galileo: «Val più trovare il vero di picciol cosa che il disputar lungamente delle massime questioni senza conseguir verità nessuna». Vediamo in figura 1 i ritratti dei magnifici tre. Un posto di quarto magnifico spetterebbe naturalmente ad Einstein, che



Figura 1. Aristotele, Galileo Galilei, Isaac Newton.

completerà il discorso sui problemi dell'accelerazione di gravità avviato da Aristotele. Ma Einstein è degnamente celebrato in altre conferenze, essendo stato il 2005 proclamato anno mondiale della Fisica, in quanto ricorrenza del centenario della relatività ristretta.

1. Così parlò Aristotele (*ipse dixit*)

Aristotele non si interessò della fase iniziale di caduta dei gravi, osservandone soltanto il moto a regime, quando la velocità di caduta diviene costante. Affermò che quanto più un corpo pesa, tanto più velocemente scende di quota. Generalizzando il discorso al caso di forze qualsiasi, Aristotele disse che applicando una forza più grande a un dato corpo gli si imprime una velocità maggiore (una carrozza tirata da due cavalli viaggia più velocemente che se il cavallo è uno solo). Secondo gli aristotelici, dunque, varrebbe

una legge di diretta proporzionalità tra forza F e velocità v , che matematicamente potremmo scrivere

$$v = kF \text{ (con } k = \text{costante)}$$

Nel caso dei corpi lanciati, Aristotele disse che la spinta del lancio rimane sul corpo come 'forza impressa', esaurendosi gradatamente nel tempo. Se osserviamo la caduta di un corpo in un mezzo molto denso, ad esempio nell'olio, si può avere effettivamente l'impressione che le cose vadano in quel modo, ma se il mezzo è poco denso, tipo l'aria, la caduta è troppo rapida per potersi pronunciare in proposito.

Per due millenni i filosofi peripatetici assunsero le affermazioni di Aristotele come il Verbo. Qualcuno, ad esempio Filopono, commentatore di Aristotele del VI secolo d.C., scrisse timidamente: «*Lasciando cadere due pesi dalla stessa altezza, uno molto più pesante dell'altro... vedrete che la differenza dei tempi di caduta è assai piccola*». Anche Leonardo da Vinci si pronunciò in maniera simile. Ma l'autorità di Aristotele è così forte che resiste a tutte le obiezioni.

2. Galileo Galilei e il piano inclinato

Galileo è uno dei primi a farsi beffe delle credenze basate sul dogma e sull'autorità degli antichi (cosa che, lo sappiamo, pagherà cara). Sui filosofi peripatetici ironizza:

«Mi trovai un giorno in casa di un medico molto stimato in Venezia, dove alcun i per loro studio, ed altri per curiosità, convenivano tal volta a veder qualche taglio di notomia per mano di uno veramente non men dotto che diligente e pratico notomista... e mostrando il notomista come, partendosi dal cervello e passando per la nuca, il grandissimo ceppo de i nervi si andava poi distendendo per la spinale e diramandosi per tutto il corpo, e che solo un filo sottilissimo... arrivava al cuore, voltosi ad un gentil uomo ch'egli conosceva per filosofo peripatetico... gli domandò s'ei restava ben pago e sicuro, l'origine de i nervi venir dal cervello e non dal cuore; al quale il filosofo, doppo essere stato alquanto sopra di sé, rispose: «Voi mi avete fatto veder questa cosa talmente aperta e sensata, che quando il testo d'Aristotile non fusse in contrario, che apertamente dice, i nervi nascer dal cuore, bisognerebbe per forza confessarla per vera».

Circa la caduta dei gravi, la sua rivoluzione anti-aristotelica è preceduta da uno scritto del 1585 di Giovanni Battista Benedetti il quale (in latino) afferma che, se l'attrito del mezzo è trascurabile, tutti i corpi cadono nello stesso modo. Ci arriva con un ragionamento per assurdo di cui Galileo si appropriò, esponendolo però in italiano e in forma più elegante. Riassumendo, Galileo dice: supponiamo per assurdo che, come asseriscono gli aristotelici, un corpo più pesante arrivi al suolo più presto di uno più leggero. Allora, se incolliamo i due corpi assieme, il loro maggior peso li farà arrivare a terra ancora prima. Ma potremmo anche pensare che il più pesante acceleri la caduta del più leggero, e che nello stesso tempo quest'ultimo agisca da freno sul primo. Nel qual caso i due

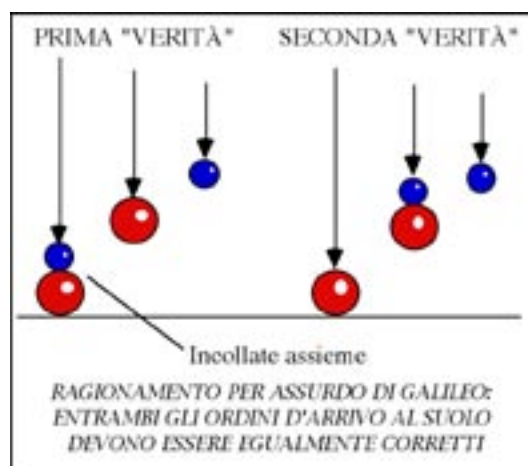


Figura 2. L'esperimento "immaginato" di Galileo.

corpi assieme arriverebbero a terra in un tempo intermedio tra quello dell'uno e dell'altro presi separati. Due verità contrapposte, come illustrato in figura 2, quindi l'assunto iniziale deve essere errato. Conclusione: sotto l'effetto della sola forza peso tutti i corpi cadono di moto uniformemente accelerato con identiche modalità.

Invece, in condizioni in cui l'attrito diventa apprezzabile (per esempio dopo un lungo percorso di caduta), il corpo più pesante arriva a terra per primo perché in genere ne risente di meno. La previsione di Galileo per un oggetto sferico è semplice ed elegante. Il peso, forza agente, va con il cubo del raggio; l'attrito, forza resistente, va invece con il quadrato del raggio, poiché dipende dalla sezione normale del corpo. Quindi più il raggio cresce, più il peso domina sull'attrito: l'accelerazione tende al valore ideale dettato dalla gravità e il processo si avvicina alle condizioni di caduta libera nel vuoto. La descrizione implica quindi una fase di accelerazione iniziale che tosto o tardi si esaurisce a seconda dell'importanza maggiore o minore dell'attrito.

Galileo suggerisce anche, al fine di risalire al comportamento nel vuoto, di operare in un mezzo gassoso via via meno denso, in modo da poter estrapolare i dati alle condizioni di densità nulla (procedura divenuta standard in vari ambiti della fisica moderna). Per inciso, si può ricordare che l'olandese Stevin già nel 1586 aveva notato una piccola differenza nel tempo di caduta di due corpi di diverso peso ascoltando il rumore che producevano cadendo su una tavola di legno da appena 10 m di altezza. La storica esperienza dei pesi lasciati cadere dalla torre di Pisa, spesso attribuita erroneamente a Galileo, fu in effetti eseguita da un suo allievo, Vincenzo Renieri, nel 1641, poco prima della morte del maestro. L'esperienza in condizioni di reale vuoto si può eseguire oggi in laboratorio oppure sulla luna, come dimostrato dagli astronauti americani per mezzo di una piuma e di un oggetto pesante.

Il semplice schema in figura 3 suggerisce che cosa succede. Il peso è costante, la forza d'attrito, che ha segno opposto, cresce linearmente con la velocità di caduta. Quando la forza d'attrito eguaglia il valore del peso, la forza risultante sul corpo è nulla, esso smette di accelerare e prosegue la discesa con velocità costante (com'è per

un paracadute). Se il mezzo è assai denso, olio ad esempio, tale condizione terminale viene raggiunta prestissimo e la velocità di caduta appare quasi subito costante e proporzionale appunto al peso, come volevano gli aristotelici. In caso contrario, la fase di accelerazione è importante e va esaminata con la necessaria perizia.



Figura 3. La velocità di caduta di un corpo diviene costante quando la forza resistente dovuta all'attrito del mezzo arriva a bilanciare la forza-peso.

Poiché la caduta in aria è così rapida da non permettere di seguire nel tempo la fase di accelerazione iniziale (non va dimenticato che ai giorni di Galileo gli orologi non esistevano), lo scienziato pisano ebbe la geniale idea di rallentare la caduta facendo scendere una sferetta lungo una guida inclinata e ben levigata e misurando il tempo con un 'cronometro ad acqua' (cioè pesando la quantità d'acqua sgocciolata da una bacinella in un bicchiere per la durata del moto della sferetta). Ripetendo la misura su diverse lunghezze del percorso, arrivò a definire la legge del *moto uniformemente accelerato*, in base al quale la velocità cresce linearmente con il tempo e lo spazio percorso quadraticamente con esso. Scrisse: «moto equabilmente, ossia uniformemente accelerato, dico quello che, a partire dalla quiete, in tempi eguali acquista eguali incrementi di velocità». In termini matematici, dunque, non più $v = kF$ alla maniera di Aristotele, ma invece $v = at$, con a = accelerazione costante e t = tempo. Illustri scienziati dell'epoca – Cartesio, Mersenne – si rifiutarono di credere che l'esperienza fosse stata davvero realizzata, ma oggi diversi studiosi nel mondo sono riusciti a riprodurla esattamente come Galileo la progettò, incluso l'impiego del cronometro ad acqua. Alle basse velocità acquisite dalla sferetta l'attrito poteva essere ritenuto trascurabile, quindi Galileo aveva di fatto stabilito sperimentalmente la legge di *caduta libera* dei gravi e determinato l'accelerazione (ovviamente, avendo tenuto in debito conto il fattore pendenza).



Figura 4. Copia della guida inclinata di Galileo presso il Museo di Storia della Scienza di Firenze.

Tutto ciò implica che la proporzionalità non sia tra forza e velocità, bensì tra forza e accelerazione. In assenza di forza risultante non può esservi accelerazione, per cui la velocità di crociera resta costante (*principio di inerzia*). Nel caso di una carrozza a cavalli, l'argomento che aumentando il numero dei cavalli la velocità aumenta è prontamente rimosso osservando che la velocità di regime della carrozza si ha quando la forza traente (cavalli) e quella resistente (attrito dell'aria o del suolo) si equilibrano. In altre parole, la carrozza a regime avanza senza accelerazione, quindi di moto inerziale.



Figura 5. La velocità di crociera si ha allorché la forza trainante eguaglia quella resistente dovuta ai vari attriti.

Accanto al principio di inerzia, Galileo pone quello di *relatività*, in base al quale le leggi che descrivono un fenomeno sono identiche per tutti gli osservatori inerziali, vale a dire che si trovano in un sistema fermo oppure che si sposta con moto rettilineo uniforme. Celebre è il suo pezzo descrittivo degli eventi che avvengono nella stanza sotto coperta di una nave che scivoli sul mare senza sussulti, eventi che si svolgono esattamente come se la nave fosse immobile.¹ Tuttavia, Galileo non dispone degli strumenti matematici atti a formulare le leggi del moto in forma analitica: ha difficoltà a definire la velocità e l'accelerazione istantanee, in quanto dal punto di vista dello sperimentatore qualsiasi misura richiede un intervallo di tempo finito, quindi fornisce un valore medio delle grandezze cercate.

2. Isaac Newton e i differenziali

Le difficoltà di Galileo vengono superate con l'avvento del calcolo infinitesimale, dovuto a Newton e indipendentemente a Leibniz, dove viene introdotto il concetto di differenziale di una grandezza, una quantità infinitamente piccola, ma che non è zero. Se Δt è un intervallo di tempo finito e lo si suddivide in due intervalli più piccoli, il differenziale dt del tempo viene definito come il limite cui Δt tende dopo un numero infinito di suddivisioni del genere. Lo stesso si può dire dello spazio Δx percorso nel corrispondente intervallo di tempo. Allora dalla velocità media $\langle v \rangle = \Delta x / \Delta t$ si passa alla velocità istantanea $v(t)$ come limite per Δt che tende a zero:

$$v(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt}$$

dove dx/dt si dice *derivata* dello spazio rispetto al tempo. Per avere l'accelerazione istantanea $a(t)$ occorre derivare la velocità rispetto al tempo

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = \frac{d^2x(t)}{dt^2}$$

È ora immediato per Newton ricavare espressioni quantitative per le leggi di Galileo. Scrivendo l'equazione che prende il suo nome, cioè forza eguale a massa per accelerazione, si ha

$$F = ma = m \frac{d^2x}{dt^2}$$

che integrata una prima volta dà la velocità istantanea al tempo t (avendo preso la velocità iniziale eguale a zero)

$$\frac{dx}{dt} = v = \frac{F}{m}t = at$$

e una seconda volta lo spazio percorso nel tempo t (avendo preso lo spazio iniziale eguale a zero)

$$x = \frac{1}{2}at^2$$

dove, nel caso di caduta libera, per l'accelerazione a va presa quella gravitazionale g .

Dall'equazione di Newton seguono subito i principi galileiani di inerzia e di relatività. Se infatti si prende $F = 0$, l'accelerazione a è nulla e la velocità si mantiene costante (moto inerziale). Quanto alla relatività, se un osservatore si trova in un sistema inerziale avente velocità costante v_0 , dall'equazione di Newton segue

$$a' = \frac{d(v \pm v_0)}{dt} = \frac{dv}{dt} = a$$

vale a dire che l'osservatore in moto giudica l'eventuale accelerazione a' del corpo in esame esattamente eguale a quella misurata da un osservatore fermo, ossia a .

Infine, l'equazione di Newton ci permette anche di descrivere la caduta di un corpo in un mezzo con viscosità. Basta affiancare alla forza peso mg una forza di attrito $-bv$, dove il meno indica che è una forza resistente, tanto più grande quanto più grandi sono la velocità v e un fattore b che rende conto della viscosità del mezzo e dall'aerodinamicità del grave:

$$mg - bv = ma$$

Integrando si deduce rapidamente l'espressione

$$v = \frac{mg}{b} \left[1 - \exp\left(-\frac{bt}{m}\right) \right]$$

il cui andamento è illustrato in modo significativo dalla figura 6

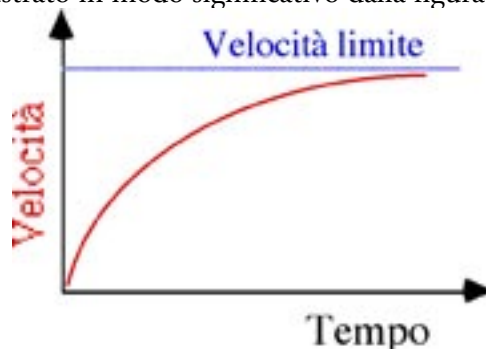


Figura 6. La caduta in un mezzo viscoso non può superare una velocità terminale di saturazione.

L'incremento della velocità nel tempo va scemando fino a che viene asintoticamente raggiunto un valore limite di saturazione, dopo il quale l'accelerazione cessa e la velocità si mantiene costante (effetto paracadute). Si vede immediatamente che il valore di saturazione della velocità è dato da

$$v_{\text{terminale}} = \frac{mg}{b}$$

ossia è proporzionale al peso del corpo mg , come aveva sostenuto Aristotele.

E Einstein? Einstein sarà colui che stabilirà *il principio di equivalenza* tra un sistema in accelerazione e un sistema soggetto a campo gravitazionale, illustrandolo ai profani con il celeberrimo esempio dell'ascensore in caduta libera. Con lui nascerà il concetto di incurvamento dello spazio allorché sono presenti masse atte a creare un campo gravitazionale. Ma questo è un altro discorso.

NOTE

¹ Dal *Dialogo sopra i due massimi sistemi*: «Riserratevi con qualche amico nella maggiore stanza che sia sotto coverta di alcun gran navilio, e quivi fate d'aver mosche, farfalle e simili animalletti volanti; siavi anco un gran vaso d'acqua, e dentrovi de' pescetti; suspendasi anco in alto qualche secchiello, che a goccia a goccia vadia versando dell'acqua in un altro vaso di angusta bocca, che sia posto a basso: e stando ferma la nave, osservate diligentemente come quelli animalletti volanti con pari velocità vanno verso tutte le parti della stanza; i pesci si vedranno andar notando indifferentemente per tutti i versi; le stille cadenti entreranno tutte nel vaso sottoposto; e voi, gettando all'amico alcuna cosa, non più gagliardamente la dovrete gettare verso quella parte che verso questa, quando le lontananze sieno eguali; e saltando voi, come si dice, a pie' giunti, eguali spazii passerete verso tutte le parti. Osservate che avrete diligentemente tutte queste cose, benché niun dubbio ci sia che mentre il vassello sta fermo non debbano succeder così, fate muover la nave con quanta si voglia velocità; ché (pur che il moto sia uniforme e non fluttuante in qua e in là) voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti, né da alcuno di quelli potrete comprender se la nave cammina o pure sta ferma: voi saltando passerete nel tavolato i medesimi spazii che prima, né, perché la nave si muova velocissimamente, farete maggior salti verso la poppa che verso la prua, benché, nel tempo che voi state in aria, il tavolato sottopostovi scorra verso la parte contraria al vostro salto; e gettando alcuna cosa al compagno, non con più forza bisognerà tirarla, per arrivarlo, se egli sarà verso la prua e voi verso poppa, che se voi fuste situati per l'opposito; le goccioline cadranno come prima nel vaso inferiore, senza caderne pur una verso poppa, benché, mentre la gocciola è per aria, la nave scorra molti palmi...»

FORZA, VELOCITÀ E ACCELERAZIONE: UNO SGUARDO CONTEMPORANEO AI PRINCIPI DELLA DINAMICA

EGIDIO LONGO

Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Roma 'La Sapienza'

Lo scopo di questo contributo è quello di dare uno sguardo alle leggi della dinamica, formulate da Galilei e Newton, dal punto di vista della fisica di oggi. Naturalmente nell'ambito della meccanica classica, più che sufficiente per lo studio del moto nel mondo macroscopico di cui facciamo esperienza quotidiana, le relazioni tra forze, velocità ed accelerazioni stabilite da Newton conservano una piena validità. Tuttavia il fisico moderno si pone di fronte a questi problemi con un punto di vista che non può che essere inevitabilmente diverso: gli sviluppi della fisica del Novecento, impensabili per gli scienziati delle epoche precedenti, hanno costretto ad un ripensamento profondo di tutte le concezioni della fisica, che si rispecchia anche necessariamente nel nostro modo di considerare la fisica classica. A titolo di esempio si affronteranno alcuni aspetti, come la coerenza interna dei principi della dinamica, la visione moderna delle forze come interazioni e la formulazione delle leggi della meccanica in termini di simmetria e conservazione.

1. Principi di Newton e corpi isolati

Ripartiamo dunque dalla sintesi newtoniana delle relazioni tra forza, velocità ed accelerazione, espressa nei principi della dinamica: in assenza di forze, un corpo mantiene il proprio stato di moto rettilineo uniforme, con velocità costante; in presenza di forze, il corpo muta il proprio stato di moto, con accelerazione proporzionale alla risultante delle forze esterne: lo stato "naturale" di un corpo non è dunque la quiete, ma il moto rettilineo uniforme.

Ci si può domandare se il legame tra forza ed accelerazione, così stretto da poter essere considerato una "definizione" (in molti testi, soprattutto di scuola americana, la relazione $f = ma$ è considerata la definizione "dinamica" delle forze) non nasconda una ambiguità, una circolarità: come facciamo a sapere che su un corpo non agiscono forze? siamo in grado di fare esperimenti su di un "corpo isolato" per verificare che non è soggetto ad accelerazioni?

Ecco, già su questo semplice ma essenziale problema, la fisica moderna fornisce degli elementi che rendono possibile, beninteso almeno in linea di principio, la costruzione concettuale del concetto di "corpo isolato". Oggi sappiamo infatti che le forze fondamentali della natura diminuiscono tutte al crescere della distanza. Quindi, in linea di principio, possiamo rendere un corpo isolato semplicemente allontanandolo

dagli altri corpi. Man mano che lo allontaniamo, le forze diminuiscono e possiamo verificare che diminuiscono in ugual misura le accelerazioni che ne risultano. Possiamo quindi “estrapolare” idealmente la condizione di un corpo fino a considerarlo isolato, in uno di quegli esperimenti ideali che, malgrado siano solitamente indicati con una espressione tedesca, *gedanken experiment*, sono stati introdotti nella fisica moderna da Galileo, come abbiamo visto nel contributo del prof. Frova.

In pratica, possiamo realizzare agevolmente la condizione di assenza di forze per un corpo materiale, annullando eventuali forze agenti su di esso con l'applicazione di forze uguali e contrarie: p.es. appoggiando un corpo su un tavolo, si cancella la forza peso attraverso la reazione vincolare del tavolo. La risultante delle forze è nulla e in assenza di attrito (condizione anche questa facilmente realizzabile in laboratorio con un tavolo a cuscino d'aria) il corpo materiale si muoverà sulla superficie del tavolo di moto rettilineo uniforme, come se fosse effettivamente isolato.

2. Relatività galileiana

Tornando ai principi di Newton, oggi sappiamo che una loro formulazione coerente non può prescindere da un principio ‘zero’ della meccanica, che è il principio di relatività galileiana, che si manifesta in tutta la sua rilevanza proprio alla luce delle acquisizioni della teoria della relatività formulata da Einstein. Il principio sperimentale di relatività galileiana (si ricordi la splendida descrizione di Galileo delle osservazioni e degli esperimenti di meccanica che si possono fare all'interno di un vascello in moto) sostiene che le leggi della fisica sono identiche in tutti i sistemi di riferimento che si muovono di moto rettilineo uniforme uno rispetto all'altro e che non è possibile distinguere uno di questi riferimenti da un altro sulla base di alcun esperimento fisico. Ora l'esperienza ci dice che esistono dei riferimenti che godono di una particolare proprietà: se, in essi, i punti materiali non soggetti a forze sono fermi, rimangono fermi. Chiameremo questi riferimenti *sistemi inerziali*. Una volta stabilita l'esistenza di sistemi di riferimento inerziali, qualunque altro sistema di riferimento che si muova di moto rettilineo uniforme rispetto ad uno di essi deve essere esso stesso inerziale (altrimenti sarebbe distinguibile dal primo, violando così il principio di relatività, per il fatto che in esso un corpo fermo non soggetto a forze non rimane fermo): ora, tutti i punti fermi in un sistema di riferimento inerziale sono visti muoversi di moto rettilineo uniforme negli altri riferimenti inerziali in moto rettilineo e uniforme rispetto al primo. Ecco quindi che il primo principio della dinamica, o *principio di inerzia*, diventa una conseguenza dell'esistenza di riferimenti inerziali e del principio di relatività galileiana.

3. La Terra è un riferimento inerziale?

Nella discussione precedente ci siamo riferiti a semplici esperienze di laboratorio, fatte dunque sulla superficie della Terra, assumendo implicitamente di trovarci in un riferimento inerziale. Può valer la pena, a questo punto, di analizzare la validità di questa assunzione, perché questa piccola digressione ci permetterà di esemplificare un modo

di affrontare i problemi tipico dei fisici, fatto di una successione di approssimazioni e schematizzazioni, poi modificate per tenere conto di effetti via via più sottili, dove le diverse modellizzazioni concettuali sono però tutte man mano messe alla prova, magari ricorrendo ad espedienti di laboratorio.

Dunque, la superficie terrestre è un riferimento inerziale? secondo la nostra definizione sembrerebbe proprio di no, visto che un corpo fermo, lasciato libero, cade! tuttavia sappiamo che ciò è dovuto alla presenza della forza peso. Abbiamo già visto che, appoggiando il corpo su un piano, la forza peso è cancellata dalla reazione vincolare: per movimenti del corpo sul piano orizzontale dovrebbe valere allora il principio d'inerzia; eppure non è così, perché il corpo, lanciato in direzione orizzontale, tende a rallentare fino a fermarsi per effetto della forza d'attrito. È necessario ridurre l'attrito fino a renderlo trascurabile, eseguendo l'esperimento sul ghiaccio o su una tavola a cuscino d'aria, per poter finalmente osservare il moto rettilineo uniforme del corpo, in accordo col principio d'inerzia. A questo punto potremmo pensare di aver raggiunto l'evidenza sperimentale che la superficie terrestre costituisca un riferimento inerziale. In realtà non è così, perché sappiamo che la Terra ruota su se stessa e devono quindi comparire delle forze apparenti, come la forza centrifuga, la stessa che ci spinge verso l'esterno di una giostra in movimento. La forza centrifuga è massima all'equatore, dove è diretta in senso opposto alla forza peso, ed è nulla al polo, posto sull'asse di rotazione terrestre: ebbene, il nostro peso all'equatore deve risultare quindi un po' inferiore di quello misurato al polo. Questa differenza di peso è dell'ordine del 3 per mille, 180 grammi per una persona di 60 kg, una quantità facilmente misurabile con una bilancia di precisione.

È interessante sapere che è possibile sfruttare l'esistenza delle forze apparenti per annullare (localmente) l'effetto della forza peso: è l'assenza di gravità che si sperimenta sui satelliti artificiali in orbita intorno alla Terra: in essi si può osservare in pratica il moto rettilineo uniforme dei corpi liberi, senza più bisogno di compensazioni: sarà capitato a tutti di osservare filmati nei quali gli astronauti fluttuano nell'aria, e possono far muovere di moto rettilineo ed uniforme persino delle goccioline d'acqua dalla bottiglia alla loro bocca! Il satellite stesso mantiene la propria orbita senza intervento di motori proprio grazie all'uguaglianza tra la forza peso e la forza centrifuga.

4. Uniformità e conservazione

Nella fisica moderna, il principio di inerzia si esprime solitamente attraverso la quantità di moto, ossia il prodotto della massa di un corpo per la sua velocità, affermando che la quantità di moto di un corpo isolato è costante. Naturalmente, se la massa del corpo non può cambiare, questa affermazione equivale a dire che il corpo si muove di moto rettilineo uniforme. Uno degli aspetti più rilevanti di questa formulazione del principio d'inerzia è che la conservazione della quantità di moto (oltre ad essere più generale, poiché include i casi in cui la massa del corpo può variare nel tempo) può essere ricondotta all'uniformità dello spazio vuoto. Per arrivare a questo, bisogna però prima far

vedere come la forza possa essere ricavata come derivata dell'energia potenziale. Questo può essere fatto in modo semplice prendendo come esempio l'energia potenziale della forza di gravità, data dal prodotto mgh , dove m è la massa del corpo, g è l'accelerazione di gravità e h è la quota a cui si trova il corpo: se consideriamo un vagoncino delle montagne russe, vediamo che la sua energia potenziale è proporzionale alla sua quota: tanto più il vagoncino è in alto, tanto maggiore è la sua energia potenziale: nei tratti in discesa, l'energia potenziale diminuisce ed il vagoncino è spinto in avanti, aumentando la propria velocità; nei tratti in salita, l'energia potenziale aumenta, ed il vagoncino è frenato e rallenta. Così vediamo che la gravità esercita una forza nella direzione in cui l'energia potenziale diminuisce. Si dice che la forza è data dalla derivata (ossia dalla variazione), cambiata di segno, dell'energia potenziale rispetto alla posizione: in formule, si scrive $f = -dU/dx$. Nei tratti in piano, l'energia potenziale è costante, la sua derivata si annulla ed il moto del vagoncino è uniforme. Ora se ipotizziamo che lo spazio vuoto sia uniforme, dobbiamo aspettarci che l'energia potenziale del vuoto sia la stessa in tutti i punti dello spazio, ovvero sia costante. Ecco allora che dall'ipotesi dell'uniformità dello spazio deriva l'assenza di forze (energia potenziale costante) e quindi la conservazione della quantità di moto. Notiamo anche come in questi ragionamenti l'accento è posto su un aspetto fisico dello spazio (l'uniformità, in generale, si riferisce a proprietà *fisiche* misurabili) anziché su affermazioni *metafisiche* sulla natura assoluta o relativa dello spazio, come ai tempi di Newton.

5. La gravità come deformazione dello spazio uniforme

Ora però si pone un nuovo problema: siamo sicuri che lo spazio sia uniforme? non si tratta di una domanda banale; per esempio, la presenza della Terra per i corpi che si trovano nelle sue vicinanze fa sì che si generino forze che dipendono dalla posizione dello spazio: lo spazio in prossimità della Terra non è uniforme, così come non lo è lo spazio intorno al Sole. Di nuovo, possiamo pensare che se ci allontaniamo dagli altri corpi, se ci mettiamo nello spazio vuoto, questo deve essere uniforme. Ma, se la presenza di un corpo dotato di massa modifica le proprietà dello spazio, possiamo addirittura pensare che la presenza del corpo modifichi la geometria stessa dello spazio vuoto. È questo il punto di vista della relatività generale, introdotto da A. Einstein: la massa del Sole incurva lo spazio circostante, come un corpo pesante incurva una rete elastica: lo spazio intorno al Sole assume la forma di una scodella e se uno immagina di lanciare un pianeta in direzione orizzontale sulla parete della scodella, può capire come il pianeta si muova su un'orbita quasi circolare, né più né meno di una pallina lanciata con velocità nella roulette.

6. Teorie di campo

Spesso si dice che l'energia potenziale è una energia di posizione, ossia un'energia legata alla posizione nello spazio: se le forze si possono derivare dall'energia potenziale, allora possiamo pensare che un corpo sia soggetto a forze in quanto si trova in quella particolare posizione dello spazio. Lo spazio diviene quindi un *campo di forze*: il corpo

interagisce col campo di forze che trova in quella regione di spazio. Se ci pensiamo un attimo, questo punto di vista risolve anche un altro vecchio dilemma della fisica: le azioni che si esercitano tra corpi sono forze a distanza o forze di contatto? la fisica moderna, basata sulle teorie di campo, sostanzialmente rifiuta la prima interpretazione, che peraltro sarebbe incompatibile con la relatività ristretta: nulla si può propagare con velocità maggiore della velocità della luce e dunque neanche la forza che si esercita tra due corpi lontani può essere istantanea, ma deve essere trasportata in un tempo finito da un corpo all'altro.

Ma come avviene allora l'interazione tra Sole e Terra? o, all'altro estremo della scala delle distanze, come avviene l'interazione tra due particelle cariche? Riferiamoci a quest'ultima interazione: nelle teorie di campo, una particella carica, diciamo un elettrone, che si sposta nello spazio genera in una regione circostante un campo di forze, emettendo e riassorbendo continuamente dei fotoni, i quanti, o i *mediatori*, del campo elettromagnetico. L'elettrone viene leggermente deviato a causa di questa emissione, ma riacquista la sua direzione originale quando riassorbe il fotone. Se non ci sono altre particelle in giro, questo processo non ha nessuna conseguenza misurabile; è, come si dice, un *processo virtuale*. Ma se una seconda particella carica (per esempio un altro elettrone) si avvicina, può assorbire uno di questi fotoni ed essere deviata da esso; a sua volta il primo elettrone, che era stato deviato all'atto dell'emissione del fotone e che non lo può più riassorbire, permane in questo stato, con una direzione diversa da quella iniziale: l'apparente interazione a distanza tra i due elettroni è quindi mediata dai fotoni del campo elettromagnetico che trasportano il campo di forze. L'interazione tra particella e campo di forze è in realtà una interazione *locale*, ossia avviene in un punto dello spazio.

7. Isotropia e momento angolare

Ma torniamo per un attimo al principio d'inerzia; di fronte alla formulazione attraverso la conservazione della quantità di moto qualcuno potrebbe obiettare: ma alla fine, con questa storia dell'uniformità, abbiamo solo reinterpretato una cosa ovvia come il moto rettilineo uniforme. Cosa aggiunge a quanto già sapevamo la formulazione in termini di uniformità dello spazio? Se vogliamo cogliere la potenza concettuale del nuovo approccio, proviamo a considerare una diversa proprietà di omogeneità dello spazio: l'*isotropia*. Una geometria isotropa è una geometria in cui tutte le direzioni sono equivalenti. Ci si può chiedere se c'è differenza tra uniformità e isotropia, se cioè è possibile avere uno spazio uniforme senza che sia anche isotropo.

Aiutiamoci con un esempio tratto dalla geometria delle grandi città americane, costruite razionalmente con grandi strade, tutte parallele tra loro, che si incrociano con altre strade perpendicolari alle prime. Possiamo dire che si tratta di una distribuzione uniforme di costruzioni: se ci spostiamo da una parte all'altra della città la struttura degli isolati è più o meno la stessa. Ma per quanto riguarda le direzioni nelle quali ci possiamo spostare, queste non sono tutte equivalenti: possiamo andare liberamente nella

direzione di una delle due serie di strade, o nell'altra, ruotata di novanta gradi rispetto alla prima, ma se ci muoviamo in una direzione che forma un angolo intermedio con l'asse delle strade, prima o poi andremo a sbattere contro una parete: ecco, possiamo dire che una geometria del genere è uniforme, ma non isotropa.

Nello spazio vuoto, è ragionevole assumere che le direzioni siano tutte uguali. Lo spazio vuoto è quindi isotropo, oltre che uniforme. Di nuovo, questa proprietà dello spazio non è valida in presenza di campi di forze: lo spazio sulla superficie della Terra non è isotropo, esiste infatti una direzione privilegiata, che è quella lungo la quale cadono i corpi. Una conseguenza di questo fatto è che se appoggiamo una matita in verticale sul tavolo, sulla punta, la matita acquista una rotazione e cade! Nello spazio vuoto, invece, il potenziale non deve dipendere dalla direzione, per cui non possono esserci forze dirette nel senso in cui cambia la direzione, ossia forze che generano una rotazione. Questo può essere spiegato in maniera semplice ricorrendo di nuovo all'energia potenziale: mettiamoci in un punto di un piano e consideriamo le possibili direzioni che partono da questo punto; se le rappresentiamo con delle frecce, le punte di tutte queste frecce si troveranno su una circonferenza centrata nel punto in questione. Ora domandiamoci come può essere fatta l'energia potenziale di tutti i punti di questa circonferenza: se il piano non fosse isotropo, l'energia potenziale potrebbe essere diversa per ogni direzione, per esempio potrebbe diminuire per una rotazione in senso orario. Se rappresentiamo questa energia potenziale con il solito binario delle montagne russe, otteniamo una spirale discendente: il carrellino, posto in un punto del binario comincerebbe a scendere, ruotando in senso orario rispetto al centro: l'anisotropia genera una rotazione! Se, viceversa, ipotizziamo che il piano sia isotropo, intendendo con ciò che tutte le sue proprietà devono essere indipendenti dalla direzione, e costruiamo come prima l'energia potenziale sulla solita circonferenza, questa energia potenziale deve essere costante. Il corrispondente binario delle montagne russe è ora esso stesso una circonferenza piana. Un carrellino posto fermo sul binario, rimane fermo; un carrellino posto in moto con una certa velocità, mantiene la sua velocità (in assenza di attrito) e si muove quindi di moto circolare uniforme: l'isotropia comporta quindi la conservazione dello stato di rotazione.

La grandezza fisica che rappresenta lo stato di rotazione è, come è noto, il momento angolare: nello spazio isotropo, il momento angolare di un sistema isolato si conserva. Ci sono innumerevoli esempi di questa conservazione, dal mondo microscopico alla trottola, dal costante stato di rotazione della Terra su se stessa, allo stato di rotazione dei miliardi di stelle che costituiscono le galassie. Se consideriamo la rivoluzione della Terra intorno al Sole, altro esempio di conservazione del momento angolare, è interessante notare che la presenza della massa del Sole, con la attrazione gravitazionale che ne risulta, modifica l'omogeneità dello spazio circostante (non si conserva la quantità di moto: un corpo fermo tende a cadere verso il Sole) ma non l'isotropia (la forza gravitazionale è infatti la stessa per tutte le direzioni che partono dal Sole) per cui il momento angolare dei pianeti si deve conservare.

8. Invarianza e simmetria

L'uniformità e l'isotropia si possono considerare delle *proprietà di invarianza*: possiamo dire infatti che lo spazio uniforme è invariante per traslazioni, nel senso che le sue proprietà non cambiano se spostiamo (trasliamo) il punto in cui le misuriamo; lo spazio isotropo è invariante per rotazioni, le sue proprietà non cambiano se ruotiamo intorno ad un asse il punto in cui le misuriamo. Come si dice con linguaggio moderno, l'invarianza per traslazioni e quella per rotazioni sono *proprietà di simmetria*: una simmetria è una trasformazione di un sistema che ne lascia invariate alcune proprietà.

Le figure geometriche ci danno dei semplici esempi di simmetrie: un cilindro è simmetrico per rotazioni intorno al suo asse: qualunque rotazione del cilindro lo riporta su se stesso, e quindi ne lascia invariate le proprietà geometriche. Notiamo che questa proprietà sussiste per rotazioni piccole a piacere: è possibile ruotare con continuità il cilindro, sempre lasciandone invariata la sua configurazione geometrica. Diremo quindi che si tratta di una simmetria continua. Molte figure geometriche non godono di simmetrie continue, ma possiedono ugualmente delle proprietà di simmetria. Consideriamo un cubo: se lo ruotiamo di un angolo qualunque intorno ad un asse che passa per il centro di due facce parallele, la posizione del cubo nello spazio cambia. Non abbiamo simmetria continua. Se però lo ruotiamo di un angolo di 90 gradi, il cubo ritorna nella sua posizione iniziale: ogni rotazione di 90 gradi riporta il cubo nella sua posizione iniziale. Siamo di fronte ad una simmetria discreta. Le strutture cristalline che si incontrano in natura offrono innumerevoli esempi di simmetrie discrete, tanto che i cristalli possono essere classificati in base alle loro proprietà di simmetria.

Un tipo particolare di simmetria discreta è quella che si ottiene osservando un oggetto riflesso nello specchio. Questa particolare simmetria è detta *parità spaziale*, con riferimento al fatto che, in coordinate cartesiane, l'immagine speculare si ottiene invertendo la direzione di uno dei tre assi, ossia cambiando il segno di una delle tre coordinate. Se ora si cambia il segno ad una seconda coordinata, si ritorna all'immagine originale, mentre una terza inversione di segno ci riporta all'immagine speculare: un numero dispari di inversioni porta quindi all'immagine speculare, un numero pari riporta all'immagine originale. Fino agli anni '50 del Novecento, vi era la convinzione che le proprietà degli oggetti fisici fossero invarianti per riflessioni speculari, ossia sotto la simmetria di parità spaziale. Ma alcuni esperimenti sulle interazioni deboli hanno messo in luce come questo non sia sempre vero a livello microscopico: queste interazioni violano la simmetria di parità spaziale. Dopo quella scoperta fondamentale, lo studio delle proprietà di trasformazione delle interazioni fondamentali, e la corrispondente determinazione di leggi di conservazione o di rottura delle simmetrie è diventato il paradigma più prolifico per il progredire delle nostre conoscenze del mondo microscopico.

OLTRE L'ABIURA: GLI ULTIMI ANNI DI GALILEO

MARIAPIERA MARENZANA

già Docente di Lettere presso l'Accademia Nazionale di Danza, Roma

1. Condanna e abiura

«Il Galileo fu abiurato mercordì mattina nel Convento della Minerva alla presenza di tutti i Cardinali della Congregazione, e gli abbruciorono in faccia il suo libro, dove tratta del moto della terra».

Con queste parole del gazzettiere Antonio Badelli, affisse sui muri in diversi luoghi della città, i Romani apprendevano, il 25 giugno 1633, dell'abiura di Galileo. Tre giorni prima il vecchio scienziato, in abito di penitente, di fronte a dieci cardinali, alcuni poco più che ragazzi, tutti inesperti di scienza, aveva ascoltato la sentenza emessa a suo carico dal Tribunale dell'Inquisizione:

Diciamo, pronuntiamo, sententiamo e dichiaramo che tu, Galileo suddetto, per le cose dedotte in processo e da te confessate come sopra, ti sei reso a questo S. Off. o vehementemente sospetto d'heresia, cioè d'haver tenuto e creduto dottrina falsa e contraria alle Sacre e divine Scritture, ch'il sole sia centro della terra e che non si muova da oriente ad occidente, e che la terra si muova e non sia centro del mondo, e che si possa tener e difendere per probabile un'opinione dopo esser stata dichiarata e diffinita per contraria alla Sacra Scrittura; e consequentemente sei incorso in tutte le censure e pene dei sacri canoni et altre costituzioni generali e particolari contro simili delinquenti imposte e promulgate. Dalle quali siamo contenti sii assoluto, pur che prima, con cuor sincero e fede non finta, avanti di noi abiuri, maledichi e detesti li suddetti errori et heresie, e qualunque altro errore et heresia contraria alla Cattolica e Apostolica Chiesa...



Figura 1. Ritratto di Galileo.

Galileo è stanco e avvilito (dagli Atti del processo: «*Del resto son qua, nelle loro mani, faccio quel che gli piace*»). Non ha dubbi sulla correttezza della propria visione, sa di

aver fatto il possibile per oltre 20 anni per persuadere la Chiesa della bontà della teoria copernicana. Si è battuto nell'interesse della scienza, che nell'Italia della Controriforma non può affermarsi senza il beneplacito della Chiesa, ma anche nell'interesse della Chiesa stessa, che prima o poi sarà costretta a riconoscere il proprio errore. È deluso dal comportamento di Urbano VIII, già suo estimatore, la cui elezione al soglio pontificio lo aveva fatto sperare in un clima favorevole alle scienze, ma che ora ha preferito sacrificare l'antica amicizia a ragioni politiche (osteggiato dai potenti cardinali spagnoli che gli rimproverano l'alleanza con la Francia e con l'eretica Svezia, quale modo migliore per lui della condanna inflitta a Galileo per riproporsi come difensore dell'ortodossia cattolica? Tanto più che sospetta di essere stato ritratto, nel *Dialogo*, nel risibile personaggio di Simplicio...).



Figura 2. Papa Urbano VIII, già Cardinale Maffeo Barberini.

La condanna pronunciata dal Tribunale dell'Inquisizione prevede: la proibizione del *Dialogo sopra i due massimi sistemi*, «opera – nelle parole di Galileo – per i gesuiti più pericolosa per la Chiesa dell'intera riforma di Calvino e Lutero» (espunto dall'Indice solo nel 1835); il carcere nelle prigioni del Sant'Uffizio; l'obbligo di recitare per tre anni una volta la settimana i sette salmi penitenziali.

Dopo aver ascoltato la sentenza, Galileo legge il testo dell'abiura, che gli è stato preparato, e che egli ha trascritto di sua mano:

... con cuor sincero e fede non finta abiuro, maledico e detesto li suddetti errori et heresie ... e giuro che per l'avvenire non dirò mai più né asserirò, in voce o in scritto, cose tali per le quali si possa haver di me sospitione di heresia; ma se conoscerò alcun heretico... lo denontiarò a questo S. Offitio...

Termina così il processo («ragionevole e giusto» nelle parole del cardinale Ratzinger, 1991) che tanto avrebbe fatto discutere nei secoli a venire, e che avrebbe portato la Chiesa, in anni recenti, a *riabilitare* Galileo, quasi fosse lo scienziato a dover essere riabilitato (operazione da più parti definita propagandistica, e conclusasi senza un autentico *mea culpa* della Chiesa¹).

Anche a Galileo non sarebbero state risparmiate le critiche per aver abiurato. Non tanto dai suoi contemporanei, ben consapevoli che l'alternativa all'abiura erano il rogo e il silenzio (a tutti era presente la tragica fine di Giordano Bruno, che peraltro nessuno osava menzionare), quanto dai posteri, che gli rimprovereranno (Brecht) di aver sacrificato il vero alla violenza dei potenti. Ma le parole che storicamente Galileo non

pronunciò davanti ai suoi giudici («eppur si muove») compendiano bene la sua convinta adesione alle idee condannate e la determinazione a proseguire nella sua opera.

2. A Siena

Mentre agli Inquisitori di Firenze, Padova e Bologna viene impartito l'ordine di dare lettura nelle università della condanna e dell'abiura, il Papa concede a Galileo di lasciare Roma per essere ospitato a Siena dall'Arcivescovo Piccolomini, in attesa che si estingua la peste che ancora affligge Firenze.

A Siena Galileo, oltre a godere della compagnia dell'Arcivescovo e a gustarne gli squisiti vini, riprende l'impegno intellettuale e inizia subito a stendere alcune parti della sua opera più importante, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, che avrebbe dato il colpo finale alla causa del geocentrismo. Nel libro confluiscono studi teorici precedenti e osservazioni sperimentali che va via via raccogliendo (a Siena, ad esempio, si informa sul getto delle campane).

Il 1 dicembre 1633 il Sant'Uffizio, accogliendo la richiesta dell'ambasciatore del granduca di Toscana, Niccolini, concede a Galileo di tornare a Firenze: dovrà però vivere confinato nella sua villa di Arcetri, presso il convento delle figlie, in solitudine, senza ricevere visitatori con cui «intrattenersi in conversari». Ma potrà finalmente rivedere gli amici, e la figlia amatissima Virginia, suor Maria Celeste, che tanto conforto gli ha arrecato con le sue lettere nei mesi del processo.

3. Nel «continuato carcere»

Pochi giorni dopo il suo ritorno in Toscana Galileo riceve la visita del Granduca Ferdinando, il quale si era molto adoperato perché il suo stimato Filosofo e Matematico venisse trattato a Roma con il riguardo richiesto dalla sua età e dal suo prestigio.

Nonostante i miglioramenti nella sua condizione, e la determinazione a non lasciarsi abbattere (scrive: «*In queste angustie sempre nutro pensieri liberi e degni dell'uomo*»), Galileo è profondamente amareggiato, come testimoniano le sue parole in questa lettera del 7 marzo 1634 a Elia Diodati:

Stante dunque il non aver patito punto nelle due cose che sole devono da noi esser sopra tutte l'altre stimate, dico nella vita e nella reputazione (come in questa il raddoppiato affetto dei Padroni e di tutti gl'amici mi accertano), i torti e l'ingiustizie, che l'invidia e la malignità mi hanno machinato contro, non mi hanno travagliato né mi travagliano. Anzi... la grandezza dell'ingiurie mi è più presto di sollevamento, et è come una specie di vendetta, e l'infamia ricade sopra i traditori et i costituiti nel più sublime grado dell'ignoranza, madre della malignità, dell'invidia, della rabbia e di tutti gli altri vizii e peccati scelerati e brutti.

Galileo individua senza incertezze i «traditori» nei gesuiti, perché, pur consapevoli della correttezza delle scoperte galileiane, gli hanno fatto mancare il loro appoggio (anche a causa di violente polemiche scientifiche di alcuni di loro con Galileo). Di questo avviso sono i suoi amici, e lo stesso Cartesio, testimone lontano e intimorito

delle sventure galileiane. Di certo, il clima intellettuale è mutato, timore e censura rendono difficile, se non impossibile, la diffusione delle idee su un nuovo modello di natura, diverso dalla tradizione e dalla Bibbia. Le parole di conforto che giungono a Galileo (quali «*se i Giesuiti faranno articolo di fede l'immobilità della terra, s'assicurino pure che tutti li professori d'astronomia hanno d'esser eretici. La (teoria) Copernicana del suo libro ha preso tanto lume, che vi balzan dentro tutti chi lo leggono*», da una lettera di Fulgenzio Micanzio, 1634) esprimono una speranza, più che descrivere la realtà obiettiva. Infatti, appena Galileo lascia Siena, al Sant'Uffizio perviene una denuncia anonima che lo accusa di aver «*seminato opinioni poco cattoliche*», sotto la protezione del suo amico arcivescovo Piccolomini.

Intanto sono state pubblicate alcune confutazioni del Dialogo che sostengono l'opinione peripatetica con argomenti del tipo che «*stante la corrutibilità del nostro pianeta, esso, al pari di un animale, non può muoversi di continuo, perché la stanchezza lo costringerebbe a fermarsi*». Argomenti motivo di derisione tra i discepoli di Galileo (che li giudicano meritevoli «*di una corona di trippe*») e di rilievi pungenti di Galileo stesso, il quale non può confutare pubblicamente quelle opinioni e deve limitarsi a postillare i libri con annotazioni del tipo: «*animalaccio*», «*ignorantissimo bue*», «*castrone*», «*balordo*». Sebbene invecchiato, Galileo è sempre capace di indignarsi di fronte alla stupidità, oltre che usare al meglio la sua lucidità argomentativa e il suo sarcasmo. Tuttavia è assai amareggiato, come testimoniano queste sue parole all'amico Diodati, sfortunatamente ancor oggi attuali: «*alcuni, vedendosi un larghissimo campo di poter senza pericolo prevalersi dell'adulazione per augumento de' proprii interessi, si son lasciati tirare a scriver cose, che fuori dalle presenti occasioni sarebbero facilmente reputate assai esorbitanti, se non temerarie*»; e ancora: «*Infelice questo nostro clima, nel quale regna una fissa risoluzione di volere estermiare tutte le novità, in particolare nelle scienze, quasi che già si sia saputo ogni scibile*».

4. Nuove sventure

Ma altre dolorose prove attendono Galileo (tenuto sempre sotto stretta sorveglianza, e la cui richiesta di recarsi in città a Firenze per curarsi è respinta dal Papa): nell'aprile del 1634 muore la sua diletta figlia Virginia. Ecco come la ricorda in due lettere di quello stesso anno:

A Elia Diodati:

... mi andavo trattenendo assai quietamente con le visite frequenti di un monasterio prossimo, dove havevo due figliole monache, da me molto amate et in particolare la maggiore, donna di esquisito ingegno, singolar bontà et a me affezionatissima. Questa, per adunanza di humori melanconici fatta nella mia assenza, da lei creduta travagliosa, finalmente incorsa in una precipitosa disenteria, in sei giorni si morì, essendo di età di trentatrè anni, lasciando me in una estrema afflizione.

A Geri Bocchineri:

... il polso fatto interciso con palpitazione di cuore; una tristizia e melanconia

immensa, inappetenza estrema, odioso a me stesso, et in somma mi sento continuamente chiamare dalla mia diletta figliuola.



Figura 3. Suor Maria Celeste.

Le condizioni dello scienziato preoccupano molto gli amici, che invano si adoperano presso i Barberini perché il suo stretto confino venga alleviato. Intanto la vista di Galileo va rapidamente peggiorando, e alla fine del 1637 egli è completamente cieco. Così comunica la notizia all'amico Diodati (2 gennaio 1638):

... ahimé, Signor mio, il Galileo, vostro caro amico e servitore, è fatto irreparabilmente da un mese in qua del tutto cieco. Or pensi V.S. in quale afflizione io mi ritrovo, mentre che vo considerando che quel cielo, quel mondo e quello universo che io con le mie maravigliose osservazioni e chiare dimostrazioni avevo ampliato per cento e mille volte più del comunemente veduto da' sapienti di tutti i secoli passati, ora per me s'è sì diminuito e ristretto, ch'è non è maggiore di quel che occupa la persona mia.

5. Gli allievi

Da questo momento in poi egli farà seguire più volte, accanto alla firma, la parola *cieco*, ed avrà bisogno di assistenza per gli scambi epistolari e per il proseguimento degli studi. Prezioso gli sarà, dal 1639, l'aiuto di Vincenzo Viviani e, dall'ottobre 1641, di Evangelista Torricelli, allievi brillanti e devoti che gli succederanno nella carica di Filosofo e Matematico del Granduca, e cercheranno in ogni modo di tener vivo il suo nome e il suo insegnamento. Essi si aggiungono alla schiera di straordinari discepoli che negli anni Galileo ha creato (basti qui ricordare Benedetto Castelli, fondatore della scienza idraulica, e Bonaventura Cavalieri, antesignano del calcolo infinitesimale).



Figura 4. Vincenzo Viviani (1622-1703) e Evangelista Torricelli (1608-1647).

6. L'epistolario

L'epistolario di quegli anni testimonia che Galileo continua a rappresentare un punto di riferimento imprescindibile negli studi e nelle dispute su questioni naturali, le più disparate: le osservazioni di Saturno, le funzioni delle squame nei pesci, gli specchi ustori di Archimede, la riflessione dei raggi nell'acqua, problemi di geometria o di idraulica, la calamita, il terremoto, l'origine dei fiumi, gli sfiatatoi per le acque correnti in canali sotterranei, ecc. I corrispondenti sanno che non esistono per Galileo oggetti più e altri meno meritevoli di essere indagati: il trascorrere di una stella in cielo e il volo di una mosca sono egualmente degni di attenzione, perché entrambi obbediscono alle leggi della natura. E perché «*da cose comuni, e ... in certo modo vili*» si possono trarre «*notizie molto curiose e nuove e bene spesso remote da ogni immaginazione*» (dai *Discorsi*). Ben conoscono anche, i corrispondenti di Galileo, il suo interesse per le applicazioni pratiche e per la tecnica, che può fornire spunti di riflessione scientifica. Si ricordino le parole di Salviati, davvero rivoluzionarie nel contesto della scienza libresca e paludata del '600, con cui si aprono i *Discorsi*: «*Largo campo di filosofare agl'intelletti specolativi parmi che porga la frequente pratica del famoso arsenale di voi, Signori Veneziani, ed in particolare in quella parte che meccanica si domanda...*», a cui si unisce Sagredo, ricordando come il parlare con gli operai più esperti lo abbia «*più volte aiutato nell'investigazione della ragione di effetti non solo maravigliosi, ma reconditi ancora e quasi inopinabili*».

Ma l'epistolario dimostra anche che, a dispetto della condanna e dell'abiura, rimane, anzi si rafforza, intorno a Galileo una sorta di scudo che è di protezione e di conforto: egli è sempre tenuto informato sugli studi e sulle novità scientifiche, è costantemente rassicurato sulla condivisione delle sue idee. E il rapporto non è solo intellettuale. È evidente una preoccupazione affettuosa per lo stato declinante della sua salute, per la sua condizione di isolamento: gli vengono inviati piccoli doni, cacciagione, dolci, frutta, vini sempre molto graditi, e soddisfatta con sollecitudine ogni sua richiesta.

7. Visite, contatti, attività

Raramente è concesso a Galileo di ricevere visite, che non siano di parenti stretti, e sempre con l'obbligo di non discutere del moto della terra. La grazia della liberazione da lui e da altri più volte sollecitata gli sarà sempre negata (pur avendo il medico testimoniato egli essere: «*tanto mal ridotto, che ha più la forma di cadavere che di persona vivente*»), ma finalmente gli è concesso di recarsi nella sua casa di Firenze, per poter ricevere migliori cure.

Nel 1636 iniziano i contatti con il Governo dei Paesi Bassi interessati al metodo galileiano per determinare la longitudine, basato sugli orari di scomparsa dei satelliti di Giove. Ma Galileo finirà coll'interrompere le trattative nel timore di scontentare i Barberini.

Nel 1638 Castelli ottiene faticosamente il permesso di soggiornare una settimana presso di lui, mentre sembra che non siano stati posti ostacoli alla visita del poeta inglese John Milton, il quale poi in *Areopagitica* avrebbe scritto: «*Fu lì (a Firenze) che io trovai*

e visitai il famoso Galileo, ormai vecchio, divenuto prigioniero dell'Inquisizione, perché aveva pensato, in astronomia, diversamente da come pensavano i suoi censori francescani e domenicani».

Nel 1638 a Leida, in Olanda, vengono pubblicati dalla prestigiosa casa editrice Elsevier i *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*. Ma l'attività di Galileo non si arresta. Nelle sue parole: «*nelle mie tenebre vo fantasticando or sopra questo or sopra quello effetto di natura, né posso, come vorrei, dar qualche quiete al mio inquieto cervello: agitazione che molto mi nuoce, tenendomi poco meno che in perpetua vigilia*» (Lettera a Micanzio, 30 gennaio 1638).

8. Misure di prudenza

Si è detto come Galileo, a dispetto dell'abiura, non sia mai indietreggiato «*d'un capello*» dalle posizioni che sa essere corrette. E tuttavia, nella sua condizione di sorvegliato speciale dell'Inquisizione, è costretto ad adottare indispensabili regole di prudenza. Nei *Discorsi*, ad esempio, non parla mai apertamente di teoria copernicana, sebbene gli studi di meccanica e di moto siano a sostegno di quella; il personaggio del modesto Simplicio, in cui il papa Urbano VIII si era sentito ritratto, è conservato, ma reso più degno di ascolto e di rispetto.

Un altro esempio: ad un corrispondente che gli espone un dubbio sul sistema copernicano, risponde fuggendoglielo, ma apre la lettera con le parole che era stato costretto ad aggiungere al suo «*Dialogo sfortunato*», e che non possono che suonare amaramente ironiche: «*La falsità del sistema Copernicano non deve essere in conto alcuno messa in dubbio, e massime da noi Cattolici, havendo la inrefragabile autorità delle Scritture Sacre, interpretate dai maestri sommi in teologia, il concorde assenso dei quali ci rende certi della stabilità della terra, posta nel centro, e della mobilità del sole intorno ad essa*» (Lettera a Rinuccini, 29 marzo 1641).

E ancora: accetta di tenere un nutrito scambio di lettere cerimoniose, seppure non prive di «*aculei*», con un vanesio e prolifico filosofo aristotelico, Fortunio Liceti, che in altri tempi avrebbe bruscamente liquidato – definito dagli amici di Galileo «*persona ignorantissima, furba e maligna... che non merita titolo d'uomo*», le cui idee sono «*barzellette*», «*filastrocche*», «*spropositi*» «*vanità*» – perché sa che quelle lettere saranno mostrate, verranno stampate, e in tal modo alcune sue idee potranno uscire dal chiuso di Arcetri, insieme ai *principi del metodo scientifico* che in queste lettere egli ribadisce più volte (quasi timoroso che il suo *Dialogo* possa non rivedere mai più la luce).

9. Ritorno alla luna

La luna, che era stata l'oggetto delle prime osservazioni di Galileo con il telescopio a Padova nel 1609, è anche l'oggetto delle sue ultime speculazioni celesti. Ormai cieco, propone ipotesi che spieghino la librazione e il candore lunare. Il secondo tema, suo estremo contributo scientifico, viene affrontato nella postuma *Lettera al Principe Leopoldo di Toscana*.

10. L'eredità galileiana

Innumerevoli sono i contributi di Galileo nel campo dell'astronomia e delle scienze naturali, e non solo. Ma la sua eredità più grande consiste nell'aver stabilito i principi del metodo scientifico: sensate esperienze, necessarie dimostrazioni, impiego della matematica; e ancora, non fidarsi dell'esperienza quando la ragione dimostri in contrario, non «*tentar l'essenza*», ovvero non porsi domande che non possono trovare risposta. L'amore di Galileo per la didattica, il suo desiderio di diffondere il sapere, il suo interesse per i giovani, crearono una grande scuola, la quale per alcuni decenni tenne vivo il nome e l'insegnamento dello scienziato pisano.

Purtroppo i secoli seguenti avrebbero visto il rapido spegnersi di tanto fervore intellettuale, e avrebbero pagato i danni incalcolabili fatti dall'Inquisizione, dal rogo di Bruno, dalla censura, in aggiunta alle condizioni politiche ed economiche immiserite. Né pochi nomi illustri sarebbero riusciti a mantenere l'Italia al livello del resto d'Europa. E sarebbe prevalsa l'idea, già combattuta da Galileo, che la cultura *alta* è quella dei letterati e dei filosofi, che si occupano delle massime questioni, mentre lo studio della natura è riservato a tecnici non definibili uomini di cultura. È questa sottovalutazione della scienza, e del metodo scientifico più in particolare, che paghiamo a caro prezzo ancor oggi, ad esempio con il tentativo di eliminare Darwin dalla scuola, con il successo di tante pratiche mediche alternative prive di ogni fondamento scientifico, per non dire del proliferare di fenomeni tipo *new age*, occultismo, ufologia, spiritismo, superstizioni, magia, manie religiose e quant'altro.²

11. L'addio

L'ultima lettera di Galileo, di mano di Torricelli, è indirizzata a una donna, Alessandra Bocchineri Buonamici. Forse si sono visti una sola volta, ma il carattere intrepido e gentile della donna e il suo accorto discorrere hanno lasciato traccia nell'animo del vecchio scienziato. A lei parla del grave peggioramento della sua salute: «*Ho ricevuto la gratissima lettera di V.S. molto Ill. in tempo che mi è stata di molta consolatione, havendomi trovato in letto gravemente indisposto da molte settimane in qua*» (20 dicembre 1641).

Morì pochi giorni dopo, il 9 gennaio 1642. Urbano VIII si oppose a che gli venisse eretto un monumento funebre in Santa Croce a Firenze. Ma a Roma l'umanista tedesco Luca Holste pochi giorni dopo lo ricordò con queste parole:

Oggi poi si è aggiunta anco la nuova della perdita del Signor Galilei, che già non riguarda solamente Firenze, ma il mondo universo e tutto il secolo nostro, che da questo divin uomo ha ricevuto più splendore che quasi da tutto il resto dei filosofi ordinarii. Ora, cessata l'invidia, si comincerà a conoscer la sublimità di quell'ingegno, che a tutta la posterità servirà per scorta nel ricercare il vero, tanto astruso e seppellito tra il buio dell'opinioni.

NOTE

¹ Fantoli A., *Il caso Galileo*, RCS Superbur Saggi, Milano 2003; Beltrán Marí A., saggio introduttivo al *Dialogo sopra i due massimi sistemi*, BUR Pantheon, Milano 2003.

² Su questo tema suggerisco la lettura di *La scienza negata* di Enrico Bellone, Codice, Torino 2005.

BIBLIOGRAFIA

Camerota M., *Galileo Galilei*, Salerno Editrice, Roma 2004.

Fantoli A., *Galileo per il Copernicanesimo e per la Chiesa*, Libreria Editrice Vaticana, Roma 1992.

Frova A. e Marenzana M., *Parola di Galileo*, RCS BUR Supersaggi, Milano 1998.

LE FORZE DI LEGAME TRA GLI ATOMI: UNA FANTASIA SENILE DI GALILEO

ANDREA FROVA

Dipartimento di Fisica, Università di Roma 'La Sapienza'

1. Atomismo ed eresia

Nel 1623 Galileo pubblica *Il Saggiatore*, un arguto saggio di metodologia scientifica in cui si fa beffe di Orazio Grassi, studioso gesuita. Il Cardinale Maffeo Barberini, futuro Papa Urbano VIII, lo apprezza tanto che se ne fa leggere brani mentre pasteggia. Nel *Saggiatore*, Galileo si dichiara atomista alla maniera di Democrito: è quanto meno un'imprudenza, dato che dopo il Concilio di Trento molti considerano atomismo ed eresia eucaristica strettamente collegati (per eresia eucaristica si intende la negazione del miracolo della transustanziazione nell'Eucarestia). E infatti Padre Grassi prende la palla al balzo e attacca Galileo con un libello, *Ratio ponderum Librae et Simbellae*, inoltrando nel contempo al Sant'Uffizio una denuncia anonima di eresia eucaristica a suo carico (l'attribuzione di questa denuncia non è però sicura).

2. Matematizzazione della natura

Dieci anni più tardi Galileo viene condannato nel celebre processo riguardante – sotto il piano formale – la sua adesione al sistema eliocentrico copernicano, viene costretto all'abiura e posto agli arresti domiciliari nella sua villa di Arcetri. Nel suo ultimo libro, i *Discorsi intorno due nuove scienze*, torna sull'argomento della costituzione della materia, tuttavia cambiando la versione data nel *Saggiatore*. Forse per sbarazzarsi del rischio che l'antica denuncia per eresia rispunti fuori, più probabilmente perché aspira a stabilire una corrispondenza stretta tra natura e matematica (ricordiamo il suo motto: «il libro della natura è scritto in caratteri matematici...»). Sta di fatto che l'atomismo di stampo democriteo scompare per far posto al concetto di particelle indivisibili, ossia infinitesime, senza dimensioni, concetto del tutto equivalente a quello geometrico che un segmento finito è costituito da punti adimensionali, da prendere naturalmente in numero infinito. La materia aggregata, conclude, deve essere costituita da infiniti corpuscoli infinitamente piccoli, tenuti assieme da un qualche genere di forza coesiva. Si tratta di indagare su quale sia la natura di questa forza.

3. La 'forza del vuoto'

Un pregiudizio caro agli aristotelici era che il vuoto eserciti una forza. Ciò perché la natura aborre il vuoto (*horror vacui*) e quindi oppone resistenza ogniqualvolta si cerchi di instaurarlo. Benché Galileo abbia vari motivi per rendersi conto che questo

è scientificamente inaccettabile (ad esempio, come possono esercitarsi forze tra entità inesistenti, come si ha nello spazio vuoto?), egli si lascia andare a questa curiosa credenza perché fa al caso nel suo obiettivo di matematizzazione della natura. Esegue persino un esperimento per misurare tale misteriosa forza: allo scopo, utilizza un cilindro con un pistone a tenuta e misura la forza minima che è necessario applicare per estrarre il pistone. L'esperimento può essere facilmente ripetuto tramite una siringa farmaceutica il cui sbocco sia stato sigillato, come mostrato nella figura 1. Naturalmente, come capirà poco tempo dopo il suo allievo Torricelli (l'inventore del barometro), Galileo aveva fatto, senza volerlo, una misura della pressione atmosferica: la forza da vincere non è infatti l'inesistente 'forza del vuoto', bensì quella esercitata dalla colonna d'aria atmosferica sulla base esterna del pistone, forza che non è presente invece sopra di esso per via del sigillo.



Figura 1. Per estrarre uno stantuffo da una siringa sigillata alla cima occorre applicare una forza almeno eguale alla pressione atmosferica moltiplicata per l'area della sezione del cilindro (nelle condizioni della fotografia, circa 6 kg).

Sia come sia, Galileo si convince che questa presunta forza abbia a che fare con il legame tra gli atomi. Tra ciascuna coppia di atomi si troverebbe insinuato uno spazio vuoto che ha l'effetto di tenerli saldamente insieme. Essendo gli atomi infinitesimi in dimensione e infiniti in numero, lo stesso deve valere per le zone di vuoto. Galileo esegue un secondo esperimento, sul quale non mi soffermo, per trarre la conclusione che la forza agente tra atomo e atomo è quattro volte superiore a quella del 'vuoto esterno', ossia quella determinata con cilindro e pistone. L'ipotesi galileiana è interessante se non altro perché oggi sappiamo che in effetti la materia aggregata contiene ampie regioni di vuoto, tuttavia interne agli atomi, essendo questi costituiti da un nucleo positivo e da carica negativa distribuita attorno ad esso con assenza di materia nello spazio interposto. Il legame però non ha a che fare con il vuoto, bensì con forze coulombiane, ovvero di natura elettrostatica, forze che al tempo di Galileo erano ignote. Si potrebbe dire, con un'immagine ingenua ma suggestiva, che se si potesse rimuovere lo spazio vuoto interno agli atomi, il Colosseo si ridurrebbe alle dimensioni di una perlina di vetro.

Questa concezione di materia 'continua' alla maniera di un segmento geometrico

rappresenta l'estremo limite del tentativo di Galileo di 'matematizzare' la materia: esso sancisce il principio che *l'indissolubilità tra fisica e matematica diviene inscindibilità tra materia e matematica*. Vedremo che seguendo queste fantasiose linee di ragionamento Galileo giungerà persino ad avanzare futuristiche congetture sulla natura della luce e del calore e sul loro intimo legame con la materia.

4. Gli 'ignicoli' o particelle di fuoco

Galileo si pone il problema di come allora una sostanza, portata ad alta temperatura, possa fondere. La natura del fuoco, secondo lui, è quella di un insieme di particelle calde, gli *ignicoli*, che si trovano in continuo movimento. E la sensazione di calore che proviamo nel toccare un oggetto riscaldato è dovuta alla penetrazione degli ignicoli nella nostra pelle: più veloci sono gli ignicoli, più marcata l'impressione di calore. La fusione di un solido è dovuta al fatto che gli ignicoli, penetrando all'interno dei microvuoti che si trovano tra particella e particella, vanificano gli effetti della forza di legame.

Gli ignicoli possono avere varie dimensioni: se grossi si manifestano come calore, se piccoli come luce. Questo insieme di intuizioni trova oggi sorprendenti analogie/conferme. La luce e il calore hanno infatti eguale natura, quella di onde elettromagnetiche che si presentano sotto forma di *quanti di energia*, ovvero pacchetti di energia indivisibile. La luce è caratterizzata da energia elevata e lunghezza d'onda piccola, come mostra la figura 2, il calore viceversa. La teoria cinetica dei gas afferma che in ogni sostanza il calore è associato all'agitazione termica delle particelle costituenti: più alta è la loro energia cinetica, cioè più rapidamente esse si muovono, più alta è la temperatura che avvertiamo nel contatto con quella sostanza. Quando l'energia cinetica delle particelle – energia di natura disgregante – vince l'energia di legame che le tiene unite fra di loro, la sostanza fonde. Naturalmente, come già all'interno dei singoli atomi tra nucleo ed elettroni, l'energia di legame interatomica non è dovuta all'azione del vuoto, ma a forze di natura elettromagnetica.



Figura 2. La lunghezza d'onda di un'onda elettromagnetica diviene sempre più breve man mano che ci sposta dal calore alla radiazione ultravioletta. Questa proprietà è reminiscente di quella attribuita da Galileo alla dimensione degli ignicoli.

5. Luce e materia

Sulla strada delle congetture, Galileo propone con notevole lungimiranza che luce e materia abbiano un denominatore comune. Ma sentiamo le parole stesse di Galileo, come ci vengono riferite da Orazio Ricasoli Rucellai:

[Galileo riteneva] che la luce per avventura potesse essere il cominciamento universale della natura, e ciò imperciocché credeva che la luce fosse l'estrema espansione, cioè l'ultima rarefazione che dar si potesse, dal quale primo principio tutte le cose, condensandosi essa, dove più e dove meno si componessero sino alla più spessa e fitta condensazione anco delle pietre più dure e impenetrabili.

Galileo evitò di mettere quest'ipotesi per iscritto e sappiamo che in vecchiaia ne dubitò egli stesso per primo, tanto da affermare:

...io mi ero sempre tenuto tanto inhabile a poter penetrare che cosa sia il lume, che mi sarei esibito a stare in carcere in pane e acqua tutta la mia vita, purché io fossi stato assicurato di conseguire una da me tanto insperata cognizione.

Tuttavia il suo interesse per i fenomeni luminosi rimane vivissimo, così che lascia anche scritto:

[...] direi, parermi che nella natura si ritrovi una sostanza spiritosissima, tenuissima e velocissima, la quale, diffondendosi per l'universo, penetra per tutto senza contrasto, riscalda, vivifica e rende feconde tutte le viventi creature; e di questo spirito par che 'l senso stesso ci dimostri il corpo del Sole esserne ricetta principalissimo, dal quale espandendosi un'immensa luce per l'universo, accompagnata da tale spirito calorifico e penetrante per tutti i corpi vegetabili, gli rende vividi e fecondi.

6. La velocità della luce

Galileo dice «*substanza velocissima*», e altrove «*Io non saprei intendere che l'azione della luce, benché purissima, potesse esser senza moto*». Senza moto significa con spostamento istantaneo, tale cioè da potersi vedere nell'istante stesso in cui viene emessa, non importa quanto lontano. Ora, la propagazione istantanea della luce era un fatto generalmente accettato dagli studiosi del tempo, a cominciare da Cartesio e Keplero. L'idea di Galileo è dunque rivoluzionaria e questa volta perfettamente centrata. Egli arriva persino a suggerire il modo di misurare la velocità di propagazione della luce con un esperimento da fare tra due colli, secondo lo schema mostrato in figura 3.

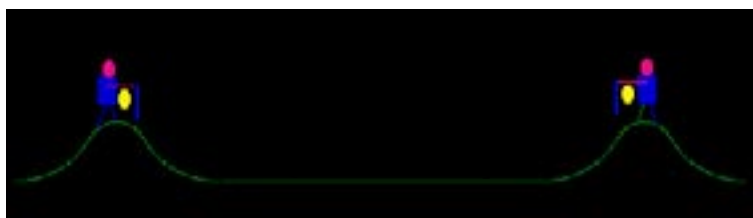


Figura 3. Esperienza suggerita da Galileo per la misura della velocità della luce.

La descrizione di Galileo, riportata nei *Discorsi intorno a due nuove scienze*, è suggestiva:

Voglio che due pigliano un lume per uno, il quale, tenendolo dentro lanterna o altro ricetto possono andar coprendo e scoprendo, con l'interposizione della mano, alla vista del compagno, e che, ponendosi l'uno incontro all'altro in distanza di poche braccia, vadano addestrandosi nello scoprire ed occultare il lor lume alla vista del compagno, sì che quando l'uno vede il lume dell'altro, immediatamente scuopra il suo; la qual corrispondenza, dopo alcune risposte fattesi scambievolmente, verrà loro talmente aggiustata, che, senza sensibile svatio, alla scoperta dell'uno risponderà immediatamente la scoperta dell'altro, sì che quando l'uno scuopre il suo lume, vedrà nell'istesso tempo comparire alla sua vista il lume dell'altro. Aggiustata cotal pratica in questa piccolissima distanza, pongansi i due medesimi compagni con due simili lumi in lontananza di due o tre miglia, e tornando di notte a far l'istessa esperienza, vadano osservando attentamente se le risposte delle loro scoperte ed occultazioni seguono secondo l'istesso tenore che facevano da vicino; che seguendo, si potrà assai sicuramente concludere, l'espansion del lume essere instantanea: che quando ella ricercasse tempo, in una lontananza di tre miglia, che importano sei per l'andata d'un lume e venuta dell'altro, la dimora dovrebbe esser assai osservabile. E quando si volesse far tal osservazione in distanze maggiori, cioè di otto o dieci miglia, potremmo servirci del telescopio...

L'esperimento, se mai Galileo lo tentò realmente, non poté ovviamente riuscirci. Era del tutto inadeguato, se non altro per i tempi di reazione degli sperimentatori. E dimostra che Galileo non aveva alcuna idea di quanto elevata sia la velocità della luce, che egli reputava sì maggiore di quella del suono (a causa del ritardo interposto tra fulmine e tuono), ma pur sempre in qualche modo a essa comparabile. E tuttavia il grande scienziato fu il precursore dei moderni metodi di determinazione della velocità della luce. Già verso la metà dell'Ottocento, sulla base dell'idea galileiana, il francese Fizeau mise a punto il suo famoso esperimento basato sull'impiego di una ruota dentata in rotazione. Un fascio luminoso collimato, proveniente da una sorgente situata alla periferia di Parigi, andava a colpire uno specchio posto sulla collina di Montmartre, distante 8,6 Km, e veniva riflesso all'indietro sul suo cammino di arrivo. Vicino alla sorgente c'è una ruota munita di 720 denti. Se la ruota gira piano, la luce che nell'andata passa attraverso un foro della ruota dentata, compiuto il doppio tragitto tra le due colline, viene intercettata nel ritorno da un dente e non giunge all'osservatore (il quale la guarda attraverso uno specchio semiargentato inclinato a 45°). Aumentando la velocità di rotazione della ruota, a un dato punto la luce viene invece vista, perché nel ritorno incontra il prossimo foro invece del dente. Poiché in tal caso il tempo impiegato dalla luce a percorrere $8,6 \times 2$ km è eguale a quello che la ruota impiega a sostituire un foro con quello contiguo, dalla velocità di rotazione necessaria per osservare il primo massimo di luce trasmessa si risale alla

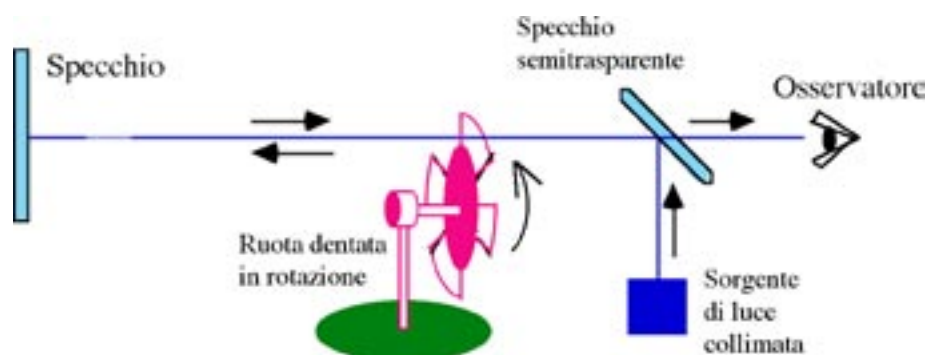


Figura 4. Misura della velocità della luce secondo il metodo di Fizeau, ispirato da Galileo.

velocità della luce. Fizeau determinò per la velocità di propagazione della luce in aria un valore di circa 313.000 km/s, un po' maggiore del giusto. Oggi, grazie alla disponibilità dei laser, il valore è noto fino alla nona cifra significativa (nel vuoto, 299.792,457 km/s).

7. Le considerazioni di Galileo

Galileo non aveva dunque prove sperimentali per dire con certezza che la luce ha una velocità di propagazione finita. Usò un argomento assai curioso, che egli stesso definì alquanto azzardato, e precisamente quello dell'intervallo di tempo che intercorre tra l'osservazione del fulmine e del baleno. Quando si vede cadere un fulmine, si ha l'impressione che il suo bagliore riflesso dalle nubi lontane si presenti con un piccolo ma apprezzabile ritardo (oggi questo effetto si può far risalire a un fattore psicologico scoperto da Kenkel nel 1913, il 'movimento γ ', ossia l'impressione di moto che si associa alla presentazione improvvisa di figure luminose nel buio). Il vero ritardo dovuto al moto della luce da una parte all'altra della calotta atmosferica si può calcolare in qualcosa dell'ordine di 50 microsecondi, quindi del tutto inavvertibile. Il che mostra una volta ancora come Galileo fosse lontanissimo dall'immaginare a quale vertiginosa velocità si propaga la luce.

BIBLIOGRAFIA

- Frova A. e Marenzana M., *Parola di Galileo*, SuperBUR Saggi, RCS-Libri, Milano 1998, Capitoli 12, 14, 17-19.
- Geymonat L., *Galileo Galilei*, Einaudi, Torino 1969.
- Redondi P., *Galileo eretico*, Einaudi, Torino 1983.

SULL'INTRECCIO E SULL'OPPOSIZIONE MAGIA-SCIENZA

PAOLO ROSSI

Accademia Europea

1. Due secoli per aprire un baule

Per tutto il Settecento e l'Ottocento nonché per molti decenni del Novecento, la grandezza e la fama di Newton sono quasi esclusivamente legati alla lettura dei suoi due grandi capolavori: i *Philosophiae naturalis principia mathematica*, pubblicati a Londra nel 1687 e l'*Opticks, or a treatise of the reflexions, inflexions and colours of light* fu pubblicato a Londra nel 1704. Alla morte di Newton, la Royal Society rifiutò di acquisire i suoi manoscritti di argomento religioso e li restituì alla famiglia con la raccomandazione di non mostrarli ad alcuno. Quando la carte manoscritte di Newton furono viste da Samuel Horsley, che era il curatore dell'edizione dell'*Opera omnia* (pubblicata fra il 1779 e il 1785) costui «scandalizzato richiuse con forza il coperchio del baule che li conteneva». Una parte dei manoscritti fu acquistata nel 1936 da John Maynard Lord Keynes (il grande economista). Considerando la mole dei manoscritti alchemici, egli dette di Newton una definizione che fece scandalo e fu all'origine di molte controversie: lo chiamò non il primo degli scienziati moderni, ma «l'ultimo dei maghi». Quelle carte contenevano molta matematica, molta fisica, molta ottica e molta 'scienza', ma una rilevante parte di esse era dedicata a temi di alchimia e di cronologia universale, alla interpretazione della Scrittura e alle controversie teologiche, all'Apocalisse e alla Riposta Sapienza che sarebbe – come vogliono la tradizione ermetica e la magia rinascimentale – alle origini della storia umana. Fra gli enti che rifiutarono di acquisire manoscritti newtoniani sono da annoverare l'Università di Cambridge (che selezionò, accettandoli una serie di manoscritti scientifici), il British Museum, le Università americane di Harvard, Yale e Princeton. Lo Stato di Israele che ne ricevette una parte consistente nel 1951, li collocò nella University Library di Gerusalemme solo diciotto anni dopo averli ricevuti.

Dopo la completa apertura di quel baule (che è avvenuta più di duecento anni dalla morte del suo proprietario) la meritoria, instancabile, sofisticata attività di molti insigni studiosi ha sconvolto un terreno che sembrava ben coltivato e ha trasformato in profondità il significato e la collocazione storica di Newton. Su questo terreno, Maurizio Mamiani, professore a Ferrara e da poco scomparso, ha dato contributi decisivi.

Gli studi su Newton antecedenti al 1945-1950 (fra i quali si annoverano tuttavia contributi ancora oggi fondamentali) sono stati in qualche modo “superati” dalle interpretazioni che hanno potuto utilizzare le fonti manoscritte. Gli inediti matematici

e scientifici sono stati pubblicati solo negli anni Sessanta e Settanta del Novecento; negli stessi anni sono stati pubblicati gli inediti di ottica e di filosofia. Lo stesso è da dire per l'edizione della corrispondenza. L'edizione dei cosiddetti *Scolii classici*, di una progettata appendice alla seconda edizione dei *Principia* e del *Trattato sull'Apocalisse* (edito da Mamiani nel 1994) sono di questi ultimi decenni. Sugli studiosi si è dunque rovesciata, a partire dal secondo dopoguerra, una valanga di materiali. Anche volendo limitarsi all'essenziale si tratta di una ventina di volumi di testi. E c'è ancora molto materiale da studiare.

Da questo punto di vista, Newton ha avuto davvero un curioso destino. Nulla di simile è avvenuto per Copernico, o Descartes, o Galilei, o (più tardi) per Darwin. I ritratti che di questi personaggi tracciò la cultura del Positivismo sono certo molto diversi dai ritratti di oggi. Ma un conto è la scoperta di qualche nuovo testo, un conto sono i mutamenti o i progressi della ricerca storica, e tutto un altro conto è la comparsa quasi improvvisa (anche se preceduta da qualche pettegolezzo o vociferazione) di una montagna di testi rimasti ignoti o semi-ignoti per un paio di secoli. L'immagine di Newton come 'scienziato positivo' (che è ancora largamente presente) è stata costruita non solo dalle interpretazioni degli storici e degli scienziati del tardo Settecento e dell'Ottocento, ma anche dal persistente, tenace rifiuto di prendere in considerazione una numerosissima serie di testi che ponevano davanti agli occhi i tratti sconosciuti di un volto che si riteneva del tutto familiare. E la 'familiarità', in questo caso, ha a che fare con il ritratto di famiglia degli scienziati moderni o positivi.

2. La sapienza degli antichi

Newton riteneva che l'Egitto fosse stata la sede originaria delle credenze religiose dei pagani o della teologia dei Gentili. Quest'ultima «aveva carattere filosofico e dipendeva dall'astronomia e dalla scienza fisica del sistema del mondo». In Egitto aveva soggiornato Noè dopo il Diluvio e in Egitto avevano conteso la sua successione i figli di Noè. La religione si identificò con «il culto di un fuoco sacrificale che ardeva in perpetuo nei penetrali di un luogo sacro». Quando Mosè collocò nel tabernacolo un fuoco sacro, restaurò il culto originario «purgato dalle superstizioni introdotte dagli Egiziani». Le superstizioni consistevano nella divinizzazione dei loro antenati e gli altri popoli seguirono gli Egiziani su questa strada.

La polemica antilibertina non escludeva affatto la credenza nel mito di una antica, originaria e riposta sapienza. Francis Bacon aveva presentato la sua riforma del sapere come una *instauratio*, come l'adempimento di un'antica promessa. La nuova scienza operativa avrebbe consentito di restaurare quel potere sulla natura che l'uomo ha perduto dopo il peccato. Bacon pensava che le «favole antiche» fossero non un prodotto della loro età, né il frutto dell'invenzione degli antichi poeti, ma invece simili a «sacre reliquie e arie lievi spiranti da tempi migliori, tratte dalle tradizioni di nazioni più antiche e trasmesse ai flauti e alle trombe dei Greci». L'idea che il sapere vada *risuscitato*, che esso sia in qualche modo nascosto nei tempi più remoti della storia

umana, che prima della filosofia dei Greci fossero state intraviste alcune fondamentali verità in seguito cancellate e perdute è un tema «ermetico», che attraversa una larga parte della cultura del Seicento e che ricompare anche negli autori nei quali meno ci aspetteremmo di trovarlo. Non solo, come vedremo, in Newton, ma anche, per esempio, nelle *Regulae* di Descartes che era un deciso sostenitore della superiorità dei moderni: «Sono convinto che i primi semi della verità [...] erano pieni di vigore nella rozza e semplice antichità [...] Gli uomini avevano allora idee vere della filosofia e della matematica [...] Sarei propenso a credere che questi autori abbiano in seguito nascosto questo loro sapere, così come gli artigiani fanno con le loro invenzioni, temendo che il loro metodo perdesse il suo valore una volta divulgato».

Nel *De mundi systemate* (composto fra il 1684 e il 1686) Newton faceva risalire la tesi copernicana non solo a Filolao ed Aristarco, ma a Platone, Anassimandro, a Numa Pompilio e riprendeva la tesi dell'antica sapienza degli Egiziani: «Per simboleggiare la sfericità dell'universo con al centro il fuoco solare, Numa Pompilio fece erigere il tempio di Vesta di forma circolare e volle che vi si serbasse al centro un fuoco inestinguibile. È però verosimile che questa idea sia stata diffusa dagli Egiziani, i più antichi osservatori degli astri. Infatti sembra che proprio da questi e dai popoli limitrofi, si fosse trasmessa ai Greci, gente più filologica che filosofica, tutta la filosofia più antica e più sana: anche il culto di Vesta ha qualcosa in comune con lo spirito degli Egiziani, i quali rappresentavano, con riti sacri e geroglifici, misteri che travalicavano la comprensione popolare».

Nei cosiddetti *Scolii classici* che intendeva aggiungere al testo dei Principia, Newton aderisce all'idea di una *prisca sapientia* e intende mostrare che i filosofi ionici e italici nonché gli astronomi egizi avevano conosciuto i fenomeni e le leggi dell'astronomia gravitazionale. Newton ritiene addirittura che, anche se in forma simbolica, già si sapeva, nei tempi più remoti della storia che la forza dell'attrazione diminuisce in ragione del quadrato della distanza:

Gli antichi non hanno sufficientemente spiegato con quale proporzione decresce la gravità allontanandosi dai pianeti. Sembra tuttavia che l'avessero simboleggiata con l'armonia delle sfere celesti, indicando il Sole e gli altri sei pianeti [...] mediante Apollo con la lira dalle sette corde e misurando gli intervalli fra le sfere mediante gli intervalli dei toni [...]. Nell'oracolo di Apollo presso Eusebio [...] il Sole è chiamato il re dell'armonia settisona. Con questo simbolo vollero indicare che il Sole agisce con la sua forza verso i pianeti [...] proporzionalmente all'inverso del quadrato della distanza.

Con ogni probabilità si è ecceduto nel presentare Newton come un pensatore «ermetico», ma è indubbio che Newton fu fermamente convinto di star *riscoprendo* verità di filosofia naturale che già si erano affacciate nei tempi remoti della storia, che erano state rivelate da Dio stesso, oscurate dopo il peccato, e che gli antichi saggi avevano, a loro volta, parzialmente riscoperto. Il gran libro della natura era già stato decifrato. Il *progresso* dell'astronomia fu concepito da Copernico, da Keplero, dallo

stesso Newton, anche come un *ritorno*.

3. Alchimia

Alcune migliaia di pagine manoscritte, composte nell'arco di tutta la sua vita, mostrano che Newton dedicò alla lettura, alla trascrizione e al commento di testi alchimistici una parte davvero rilevante della sua attività. Ma non si tratta solo di questo: quelle pagine documentano una relevantissima quantità di esperimenti effettuati con gli alcali, i metalli, gli acidi. Quando Newton collega la gravità, come un *principio attivo* presente nell'universo, con la coesione dei corpi e con la fermentazione dobbiamo tenere presenti i suoi interessi per la chimica e per l'alchimia. Da questo punto di vista è indubbio che gli esperimenti di Newton in questo campo tendevano anche a fornire una base sperimentale alle sue ipotesi o interrogativi, presentati in forma problematica e provvisoria, sugli atomi e sull'etere, al suo tentativo di una spiegazione unitaria o di una scienza unitaria dell'universo quale essa chiaramente traspare nelle ultime righe dello *Scolio generale* ai *Principia* nelle quali si fa appello allo «spirito sottilissimo che pervade i grossi corpi e in essi si nasconde» mediante la forza e le azioni del quale si attraggono e aderiscono le particelle, agiscono a distanza i corpi elettrici, viene emessa la luce, i sensi sono eccitati e si muovono a volontà le membra degli animali dato che le vibrazioni di questo spirito si propagano dagli organi di senso al cervello e dal cervello ai muscoli. Non c'è tuttavia, concludeva Newton, «sufficiente abbondanza di esperimenti mediante i quali le leggi di azione di questo spirito possano essere accuratamente determinate e mostrate».

Gli interessi di Newton per l'alchimia risalgono a quando egli aveva meno di trent'anni ed aveva acquistato acido nitrico, sublimato di mercurio, antimONIO, alcool, salnitro e si era costruito da solo, senza scomodare i muratori, i suoi forni di mattoni. Negli stessi anni (attorno al 1669) iniziarono le sue letture alchemiche. Nel corso delle quali Newton tenta di stabilire una serie di assiomi comuni ai diversi cultori di alchimia e di stabilire i referenti comuni ai quali gli alchimisti si riferiscono con una molteplicità di termini immaginosi. Newton appare indubbiamente interessato più agli esperimenti che alle esperienze mistico-religiose che caratterizzano una larga parte della letteratura alchimistica. Gli esperimenti accompagnano le sue letture ed è indubbio, come ha sottolineato il suo maggiore biografo, che Newton si volse allo studio della Grande Arte con una attrezzatura intellettuale che nessun alchimista aveva mai posseduto. Il suo interesse per l'aspetto quantitativo delle operazioni di misura resta dominante così come resta immutata la sua esigenza di un linguaggio rigoroso e non solo metaforico e allusivo. Ma è anche vero che Newton considerò ben presto la filosofia meccanica una realtà costruita su categorie troppo rigide e comunque insufficiente ad esprimere la complessità della natura.

Westfall si è servito, per spiegare la posizione di Newton (che, una volta conosciuti i manoscritti alchemici, è risultata sconcertante per molti studiosi) di una brillante metafora. Una *ribellione* contro i troppo rigidi confini imposti dal meccanicismo

simile a quella che può cogliere un magnifico quarantenne che vive in un matrimonio apparentemente felice:

La filosofia meccanicista aveva ceduto forse troppo prontamente al suo desiderio. Insoddisfatto, Newton continuò la ricerca e trovò nell'alchimia, e nella filosofia ad essa associata, una nuova amante infinitamente varia, che non sembrava mai concedersi interamente. Mentre le altre generavano sazietà, essa si limitava a stuzzicare l'appetito. Newton la corteggiò seriamente per trent'anni.

In realtà se si collegano gli interessi di Newton per l'alchimia alle sue affermazioni sulla inopportunità di rendere pubbliche una serie di tesi, alla sua convinzione sulla "fine del mondo", alla sua credenza in una Originaria e Riposta Sapienza che è alle origini della storia e che contiene una pura e incorrotta verità, al suo discorso sullo *spirito elettrico* che è di volta in volta materiale e immateriale e assomiglia ad una fiamma vitale, alle affermazioni contenute nella lettera a Oldenburg sull'«etere condensato per effetto di un principio di fermentazione» e sul perenne «moto circolare della Natura», è davvero difficile vedere Newton *soltanto* impegnato in un lungo 'corteggiamento' extramatrimoniale.

4. La religione di Newton e l'Apocalisse

Newton credeva in Dio e nella Bibbia, ma era – segretamente – su posizioni decisamente eretiche. Per tutto il corso della sua vita tenne accuratamente nascoste molte delle sue idee su Gesù Cristo e sul cristianesimo e, sul terreno delle convinzioni religiose, adottò l'atteggiamento che aveva teorizzato Descartes il quale aveva fatto proprio il motto *larvatus prode* (avanzo mascherato). Era quasi miracolosamente riuscito a farsi esentare, con apposita dispensa regia, dal prendere gli ordini religiosi in seno alla Chiesa Anglicana, come veniva richiesto ad ogni *Fellow* di Cambridge. Nella parte finale della sua vita dedicò molti anni ad eliminare affermazioni considerate riprovevoli dalle opere teologiche che aveva lasciato in vista di una pubblicazione. Alla presenza di due sole persone (che tennero accuratamente nascosta la notizia) rifiutò, in punto di morte, i sacramenti della Chiesa.

Newton lesse una grande quantità di testi dei Padri della Chiesa e si convinse (molto prima del 1675) che nella feroce disputa che aveva caratterizzato la storia della Chiesa durante il quarto secolo dell'era cristiana era stata perpetrata, da parte di Atanasio e dei suoi seguaci una gigantesca frode: il Testo sacro era stato alterato in molti punti. Quelle alterazioni avevano lo scopo di affermare la dottrina del Trinitarismo. Newton era, dal 1668, *fellow* di un *College* che prendeva il suo nome dalla *Holy and Undivided Trinity* (Santissima e Indivisa Trinità). Ma la dottrina della Trinità, pensava Newton, fu falsamente imposta ai cristiani all'epoca della trionfale vittoria di Atanasio su Ario e sugli Ariani. Adorare Cristo come Dio era, agli occhi di Newton, una manifestazione di idolatria. Il Papa di Roma aveva appoggiato Atanasio e la Chiesa di Roma era la sede di un culto idolatrico che si era manifestato *dopo* che la Chiesa primitiva aveva stabilito che un unico Dio andava adorato. La dottrina trinitaria era diventata un dogma sia

per la Chiesa cattolica sia per quella anglicana. Nel professarsi segretamente seguace di Ario, Newton vedeva in Cristo un mediatore fra l' uomo e Dio, ma non un Dio : «Il Figlio ammette che il Padre è più grande di lui e lo chiama suo Dio [...] subordina la sua volontà a quella del Padre e ciò sarebbe irragionevole se egli fosse uguale al Padre». Dobbiamo adorare Gesù Cristo come Signore, ma dobbiamo farlo senza violare il primo comandamento .

Cristo è il Figlio di Dio, ma non è Dio, non è *consustanziale* al Padre. I due grandi comandamenti, che sono l' essenza della religione, amare Dio e amare il prossimo, «sono sempre stati e sempre dovranno essere osservati da tutte le Nazioni, e la venuta di Gesù Cristo sulla terra non li ha minimamente modificati». L' amore del prossimo è stato insegnato ai pagani da Socrate, Cicerone, Confucio. La legge della rettitudine e della carità «fu dettata ai Cristiani da Cristo, agli Ebrei da Mosè e a tutto il genere umano dalla luce della ragione».

Per molti aspetti il monoteismo ariano di Newton confina con il deismo e con le analisi libertine della religione e non per caso deismo e newtonianesimo si presenteranno, nel Settecento, strettamente congiunti. Ai temi di teologia Newton dedicò uno spazio molto maggiore che ai temi scientifici. L' impegno in questi problemi era così forte da far considerare a Newton, in alcuni periodi della sua vita, i problemi di ottica e di fisica come fastidiose interruzioni in un lavoro di maggiore portata che aveva come argomento una ridiscussione dell' intera tradizione cristiana.

Lo studio delle Scritture e, in special modo, quello delle profezie faceva parte, per Newton, del Cristianesimo originario. E Newton riteneva di aver raggiunto, sul terreno della conoscenza delle scritture profetiche, gli stessi risultati di verità che aveva raggiunto relativamente alla natura dei colori e alle leggi dell'Universo:

Avendo ricercato e per grazia di Dio ottenuto la conoscenza delle Scritture profetiche, ho pensato di essere obbligato a comunicarla per il beneficio di altri, rammentando il giudizio di colui che nascose il talento in un panno [...] Non vorrei che nessuno si scoraggiasse per le difficoltà e l' insuccesso che gli uomini hanno incontrato finora in questi tentativi. Ciò è proprio quello che era necessario che fosse. Infatti fu rivelato a Daniele che le profezie sugli ultimi tempi dovevano essere chiuse e sigillate sino al tempo della fine : ma allora i saggi intenderebbero e la conoscenza crescerebbe . E perciò più a lungo sono rimaste nell' oscurità, più sono le speranze che sia giunto il tempo in cui devono essere rese manifeste.

Il riferimento al passo di Daniele (che è lo stesso posto da Francis Bacon nel frontespizio del *Novum Organum*) rende del tutto evidente la convinzione di Newton di vivere negli ultimi tempi della storia, quelli che consentono e rendono inevitabile l' intendimento del significato dei libri profetici. Anche se in tarda età i calcoli di Newton relativi al Secondo Avvento tendono a spostarlo nel secolo XX o XXI, è indubbio che egli si muove in una prospettiva millenaristica.

Il linguaggio delle profezie, come quello della natura, proviene direttamente da Dio.

Newton si sente un eletto da Dio e definisce se stesso (in un testo tuttora manoscritto) come una delle «persone sparse che Dio ha scelto e che, senza essere condotti da interesse, educazione o autorità possono porsi sinceramente e ardentemente al servizio della verità».

5. L'interpretazione della Bibbia e l'interpretazione della natura

Come ha persuasivamente dimostrato Maurizio Mamiani, prima ancora di formulare una qualche consistente teoria “scientifica” Newton elaborò, per interpretare il testo dell' Apocalisse, una serie di regole. Rispetto ad esse le *regulae philosophandi* presenti nei *Principia* appaiono un affinamento ed una semplificazione delle regole per interpretare le parole e il linguaggio della Scrittura. Nel costruire la scienza, affermerà Newton nei *Principia*, «non ci si deve allontanare dalla analogia della natura, poiché essa suole essere semplice e sempre conforme a sé». Questa stessa regola era stata fatta valere, molti anni prima, per l' interpretazione del Testo sacro : la concordanza delle Scritture e l' analogia dello stile profetico vanno diligentemente osservate e vanno scelte «quelle costruzioni che senza forzare riducono le cose alla più grande semplicità [...]. La verità deve sempre essere trovata nella semplicità e non nella molteplicità e confusione delle cose. Come il mondo che a occhio nudo mostra la più grande varietà di oggetti appare molto semplice nella sua costituzione interna quando è contemplato con intelletto filosofico e tanto più semplice quanto meglio compreso, così accade in queste visioni. È per la perfezione delle opere di Dio che esse sono tutte compiute con la più grande semplicità. Egli è il Dio dell' ordine e non della confusione» .

Il metodo per interpretare il testo è sostanzialmente identico a quello che serve per interpretare la natura. C' è un solo metodo per cogliere la verità ed esso vale nei confronti della Bibbia e nei confronti della Natura. Esso è proprio e caratteristico sia della scienza sia della religione. Non solo i due libri della Bibbia e della Natura come aveva affermato Galileo, non possono contraddirsi l' uno con l' altro, ma (e questo Galilei non l' avrebbe mai sottoscritto) vanno letti facendo uso delle *stesse regole di lettura* : «Come quelli che vorrebbero comprendere la struttura del mondo devono sforzarsi di ridurre la loro conoscenza ad ogni possibile semplicità, così deve essere nel cercare di comprendere queste visioni».

Alle *regole* che vengono enunciate all' inizio del *Trattato sull' Apocalisse*, seguono le *definizioni* e le *proposizioni*. Queste ultime, proprio come nell' *Optiks*, «vengono provate in due modi : mediante le regole e le definizioni (equivalenti ai principi matematici) e con riferimento diretto al Testo sacro (equivalente al confronto con i fenomeni, agli esperimenti)». Newton ritiene pertanto possibile e auspicabile una lettura *scientifica* del Testo sacro. Una interpretazione del Testo condotta sulla base delle regole che egli ha prospettato, dà infatti le stesse identiche certezze e le stesse sicurezze che offre la verità scientifica : «Se qualcuno obietterà che la mia costruzione dell' Apocalisse è incerta, con la pretesa che sarebbe possibile trovare altri modi, non deve essere preso in considerazione a meno che non mostri in che cosa ciò che ho fatto può essere corretto.

Se i modi per i quali egli obietta fossero meno naturali o fondati su ragioni più deboli, questa cosa stessa sarebbe la dimostrazione sufficiente che essi sono falsi e che egli non cerca la verità, ma l'interesse di parte». L'analogia, che immediatamente segue è ancora più impressionante: «Come di una macchina costruita da un eccellente artefice si crede prontamente che le parti siano giustamente assemblate quando si vedono adattarsi veramente le une alle altre [...] così, per la medesima ragione si dovrebbe accettare la costruzione di queste profezie, quando si vedono le loro parti ordinate secondo la loro convenienza e secondo le caratteristiche impresse in loro a questo scopo». È certo possibile che una macchina possa essere assemblata in più di un modo e con eguale congruenza, è possibile che le frasi siano ambigue, ma «questa obiezione non può aver luogo per l'Apocalisse, perché Dio, che sapeva comporlo senza ambiguità, lo intese come una regola di fede».

6. Conclusioni

Come nel caso degli interessi per l'alchimia e della ferma credenza di Newton in una originaria sapienza delle origini, anche il rapporto che Newton stabilisce tra la scienza e la religione, tra il concetto di Dio e la fisica, tra il metodo di indagine sulla natura e il metodo di lettura dei testi sacri collocano l'intera opera di Newton su un piano assai diverso da quello, irrimediabilmente obsoleto, delle interpretazioni di Newton come *scienziato positivo* o delle celebrazioni di Newton come primo grande scienziato moderno. Anche la scienza moderna ha i suoi eroi e Newton è forse il più grande tra questi. È vero che l'epitaffio funebre collocato sulla sua tomba, nella sua magniloquenza barocca, coglie nel segno: «i mortali possono gioire che sia esistito un tale e così grande ornamento dello spirito umano». Ed esprime in qualche modo una profonda verità anche il distico, tanto spesso citato, di Alexander Pope

*Nature and Nature's laws were hid in night
God said "Let Newton be", and all was light.*

*[La Natura e le sue leggi erano nascoste nell'oscurità
Dio disse "Sia Newton!" e tutto fu luce]*

Ma è anche vero che riportare tutte le affermazioni di Newton ad un contesto interamente "moderno" sembra un'impresa disperata.

7. L'intreccio magia/scienza

Il tema della mescolanza magia-scienza (agli inizi della modernità) e della contemporanea contrapposizione tra scienza e magia stanno al centro delle ricerche di molti studiosi. Abbiamo parlato solo di Newton, ma prendiamo cinque grandi personaggi che stanno all'inizio della modernità e che, di questa, sono diventati il simbolo: Francis Bacon, René Descartes, Johannes Kepler, Gottfried Wilhelm Leibniz. Il primo professava, accanto a quella più nota, anche una forma di filosofia paracelsiana a ricavava da un testo di Cornelio Agrippa la sua nuova definizione dell'uomo e del suo rapporto con la natura. Il secondo aveva invece peccato solo in gioventù, quando anteponeva i risultati

dell'immaginazione a quelli della ragione, simpatizzava con i Rosacroce e pensava che in tutte le cose fosse presente «una sola forza attiva, che è amore, carità e armonia». Il terzo, che è Keplero, non determinò solo le leggi che portano il suo nome, ma non nascose mai i suoi legami con la cosiddetta tradizione ermetica e con un misticismo dei numeri di derivazione pitagorica. Insistette più volte, con incredibile tenacia, a cercare dati che si adattassero ad immaginose ipotesi metafisiche e servissero a confermarle. Adottando, contro la «filosofia meccanica», la tesi di un sentire che è diffuso nella totalità del mondo, attribuendo la *percezione* ad ogni realtà, adottando la tesi di una universale simpatia, Leibniz (fedele al suo precetto secondo il quale «la maggioranza delle sette hanno ragione in buona parte di ciò che propongono, ma non altrettanto in ciò che negano») inseriva nella sua filosofia (mutandone il senso) motivi centrali della grande magia del Rinascimento.

8. La contrapposizione magia/scienza

I tentativi di tracciare linee di demarcazione devono essere sempre condotti con grande cautela. Ma una cosa è affermare questo e combattere le rozze contrapposizioni e tutt'altra cosa è accettare l'idea «continuista» secondo la quale non ci sono mai state rivoluzioni e (tanto per fare un esempio) non si dovrebbe più parlare (relativamente al periodo al quale mi sono qui riferito) di rivoluzione scientifica. Io credo che si possa e si debba continuare a parlarne non solo perché il termine *novus* ricorre in quegli anni in modo quasi ossessivo, ma perché nacque allora una forma di cultura che aveva caratteristiche diverse dalle altre forme della cultura e che giunse faticosamente, anche in polemica con il sapere che si incarnava nei monasteri e con le università, a crearsi sue proprie istituzioni e un suo specifico linguaggio.

Le figure dominanti nel mondo della cultura, in Occidente, erano state per un migliaio di anni (vale a dire per i dieci secoli del Medioevo) il santo, il monaco, il medico, il professore universitario, il militare, l'artigiano, il mago. Si affiancano più tardi a queste figure, quelle dell'umanista e del gentiluomo di corte. Fra la metà del Cinquecento e la metà del Seicento si affacciano figure nuove: il meccanico, il filosofo naturale, il *virtuoso* o libero sperimentatore. I fini che perseguono questi personaggi nuovi non sono né la santità, né l'immortalità letteraria, né la produzione di miracoli atti a stupire il volgo.

Il sapere del quale essi si sentivano portatori richiedeva «sensate esperienze» e «certe dimostrazioni» e, a differenza di quanto era avvenuto nella tradizione, richiedeva che queste due complicate cose *andassero insieme*, fossero indissolubilmente legate l'una all'altra. In quel mondo ogni affermazione deve essere «pubblica», cioè legata al controllo da parte di altri, deve essere presentata e dimostrata ad altri, discussa e soggetta a possibili confutazioni. In quel mondo ci sono persone che ammettono di aver sbagliato, di non riuscire a dimostrare ciò che intendevano dimostrare, che debbono arrendersi alle evidenze che altri hanno addotto. In quel mondo si teorizza che il modo di comportarsi, nelle contrapposizioni e nelle discussioni, debba essere severo verso gli

errori, ma cortese verso le persone, dato che il problema non è quello di provocare gli avversari, ma di convincerli. Nel Seicento, gruppi di studiosi che si occupavano di cose differenti, che avevano un atteggiamento fortemente critico verso il modo in cui le università trasmettevano il sapere dettero vita, all'interno della più vasta e sanguinosa e intollerante società nella quale vivevano a più piccole e tolleranti e accettabili società. Il prezzo che pagavano per ottenerne il funzionamento era davvero alto: escludeva dalla discussione tutto ciò che direttamente riguardava la religione e la politica. Bisognava preliminarmente accettare di lasciare religione e politica fuori da quella porta che separava l'Accademia dal resto del mondo. I Lincei «hanno per costituzione particolare sbandita da' loro studii ogni controversia fuor che naturale e matematica, e rimosse le cose politiche». A tutti i membri della società – recita un testo della Royal Society – «si chiede un modo di parlare discreto, nudo, naturale, significati chiari, una preferenza per il linguaggio degli artigiani e dei mercanti piuttosto che per quello dei filosofi».

Le ironie contro le «torri d'avorio» nelle quali amerebbero rinchiudersi gli intellettuali (che darebbero in tal modo prova di egoismo o di egoismo e viltà insieme congiunti), le giaculatorie sulla necessità dell'impegno e dello «sporcarsi le mani» non sono valsi e non valgono a togliere, a quella scelta, né la sua grandezza, né quella inarrestabile forza che Max Weber e Robert K. Merton hanno, in modi diversi, splendidamente illustrato.

In quel nuovo mondo ogni uomo può giungere alla verità. Non ci sono più, come voleva un'antica e non spenta tradizione, uomini animali e uomini spirituali o due volte o tre volte uomini. Il che vuol dire anche che non ci sono persone sacre e non ci sono testi sacri. Sacerdoti, Profeti ed Annunciatori del Destino non sono cittadini di quel nuovo mondo. La chiarezza e la non-ambiguità dei discorsi, l'assenza di infingimenti nelle discussioni, l'idea che lo scetticismo sia doveroso e che sottoporre alla prova di un pubblico processo le affermazioni di qualcuno non debba essere considerato offensivo da costui, la regola del reciproco rispetto, l'ideale di un sapere *pubblico* vennero proposti, come alternative alle raffinate sottigliezze della tarda Scolastica e alle oscurità della tradizione ermetica in un'età dominata, forse più di ogni altra, dalla pratica della dissimulazione e dalla sua esplicita teorizzazione.

Io credo che gli storici dell'idea della tolleranza dovrebbero degnare di una qualche considerazione anche il mondo, a loro del tutto sconosciuto, della storia della scienza. Dentro quella storia fu infatti teorizzato, assai prima che comparissero i testi di John Locke, che tutti coloro che possono essere qualificati come appartenenti ad una comunità scientifica hanno diritto di parola, che è lecito discutere di tutto e che l'inevitabile varietà delle opinioni è un bene da difendere e non un male da estirpare. Nella *History of the Royal Society* di Thomas Sprat si trova scritto quanto segue:

«Per quanto concerne i membri che devono costituire la Società (è la Royal Society), è da notare che sono liberamente ammessi uomini di differenti religioni, paesi e professioni (...). Essi professano apertamente di non preparare la fondazione di una filosofia inglese, scozzese, irlandese, papista o protestante, ma quella di una filosofia del genere umano [...]. Essi hanno tentato di porre

la loro opera in una condizione di perpetuo accrescimento, stabilendo un' inviolabile corrispondenza tra la mano e la mente. Hanno cercato di farne l'impresa non di una stagione o di una fortunata opportunità, ma qualcosa di saldo, durevole, popolare, ininterrotto. Hanno cercato di liberarla dagli artifici, gli umori, le passioni delle sette, di trasformarla in uno strumento mediante il quale l'umanità possa ottenere il dominio sulle cose e non solo quello sui giudizi degli uomini».

Nel nostro mondo sono certo presenti molti segreti, e in esso vivono molti teorici e pratici degli *arcana imperi*. Ci sono anche moltissime e spesso non "oneste" dissimulazioni. Anche nella storia della scienza sono stati e con ogni probabilità sono anche oggi presenti dei dissimulatori. Ma credo sia importante notare che nella letteratura scientifica e nella letteratura sulla scienza non esiste né potrà esistere – a differenza di quanto è largamente accaduto e accade nel mondo della politica – un *elogio* o una valutazione positiva della dissimulazione o una qualche forma di comprensione o di tolleranza verso la menzogna. Nel mondo della ricerca (che non coincide con il grande mondo nel quale conduciamo le nostre vite) dissimulare o mentire vuole dire solo truffare o tradire. Dopo di allora gli scienziati, in quanto costituiscono una comunità, possono essere costretti alla segretezza, ma devono, appunto, essere costretti. Quando una tale costrizione si verifica, variamente protestano o addirittura, come anche nello scorso secolo è avvenuto, si ribellano ad essa. La particella *di* nell' espressione linguistica leggi *di* Keplero non indica affatto una proprietà: serve solo a perpetuare la memoria di un grande personaggio. La segretezza, all' interno della comunità dei filosofi naturali e degli scienziati, è diventata un *disvalore*. Dato che, come ho detto all' inizio, sono davvero poche le cose che nella definitivamente spariscono, il tema della segretezza tende di continuo a ricomparire. Molti artigiani ed ingegneri del Rinascimento insistono sulla opportunità di mantenere segreti i propri ritrovati. Le prime patenti risalgono all' inizio del 400 e la crescita del numero delle patenti avviene in modo esplosivo nel secolo XVI. Tuttavia le motivazioni sono, in questo settore, soltanto economiche e mai collegate all'idea che solo pochi eletti siano degni di accedere a verità che invece ad altri sono precluse.

Al di là di tutti i compromessi e dei molti cedimenti al potere qualcosa che ha a che fare con il rapporto tra ricerca della verità e ricerca del consenso appare ancora presente nella scienza di oggi. Leo Szilard, il fisico americano di origine ungherese, amico di Einstein, che collaborò al progetto Manhattan, aveva dovuto (per la prima volta nella vita) partecipare a riunioni con esponenti politici. Dopo la prima di queste riunioni, gli chiesero una impressione. Rispose:

«Quando uno scienziato dice qualcosa, i suoi colleghi scienziati si chiedono subito: "quello che ha detto è vero?" Quando un politico dice qualcosa, i suoi colleghi politici si chiedono subito: "perché lo avrà detto?"»

GEOMETRIA NON EUCLIDEA: UN CASO ESEMPLARE NELLA STORIA DEL PENSIERO SCIENTIFICO

RENATO BETTI

Dipartimento di Matematica 'Francesco Brioschi', Politecnico di Milano

Introduzione

La vicenda della geometria non euclidea si sviluppa lungo un arco di più di 2000 anni e ha uno svolgimento in qualche modo esemplare, dalla sua origine, fra il III e il IV secolo a.C. con la grande opera di Euclide *Gli Elementi*, fino alla soluzione, che si risolve semplicemente in un diverso punto di vista dal quale considerare il problema e che ha luogo nella prima metà dell'Ottocento. Una soluzione semplice per modo di dire, perché in realtà, come spesso accade, la difficoltà è proprio quella di assumere un nuovo punto di vista.

Già alla fine del Settecento, la conclusione è certamente nell'aria, perché spunta da più parti distinte e non collegate. Coglie tuttavia impreparata la comunità matematica e risulterà addirittura traumatica per la cultura scientifica. Per quale motivo? Perché è una soluzione originale, non convenzionale. Non si tratta di un risultato tecnico, ad esempio della dimostrazione di un teorema, come si è abituati da sempre in matematica: ora si prende coscienza del fatto che, oltre alla geometria formalizzata da Euclide, possono esistere altre geometrie, che per questo saranno dette 'non euclidee' – la felice terminologia è in una lettera di Gauss del 1824. Ciò che risulta difficile e addirittura traumatico per la cultura del tempo è accettare e prendere sul serio il nuovo punto di vista, vale a dire che possano esistere molte geometrie.

Questo è il fatto. Ma non c'è una sola geometria – domandiamo anche noi – non è unico lo spazio da formalizzare? Ormai, dopo questi sviluppi, è riconosciuto e accettato che l'idea di 'spazio' si liberi da una forma di rigidità e di ingenuità, dettate dall'esigenza di una corrispondenza immediata fra geometria e mondo fisico. Nella concezione che viene dal periodo classico, la geometria deve descrivere in veste idealizzata le proprietà delle forme che percepiamo con i sensi: liberandola da una troppo stretta corrispondenza con la realtà sensibile, la si rende disponibile alla rappresentazione di altri numerosi problemi, che hanno tipicamente natura matematica. Così nasce l'idea di 'spazio matematico'.

Forse questo è il maggior contributo dei fondatori della geometria non euclidea: il «relativismo della nozione di spazio». Si parla di questo. Ma per ora è bene introdurre il problema delle parallele ed accennare al suo svolgimento millenario.

1. Il problema delle parallele

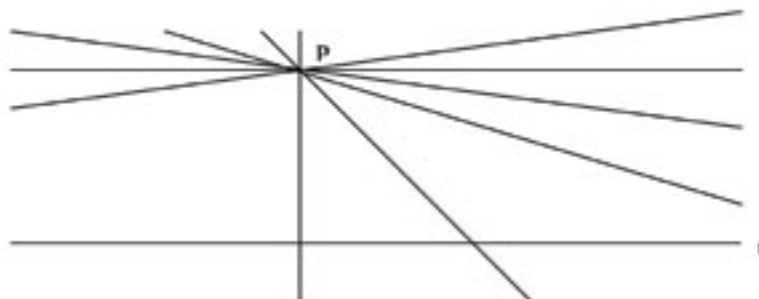
1.1

Vale la pena di ricordare la problematica. Siamo all'inizio della geometria, quando la materia nasce come scienza razionale, fra V e III secolo a.C. e, in maniera intuitiva, si pensa ad un'unica geometria di un unico spazio – quello nel quale viviamo. Questa geometria, che è dunque considerata come l'unica, vera geometria del nostro mondo, viene descritta in termini assiomatici in un'opera che rimarrà famosa: gli *Elementi* di Euclide.

Nel caso del piano, Euclide fissa cinque postulati – vale a dire cinque proprietà che sono assunte come vere senza bisogno di dimostrazione – e, a partire da questi postulati, dimostra in maniera rigorosa le altre proprietà delle figure.

Il metodo assiomatico, che ha fatto la sua prima comparsa negli *Elementi*, desta subito grande ammirazione e verrà considerato per due millenni il «metodo deduttivo» per eccellenza. Ma, subito dopo la comparsa degli *Elementi* di Euclide, la comunità scientifica – matematici, fisici, filosofi, naturalisti e anche musicisti – solleva alcune perplessità sul V ed ultimo postulato della geometria piana – il cosiddetto «postulato delle parallele».

Ecco la problematica di questo postulato, espressa in modo diverso ma equivalente a quella data da Euclide: in un piano sono dati un punto P e una retta r che non passa per il punto P ; si consideri il fascio delle rette passanti per P e le intersezioni con la retta r . Facendo ruotare la retta nel fascio, l'intersezione si sposta da una parte lungo la r finché, continuando la rotazione, scompare da quella parte e ricompare dall'altra. La domanda che sorge in modo spontaneo è la seguente: quanto è grande l'intervallo delle rette appartenenti al dato fascio per P che non incontrano più la r da una parte ma non la incontrano ancora dall'altra?



Secondo il postulato delle parallele di Euclide non si tratta di un intervallo. C'è un unico caso: esiste un'unica parallela per P a r vale a dire, esiste un'unica retta che non ha intersezioni con la retta r . In questo consiste il postulato.

1.2

Perché questo enunciato ha sollevato problemi fin dal suo sorgere? Non si tratta certo

di una proprietà particolarmente semplice da enunciare – almeno se la si confronta con gli altri postulati, a esempio con il primo postulato della geometria di Euclide:

per due punti dati passa una sola retta

Ma non è neanche troppo complicata. Non è questo il motivo. Il fatto è che le manca l'evidenza inarrestabile degli altri postulati, l'evidenza che in ogni caso si richiede alle proprietà da assumere a priori, senza dimostrazione.

Attenzione: la proprietà espressa dal postulato non viene considerata falsa. Si dimostra facilmente, senza far ricorso al postulato delle parallele, che basta prendere la perpendicolare della perpendicolare alla retta data per avere una parallela. La questione riguarda l'unicità della parallela, cioè il fatto che non ne esistano altre: come essere sicuri a priori, senza fare una dimostrazione, che due rette si intersecano o prima o poi, pur senza vederle mai intersecare?

Una simile certezza obbliga a considerare le rette nella loro interezza, come infinità in atto, mentre nella concezione classica – e forse anche nella nostra maniera di capire questi fenomeni geometrici – la retta è da considerare come un segmento che si può estendere quanto si voglia, ma è pur sempre un infinito in potenza: la proprietà che si può controllare è che le rette non si intersechino in una loro estensione, ma nulla si può dire a priori, cioè senza una dimostrazione, che riguardi l'intero loro percorso. Per affermare una proprietà che coinvolga tutta la loro estensione, è necessario avere una dimostrazione.

Per questa insoddisfazione nei confronti del postulato delle parallele, fin dai tempi più antichi, gli scienziati – che pure erano grandemente ammirati dall'opera di Euclide e ritenevano la proprietà vera e necessaria – cominciano a pensare che si tratti di un teorema, cioè di una proprietà che si può dimostrare a partire dai precedenti quattro postulati: in questo modo, si pensa, farà parte del corpo geometrico senza che la si debba assumere senza dimostrazione.

1.3

Tuttavia, nel corso di due millenni, nonostante numerosi e spesso acuti tentativi, non si riesce mai a dimostrarlo. O meglio, di volta in volta si trovano numerose dimostrazioni ma poi o prima si scopre che sono basate tutte, implicitamente, su assunzioni non dimostrate, che sono quindi equivalenti al postulato delle parallele.

Vengono trovate numerose proprietà di questo tipo. Ad esempio: una proprietà che equivale al postulato delle parallele è che la somma degli angoli interni di un triangolo sia uguale a 180 gradi. Oppure: dire che due rette parallele sono equidistanti¹. Oppure anche: che esistano due triangoli simili, o che una trasversale che taglia una di due rette parallele tagli anche la seconda.

Alla fine del '700, l'impossibilità a dimostrare il postulato delle parallele viene considerato in maniera ossessiva dalla comunità scientifica. Nel 1759, osserva d'Alembert, che aveva redatto la voce *Geometria* per la grande Enciclopedia francese:

...la definizione e le proprietà della retta e quella delle parallele sono lo scoglio

e per così dire lo scandalo degli elementi della geometria.

Oggi, duemila anni dopo e col senno di poi, noi sappiamo che una dimostrazione di questo tipo non si poteva trovare. Sappiamo che il postulato delle parallele è indipendente dagli altri perché si sono trovate alcune superfici sulle quali, interpretando in maniera opportuna i termini fondamentali – punto, retta, intersezione, parallelismo ecc. – valgono tutti i postulati di Euclide tranne quello delle parallele: se il postulato delle parallele fosse una conseguenza dei precedenti quattro postulati, dovrebbe valere automaticamente ogni volta che valgono questi. Come si dice, esistono dei modelli di geometria non euclidea.

Il diverso punto di vista, quello delle geometrie non euclidee, consiste nel negare il postulato delle parallele e dunque nel negare l'esistenza oppure negare l'unicità della parallela tracciata da P ad r : per il punto P non esistono rette che non abbiano intersezione con la retta data, cioè che le sono parallele (e in questo caso si parla di «geometria ellittica») oppure ne esiste più di una (e in questo caso si parla di «geometria iperbolica»).

Come sono contro-intuitive entrambe le proprietà! E il problema delle parallele si trasforma di conseguenza: sarà consistente la teoria che si ottiene assumendo l'uno o l'altro di questi postulati non euclidei? Oppure, si potranno trovare conseguenze contrarie l'una all'altra e quindi si può concludere che la teoria conduce ad un assurdo? Che è inconsistente?

Quando verrà trovato un «modello» per le rispettive teorie (Beltrami nel 1868, Riemann in un lavoro del 1854 ma pubblicato nel 1866)² e viene risolto di conseguenza il problema della consistenza logica della teoria, le geometrie non euclidee ricevono la stessa dignità logica, se non psicologica, che aveva quella euclidea.

1.4

Sembra tutto molto facile: se si assume un postulato si ottiene una geometria, se lo si cambia, si ottiene una geometria diversa. In realtà sappiamo che l'autorità e il prestigio che l'opera di Euclide manteneva ancora nell'800 sconsigliano di rivelare la scoperta che il problema delle parallele è solo una questione di ipotesi. Bisogna aspettare tempi più maturi. Bisogna aspettare che le intuizioni si fissino in regole matematiche precise, almeno secondo Gauss (1777-1855), il maggiore dei matematici della prima metà dell'800, il riconosciuto "princeps mathematicorum" della comunità scientifica, che ripone letteralmente in un cassetto le proprie considerazioni relative al postulato delle parallele e, così facendo, ripone anche i propri legittimi dubbi e le proprie considerazioni sulla natura dello spazio.

Così il merito della scoperta tocca a matematici più giovani e meno famosi – Nikolaj Ivanovič Lobačevskij (1792-1856) in Russia e János Bolyai (1802-1860) in Ungheria – che lavoravano nello stesso periodo e in maniera molto simile, ma indipendentemente l'uno dall'altro. Forse il merito della scoperta spetta a loro perché questi giovani matematici non avevano una reputazione da difendere come i grandi

e famosi scienziati e per questo erano meno sensibili alla responsabilità di mettere in discussione l'autorità di Euclide.

E quella di mettere in discussione la geometria di Euclide non era una questione di poco conto. Di fatto, la geometria euclidea ha sempre avuto nei tempi un doppio ruolo per la cultura, e non solo per la cultura scientifica: da una parte c'era il ruolo tecnico – quello che tutti si aspettano dalla geometria: studiare le proprietà delle figure – ma dall'altro assolveva anche a una funzione metodologica: quella di fissare i canoni del rigore scientifico – disciplinare il ragionamento ed educare le menti alla deduzione rigorosa³.

Così, una critica al postulato delle parallele metteva in discussione tutto il complesso della scienza conosciuta ed accettata fino a quel momento, perché la colpiva sia nel merito delle proprietà da dimostrare che, si pensava, nel metodo scientifico della deduzione.

1.5

Bisogna anche considerare che sulla geometria euclidea si basava tutta la fisica moderna, quella che per noi è classica, ma che allora era relativamente recente, la fisica di Galileo e di Newton: la struttura dello spazio euclideo, con le sue rette parallele che proseguono all'infinito mantenendosi sempre equidistanti, era senz'altro quella più idonea a descrivere la legge di inerzia, in cui i corpi mantengono indefinitamente il proprio stato di moto rettilineo uniforme.

Che senso ha che possano esistere molti spazi, con proprietà completamente diverse riguardo alle figure che in essi si possono tracciare? Come cambiano le leggi della fisica? Insomma, il vero problema è quello di sapere che cos'è lo spazio.

Ci si rende conto a fatica – di fatto è stata una grande conquista concettuale – che lo spazio non è l'ambiente che ingenuamente si percepisce con i sensi. Una specie di recipiente nel quale avvengono i fenomeni fisici ma che sostanzialmente è indifferente rispetto a questi fenomeni. Lo spazio ora può essere anche una costruzione intellettuale e può anche essere strutturalmente modificato dai fenomeni che in esso hanno luogo.

2. Geometria e spazio

2.1

Così, quella di “spazio” è una nozione relativa. In che cosa consiste il relativismo di questa nozione e come si manifesta? Almeno in tre aspetti.

Primo. È stato autorevolmente osservato che:

La geometria euclidea termina quando cominciano 'le geometrie'

(o meglio, non termina, ma continua insieme alle altre).

Infatti, fra Sette e Ottocento, diversi studi di carattere geometrico – seppure non inquadrati nella ufficiale geometria euclidea – nascono in maniera frammentaria, indipendenti l'uno dall'altro e dal problema delle parallele, originati da autonome problematiche. Si tratta ad esempio della «geometria descrittiva», che risponde al

problema seguente: come rappresentare le figure solide, tridimensionali, su un piano, che di dimensioni ne ha due? In seguito della «geometria proiettiva»: quali proprietà delle figure rimangono invariate con le operazioni di proiezione da un punto e sezione con un piano? Anche la scoperta delle geometrie non euclidee fornisce nuovi esempi e nuovi spazi, dotati di proprietà radicalmente diverse da quello tradizionale euclideo.

Inoltre si presentano altre esperienze geometriche, originate dalla necessità di considerare una superficie come spazio in sé, indipendente dalla sua immersione in un altro ambiente fisico, euclideo o non euclideo che sia. Quelle che importano sono le proprietà che si possono dimostrare senza uscire dalla superficie: nasce così la «geometria intrinseca» delle superfici, da parte di Gauss – poi generalizzata da Riemann in geometria intrinseca delle varietà a un numero qualsiasi di dimensioni – come esigenza di rappresentazione territoriale conseguente agli studi di geodesia condotti dallo stesso Gauss.

Con queste esperienze, e con le teorie che vengono di volta in volta avanzate, si consolida l'idea che esistano più spazi, ciascuno relativo a problemi di natura diversa.

2.2

Un secondo argomento è il seguente: accanto allo 'spazio' ed alle 'figure' in esso contenute si presentano esplicitamente i 'problemi', che spesso sono all'origine delle nuove nozioni. La coppia 'figura – problema' dà luogo a quello che secondo me si deve chiamare «il fenomeno geometrico». Il secondo aspetto importante del relativismo della nozione di spazio è il rovesciamento del rapporto di priorità fra lo spazio e i suoi fenomeni geometrici. Cambia l'ordine di importanza:

Lo spazio matematico diventa lo spazio dei fenomeni geometrici.

Se in precedenza lo spazio era l'ambiente di studio dei "fenomeni geometrici", relativi a curve, superfici etc. da ora il fenomeno diventa l'ente primitivo, attorno al quale si costruisce lo spazio più opportuno per descriverlo e spiegarne le proprietà.

Un esempio evidente di questo rovesciamento di priorità è dato dalla nozione di «dimensione»: è noto che alcuni matematici, in particolare Hermann Grassmann (1809-1877) nella sua *Teoria dell'estensione* (pubblicata nel 1844), intraprendono uno studio sistematico degli spazi di dimensione arbitraria, e della relativa geometria, nel desiderio di trattare la nozione di spazio in maniera puramente intellettuale, senza limitare le considerazioni a quello che viene percepito con i sensi: la dimensione è il numero di parametri liberi del fenomeno sotto esame e lo spazio, per così dire, 'si adatta' con la sua generalizzazione al problema da studiare.

2.3

Ecco un terzo aspetto del relativismo della nozione di spazio. A metà dell'800 il panorama della geometria è composito e frammentato, pieno di spinte ma privo di un principio unitario. I vari settori di studio che si ispirano o si riconducono alla geometria, le esperienze e le idee che emergono, hanno una relativa autonomia concettuale ma sono legati soltanto dalla terminologia alla vecchia geometria, cioè dal fatto che in ogni

caso si parla di punti, rette, curve etc. Per il resto, sono scarsamente collegati fra di loro. Oltre a contribuire con i propri originali spazi a questo panorama geometrico, la geometria non euclidea fornirà un principio unitario a tutta la materia. Questo avviene quando abbandona il proprio aspetto elementare di studio delle immediate conseguenze del postulato che regola il parallelismo di rette. Allora si inserisce perfettamente, completandolo e unificandolo, nel processo di formazione delle nuove geometrie e dei nuovi spazi. In sintesi:

La geometria non euclidea è il 'tassello' mancante di una teoria geometrica unitaria.

Innanzitutto, si tratta della geometria di una superficie curva, e quindi va compresa e studiata nell'ambito della geometria intrinseca delle varietà inaugurata da Gauss. In questo contesto è suscettibile di una «interpretazione differenziale». Poi, è in tutto e per tutto una geometria, quindi si lega al punto di vista di un gruppo di trasformazioni che agiscono sui suoi enti, seguendo le idee che, in questo settore, stava sviluppando Felix Klein (1849-1924): dunque si presta anche ad una «interpretazione gruppale». Ma di più, come le altre geometrie, anche per le geometrie non euclidee si afferma la subordinazione della metrica al punto di vista proiettivo:

La geometria proiettiva è tutta la geometria

esclama in questo periodo Arthur Cayley (1821-1895), il cui lavoro permette di formalizzare la differenza fra le geometrie con l'uso di differenti coniche. E questa pervasività e unità della geometria sono fornite dalla comprensione del ruolo delle geometrie non euclidee.

Insomma: la geometria non euclidea, allo stesso tempo, completa una nozione generale di geometria e le fornisce un nuovo statuto e nuove direzioni di studio, il cui programma è bene indicato da Felix Klein ⁴.

3. La natura dello spazio

3.1

Nel tempo, molti sintomi della presa di coscienza che il problema delle parallele riguarda la natura dello spazio e conducono a «nuove geometrie» sorgono in maniera indipendente. Fra i tanti, un precursore importante è il matematico svizzero Johann Heinrich Lambert (1728-1777), il quale era particolarmente interessato alle premesse di ogni materia, piuttosto che ai suoi fondamenti. Nel corso delle sue ricerche fa due osservazioni importanti che prefigurano acutamente i punti nodali della geometria non euclidea di tipo iperbolico e che sono del tutto estranee all'intuizione euclidea:

Dovrei almeno concludere che questa ipotesi [dell'angolo acuto, cioè della geometria iperbolica] vale su una sfera di raggio immaginario

intuendo che in questo caso la trigonometria è la stessa della sfera, pur di cambiare r in ri (dove i è l'unità immaginaria). E anche:

La più sorprendente conseguenza è che sotto questa ipotesi si avrebbe una misura assoluta di lunghezza per ogni retta, di area per ogni superficie e di

volume per ogni spazio fisico.⁵

La misura assoluta di lunghezza corrisponde a un segmento costante e nasce da una corrispondenza biunivoca fra angoli e segmenti che, almeno in apparenza, violava il “principio di omogeneità” secondo il quale non si può confrontare la “grandezza assoluta” di un angolo con quella “lineare” di un segmento. Ma, dal punto di vista formale, si capisce che la misura assoluta non fornisce che un parametro dal quale dipende la nuova geometria, allo stesso modo con cui la geometria sferica dipende dal raggio della sfera. Questa misura è il “raggio di curvatura” della pseudosfera di Beltrami, che è storicamente il primo modello di geometria iperbolica. Inaspettatamente è un numero complesso, vale a dire la curvatura del piano iperbolico è negativa.

3.2

Di fatto, la riflessione matematica sulla natura dello spazio prende piede fra Sette e Ottocento, proprio quando si comincia a intuire quale soluzione vada data al problema delle parallele.

Questa riflessione era naturalmente da sempre presente in fisica e filosofia. Riguardava la essenza qualitativa dello spazio (di cosa si compone e di quali proprietà gode: è corpuscolare o ininterrotto, è omogeneo oppure no, isotropo o anisotropo?) e gli aspetti quantitativi (qual è la sua estensione, è finito o infinito, può essere «vuoto?»), con contrapposte concezioni: da una parte lo spazio è considerato come una specie di contenitore in grado di essere riempito con gli oggetti più diversi, rispetto ai quali è sempre ininfluenza, dall'altra – in contrasto con questa visione, risalente al primo atomismo greco, c'è quella, psicologicamente se non storicamente precedente, dello spazio come luogo dei corpi (topos): lo spazio è una maniera per collegare sistematicamente i diversi corpi e porli in relazione.

Una simile visione si afferma anche in matematica sulla spinta delle geometrie non euclidee: lo spazio è spesso determinato dai fenomeni, anche da quelli geometrici, anziché il contrario.

3.3

Una delle prime osservazioni precise – ‘da matematico’ – sulla natura dello spazio forse è da attribuire a Lobačevskij. Qual è la sua concezione?

Fino dal primo scritto (un manuale di geometria dedicato agli studenti universitari, redatto nel 1823 ma mai pubblicato durante la sua vita) si preoccupa di esporre le proprie concezioni sugli oggetti di base della geometria e sui caratteri che li distinguono: i dati primitivi sono i «corpi», la cui proprietà fondamentale è data dalla loro «estensione» e la cui unica relazione di rilevanza geometrica è il «contatto».

Anche nelle opere successive, l'evoluzione dei concetti mostra chiaramente che secondo Lobačevskij i corpi materiali sono parti di un tutto che non ha bisogno di essere separatamente definito. È questo ‘tutto’, non definito in sé ma attraverso i corpi, che costituisce lo spazio.

Lo spazio in sé, separatamente considerato, per noi non esiste. Detto ciò,

nessuna contraddizione può presentarsi nella nostra mente ammettendo che certe forze in natura seguano una loro particolare geometria e altre, un'altra⁶.

3.4

L'intreccio che la geometria non euclidea determina con la fisica è profondo, e rilevato già nella prima opera di Lobačevskij:

Rimane qui da studiare il tipo di cambiamento che viene determinato dall'introduzione della geometria immaginaria nella meccanica, se non si trovino qui dei concetti e indubbi sulla natura delle cose che ci obbligano a limitare o addirittura non ammettere la dipendenza dei segmenti dagli angoli. Tuttavia, si può prevedere che i cambiamenti in meccanica dovuti ai nuovi principi della geometria saranno dello stesso genere di quelli mostrati dal signor Laplace (*Mécanique Céleste* t.I, libro I, cap. II) supponendo possibile ogni dipendenza della velocità dalla forza o – più propriamente – supponendo che le forze, misurate sempre da velocità, siano soggette ad altre leggi oltre la loro composizione⁷.

Non si può dubitare di un'unica cosa, che le forze producano da sé i movimenti, le velocità, il tempo, le masse e perfino le distanze e gli angoli⁸.

3.5

L'impatto della scoperta delle geometrie non euclidee ha indebolito la tradizionale fiducia nella matematica e nella fisica ma aperto nuove prospettive in tutti i settori.

... se Dio esiste, e se in realtà ha creato la terra, l'ha creata, come ci è perfettamente noto, secondo la geometria euclidea, e ha creato lo spirito umano dandogli soltanto la nozione delle tre dimensioni dello spazio. Nondimeno si sono trovati e si trovano tuttora geometri e filosofi, anche fra i più illustri, i quali dubitano che tutto l'universo o, con espressione anche più larga, tutto l'esistente sia stato creato soltanto in conformità della geometria euclidea, e osano perfino supporre che due linee parallele, le quali, secondo Euclide, non possono assolutamente incontrarsi sulla terra, possano invece incontrarsi in qualche punto dell'infinito. Io, mio caro, ho deciso che se non posso comprendere neppure questo, meno ancora potrei comprendere Dio. Confesso umilmente di non avere alcuna attitudine a risolvere tali problemi, io ho uno spirito euclideo, terrestre...sono tutti problemi assolutamente non adeguati a uno spirito creato con la sola nozione delle tre dimensioni⁹

Dice Ivan Karamazov, per presentare al fratello Aleksej il proprio credo.

E che cosa immagini quando ti dicono che due linee parallele si intersecano nell'infinito? Io credo che se fossimo troppo coscienti non esisterebbe la matematica... Secondo me è possibilissimo che qui gl'inventori della matematica abbiano inciampato nei propri piedi. Perché mai, infatti, ciò che è al di là dei limiti del nostro intelletto non dovrebbe permettersi di giocare all'intelletto qualche tiro birbone?¹⁰

così Beineberg «l'unico con il quale si potesse parlare di queste cose», come afferma il giovane Törless.

Conclusione

Sicuramente l'origine della geometria è nella «misura della terra», come rivela il suo nome, e quindi in un'attività pratica: all'inizio è una disciplina di tipo empirico. In seguito, i matematici del periodo classico introducono il metodo assiomatico: è sufficiente assumere pochi principi per derivare in maniera rigorosa le altre proprietà delle figure. Se questa scoperta ha avuto il grande effetto di presentare la geometria come un modello di rigore scientifico, con essa si apre per la prima volta la strada a discussioni sugli oggetti di cui si occupa.

Molte risposte vengono date da matematici e filosofi ai problemi che si presentano, sempre nella certezza incontrovertibile della verità dei risultati. L'esperienza del mondo fisico interviene per fissare i postulati. I geometri vedono il proprio lavoro come la descrizione sempre più accurata dei fenomeni naturali e ritengono di contribuire in tal modo a svelare il disegno segreto – e armonioso – dell'universo.

Prima di Lobačevskij e di Riemann, il dibattito filosofico sulla natura dello spazio vive soprattutto sui problemi della fisica. In Gauss il problema principale della geometria è quello di descrivere lo spazio, preso in sé, rispetto alle proprietà intrinseche, le uniche che sono direttamente accessibili all'attività pratica. In Lobačevskij invece, il problema è quello di sapere se la geometria euclidea continua a valere quando ci si estende agli spazi astronomici.

Ma gli spazi si moltiplicano e con essi l'idea di spazio perde la propria connotazione originaria. La geometria sembra recidere definitivamente i propri millenari legami con la realtà fisica.

Alla fine dell'Ottocento è discutibile quale sia la natura dei postulati geometrici e di conseguenza quale forma di conoscenza sia fornita dalla geometria. Se, all'inizio della storia geometrica, con Euclide, si trattava di conoscenza «assoluta», fra Sette e Ottocento si passa dalla «intuizione pura» di Kant¹¹ alle «ipotesi» di Riemann, poi all'idealizzazione dell'esperienza di Helmholtz (1821-1894)¹². Secondo Poincaré (1854-1912)¹³ la geometria è solo «convenzione» e la sua scelta si basa sul criterio dell'utilità. Sul lato tecnico, la realtà viene incorporata da Felix Klein nei gruppi di trasformazioni e da David Hilbert (1862-1943) ingabbiata in una struttura assiomatica che fornisce una conoscenza «formale»¹⁴.

Il tema della «descrizione e conoscenza dello spazio», che aveva animato per secoli il dibattito geometrico tende sempre più spesso a individuare un'autonoma «realtà matematica», rispetto alla quale gli enti fondamentali e le loro relazioni vengono assegnati – e studiati – in maniera analoga a quelli «naturali».

L'estensione raggiunta, insieme alla grande unità della geometria, sembra averle dato una nuova consapevolezza di sé: solo al fondo rimane l'idea che la geometria si occupi ancora di realtà – di un nuovo tipo di realtà.

Di fatto tuttavia, nella loro elaborazione e sistemazione delle nuove geometrie, i matematici non hanno rinunciato a mantenere i contatti con il mondo fisico. E i

fisici dal canto loro non hanno rinunciato a cercare nelle astrazioni della matematica le strutture più adatte a descrivere fenomeni sempre nuovi e complessi – tipicamente quelli relativi ai fenomeni radianti – che si adattano male al vecchio spazio euclideo. Così, i rapporti della geometria con il mondo fisico si ristabiliscono a un altro livello e qui comincia un'altra storia.

NOTE

¹ È interessante osservare che, secondo il matematico e filosofo Federigo Enriques (1871-1947), le nozioni di parallelismo e di equidistanza corrispondono a due percezioni diverse degli enti geometrici: a una percezione di tipo visivo e qualitativo il fatto che due rette non si incontrino, ad una di tipo tattile e quantitativa la nozione di equidistanza (in *Problemi della scienza*, Zanichelli, Bologna 1906).

² Eugenio Beltrami (1835-1900), in “Saggio di interpretazione della Geometria non euclidea”, *Giornale di Matematiche* 6 (1988). Bernhard Riemann (1826-1866), in “Sulle ipotesi che stanno alla base della geometria”, pubblicato in italiano da Bollati Boringhieri, Torino 1994.

³ Secondo un famoso aneddoto, proprio studiando la dimostrazione euclidea del teorema di Pitagora, il filosofo Thomas Hobbes (1588-1679) viene catturato alla geometria dalla sua precisione e dal suo rigore metodologico.

⁴ In “Considerazioni comparative intorno a ricerche geometriche recenti”, meglio noto come *Programma di Erlangen*, prolusione accademica del 1872 all’università di Erlangen. In italiano si trova in “Pristem/storia: note di matematica, storia, cultura” n. 7 (2002), a cura di L. Magnani e R. Dossena.

⁵ Entrambe le citazioni sono in *Theorie der Parallelinien*, del 1766.

⁶ *Nuovi principi della geometria*, vol. II, p. 159. Le citazioni di Lobačevskij si riferiscono alla sua opera omnia *Polnoe Sobranie Sočinenii*, Mosca-Leningrado 1946-1951. In questo passo, come di consueto, chiama “geometria immaginaria” la geometria non euclidea di tipo iperbolico, distinguendola da quella “ordinaria” (euclidea), e pensando per analogia alla differenza fra numeri immaginari e numeri reali.

⁷ *Sui principi della geometria*, vol. I, p. 261.

⁸ *Nuovi principi della geometria*, vol. II, p. 158-159.

⁹ F. Dostoevskij, *I fratelli Karamazov*, 1880, p. 261 dell’edizione italiana Mursia, Milano 1962.

¹⁰ R. Musil, *I turbamenti del giovane Törless*, 1906, p. 107-108 dell’edizione italiana Einaudi, Torino 1959.

¹¹ *Critica della ragion pura* (1781).

¹² In *Sui fatti che stanno a fondamento della geometria* del 1868.

¹³ Soprattutto in *La scienza e l’ipotesi* (1912), edizione italiana: Signorelli, Roma 1968.

¹⁴ *Fondamenti della geometria* (1899). Edizione italiana: Feltrinelli, Milano, 1970.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Beltrami E., Saggio di interpretazione della Geometria non euclidea, *Giornale di Matematiche*, 6 (1988).
- [2] Betti R., *Lobačevskij. L'invenzione delle geometrie non euclidee*, Bruno Mondadori, Milano 2006.
- [3] Dostoevskij F., *I fratelli Karamazov* (1880), Mursia, Milano 1962.
- [4] Enriques F., *Problemi della scienza*, Zanichelli, Bologna 1906.
- [5] Helmholtz H., Sui fatti che stanno a fondamento della geometria (1868), in *Opere scelte*, UTET, Torino 1967.
- [6] Hilbert D., *Fondamenti della geometria* (1899), Feltrinelli, Milano 1970.
- [7] Kant I. *Critica della ragion pura* (1781), UTET, Torino 1967.
- [8] Klein F., "Considerazioni comparative intorno a ricerche geometriche recenti [*Programma di Erlangen*]", Prolusione all'Università di Erlangen, 1872; trad. it. in *Pristem/storia: note di matematica, storia, cultura*, 7 (2002), a cura di L. Magnani e R. Dossena.
- [9] Lobačevski N. I., *Nuovi principi della geometria*, Boringhieri, Torino 1955.
- [10] Musil R., *I turbamenti del giovane Törless* (1906), Einaudi, Torino 1959.
- [11] Riemann B., *Sulle ipotesi che stanno alla base della geometria*, Bollati Boringhieri, Torino 1994.

INTRODUZIONE ALLA TEORIA DELLA RELATIVITÀ

CLAUDIO CHIUDERI

Dipartimento di Astronomia e Scienza dello Spazio, Università di Firenze

Cent'anni fa Albert Einstein pubblicava sulla prestigiosa rivista *Annalen der Physik* un articolo scientifico dal titolo «Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento». Questo articolo marca l'inizio di una delle maggiori rivoluzioni scientifiche del novecento, la teoria della Relatività Ristretta, e rappresenta uno straordinario monumento all'intelligenza umana. Einstein aveva all'epoca 26 anni e lavorava presso l'Ufficio Federale Brevetti di Berna. La giovane età, il relativo isolamento dal mondo scientifico e il fatto che nello stesso anno Einstein pubblicasse altri quattro lavori di eccezionale levatura (uno gli valse il Premio Nobel molti anni dopo) danno la misura del suo genio. Un'estensione della teoria della Relatività Ristretta, la teoria della Relatività Generale, vedeva la luce nel 1916, dopo una gestazione durata undici anni.

In questo breve articolo cercherò di presentare le idee che stanno alla base delle due teorie, senza ricorrere ad alcun formalismo matematico, ma cercando di illustrare i fatti ed i ragionamenti fisici che hanno portato alla loro formulazione. Ovviamente, visto lo spazio a disposizione, illustrerò solo alcuni aspetti, scegliendoli fra quelli che si prestano ad una esposizione non tecnica e che, d'altra parte, mettono in luce il carattere innovativo della teoria.

1. L'argomento della teoria della Relatività

Per comprendere l'argomento della teoria della Relatività è necessario definire il concetto di legge fisica. La descrizione della natura che la fisica ci offre parte dalla misura di un certo numero di grandezze, quali ad esempio, la posizione, la velocità o l'accelerazione di un corpo, la densità o la temperatura di un gas e così via. Le grandezze fisiche servono a definire lo stato di un sistema. Se il valore delle grandezze fisiche relative a un certo sistema cambia nel tempo, si dice che il sistema evolve. Il valore misurato di una grandezza fisica dipende, in generale, dalle modalità con cui la misura viene effettuata. Per esempio, consideriamo un viaggiatore che legga un libro nello scompartimento di un treno. La posizione del libro rispetto al viaggiatore non cambia nel tempo, poiché entrambi partecipano del moto del treno. Ma la posizione dello stesso libro rispetto ad un osservatore posto a terra, che vede il treno sfilare davanti ai propri occhi, ovviamente cambia, sempre per lo stesso motivo: il libro partecipa del moto del treno. Vediamo dunque che il valore della grandezza fisica "posizione" è diverso per due osservatori differenti. Ne concludiamo che i valori delle grandezze fisiche dipendono dallo stato dell'osservatore, o, come generalmente si dice, dal sistema di riferimento rispetto al

quale le misure sono effettuate.

Una *legge fisica* è una relazione matematica che lega tra loro i valori delle grandezze fisiche. Le leggi della fisica sono dunque la rappresentazione formale dei fenomeni naturali. A questo punto nasce spontanea la domanda: le leggi della fisica, cioè la *forma* delle relazioni tra le grandezze fisiche, dipende anch'essa dal sistema di riferimento, oppure rimane la stessa nonostante che i valori cambino? In altre parole, si può affermare che, almeno in fisica, *la legge è uguale per tutti* (gli osservatori)? La Relatività si occupa appunto di rispondere a questa domanda, anzi dimostra che le leggi possono essere formulate in modo tale da dare alla domanda una risposta affermativa.

2. La relatività di Galileo

Il concetto di relatività in fisica precede di quasi tre secoli il lavoro di Einstein. La prima enunciazione di tale concetto risale a Galileo Galilei che nel 1632 intuì che le leggi della meccanica formulate da due osservatori che si muovono uno rispetto all'altro di *moto rettilineo e uniforme* debbono essere identiche. Le formule matematiche, che consentono di collegare tra loro i valori delle grandezze cinematiche (cioè quelle grandezze che servono a definire il moto) nei due sistemi, vengono dette trasformazioni di Galileo. La relatività galileiana è quindi contenuta nell'affermazione che le leggi della meccanica sono invarianti (cioè la loro forma non cambia) per trasformazioni di Galileo. Una conseguenza di questo fatto è l'impossibilità di mettere in evidenza, con esperienze di *meccanica*, il moto assoluto di un sistema. In altre parole, tutto quello che possiamo affermare dal confronto tra esperienze di meccanica eseguite in due sistemi diversi è appunto che essi sono in uno stato di moto relativo (rettilineo ed uniforme), ma non possiamo stabilire se uno dei due sia fermo e quale.

Isaac Newton nel 1687 formula le leggi della meccanica che portano il suo nome e che inglobano la relatività galileiana. Il primo principio della meccanica newtoniana, il principio d'inerzia, stabilisce che un corpo non soggetto a forze può trovarsi soltanto in uno stato di quiete o di moto rettilineo e uniforme. Tutti i sistemi in cui vale tale principio vengono detti sistemi inerziali. È chiaro che se un sistema è inerziale, lo sono anche tutti quelli in moto rettilineo e uniforme rispetto al primo. Infatti, se un corpo non soggetto a forze è in quiete nel primo sistema, esso apparirà muoversi di moto rettilineo e uniforme negli altri e quindi anche in questi varrà il principio d'inerzia. La relatività galileiana stabilisce dunque che: *le leggi della meccanica sono le stesse in tutti i sistemi inerziali*. Essa è espressione del fatto che le leggi della meccanica contengono solo accelerazioni (cioè variazioni di velocità) e non velocità. L'aggiunta di una velocità costante, a cui corrisponde un'accelerazione nulla, non può alterare la legge.

3. La crisi della relatività galileiana

Tutte le esperienze di meccanica effettuate dai tempi di Galileo in poi avevano confermato la validità della relatività galileiana a tal punto da far ritenere che essa dovesse valere anche fuori dall'ambito in cui era stata stabilita. Questa idea sembrò tuttavia entrare in conflitto con l'esperienza quando James C. Maxwell nel 1873 sintetizzò, nella serie di

equazioni che portano il suo nome, le leggi che regolano i fenomeni elettromagnetici. Uno dei maggiori successi della teoria di Maxwell fu la previsione dell'esistenza delle onde elettromagnetiche, verificata poi sperimentalmente nel 1888 da Heinrich R. Hertz. Le equazioni di Maxwell non solo prevedevano l'esistenza di tali onde, ma erano anche in grado di precisare che la loro velocità era costante, non dipendeva dal moto relativo di sorgente e osservatore e che il suo valore, nel vuoto, era 300.000 km/sec, identico cioè a quello della velocità della luce, indicata abitualmente con la lettera c . La teoria di Maxwell chiarifica dunque la natura della luce, identificandola con quella delle onde elettromagnetiche, e unifica di fatto l'elettromagnetismo e l'ottica. Ma la presenza stessa di una velocità ben precisa nelle equazioni di Maxwell fa immediatamente capire che quest'ultime non possono essere invarianti per trasformazioni di Galileo. La costanza della velocità della luce predetta dalle equazioni di Maxwell dovrebbe essere la caratteristica di un ben determinato sistema, il sistema "privilegiato", mentre misure eseguite in qualunque altro sistema dovrebbero dare risultati diversi. Si apre quindi la possibilità di determinare il moto assoluto con esperienze di elettromagnetismo o, equivalentemente, di ottica.

I fisici americani Albert Michelson ed Edward Morley nel 1882 mettono a punto una raffinatissima esperienza di ottica, in grado di mettere in evidenza una differenza della velocità della luce nelle direzioni parallela e ortogonale al moto della Terra. Il risultato dell'esperienza è sconvolgente: la velocità nelle due direzioni è la stessa e quindi Terra dovrebbe essere il sistema privilegiato!. L'impossibilità di inquadrare i nuovi risultati nello schema della fisica classica, fa sì che si moltiplichino le «spiegazioni» dell'esperimento di Michelson. In particolare, il fisico olandese Hendrik A. Lorentz scopre la forma delle trasformazioni che rendono invarianti le equazioni di Maxwell. Se le trasformazioni di Lorentz avessero come conseguenza la costanza di c in due sistemi in moto rettilineo e uniforme uno rispetto all'altro (cioè fossero quelle che descrivono il passaggio tra due sistemi inerziali), il risultato di Michelson e Morley si spiegherebbe. Le trasformazioni di Lorentz sono evidentemente diverse da quelle di Galileo, anche se la differenza tra le due è molto difficile da mettere in evidenza sperimentalmente. Infatti, differenze significative si hanno solo quando la velocità relativa dei due sistemi si avvicina a quella della luce. Ricordando che $c = 300.000$ km/sec ovvero, in unità più familiari, più di un miliardo di km/ora, risulta chiaro che velocità di quest'ordine non sono raggiungibili da nessun oggetto macroscopico. Le cose cambiano nel mondo microscopico dove è relativamente facile trovare particelle subatomiche, per esempio elettroni, che posseggono velocità «relativistiche», cioè paragonabili a quella della luce. Lorentz, pur avendo determinato la forma corretta delle trasformazioni che collegano le grandezze fisiche misurate in due sistemi di riferimento inerziali, non si rese conto di tutte le loro implicazioni. Toccherà ad Einstein il compito di chiarificarne la portata rivoluzionaria

4. La relatività di Einstein

Einstein rifiuta l'esistenza di un sistema privilegiato e dimostra che l'interpretazione corretta dell'esperienza di Michelson comporta una profonda revisione dei concetti di spazio e di tempo. La teoria di Einstein si basa su due principi:

- Principio della costanza della velocità della luce: la luce si propaga nel vuoto con velocità costante, indipendentemente dalla velocità relativa di sorgente ed osservatore.
- Estensione del principio di relatività: tutte le leggi della fisica (e non solo quelle della meccanica) sono le stesse nei sistemi inerziali.

Uno dei punti basilari della nuova analisi risiede nella critica del concetto di simultaneità, che illustrerò discutendo un esperimento ideale e cercando di separare in maniera netta i fatti dalle interpretazioni. Vorrei sottolineare che questa discussione è di fatto tutto quello che c'è da capire sulla cinematica relativistica. Il resto sono semplici conseguenze formali, che non aggiungono nuovi aspetti di principio.

Consideriamo dunque la seguente situazione: un treno di lunghezza L si muove con velocità v rispetto ad un osservatore fisso. Sul terreno sono piantati due pali a distanza L . Quando la testa del treno si trova in corrispondenza di uno dei due pali viene emesso un segnale luminoso, diciamo al tempo t_1 , a cui corrisponde un tempo t'_1 per l'osservatore sul treno (i due orologi non saranno, in generale, sincronizzati). Quando la coda del treno si trova in corrispondenza dell'altro palo (al tempo t_2 per l'osservatore fisso e t'_2 per quello mobile) viene emesso un altro segnale luminoso. I due segnali si incontrano in un certo punto e ciascun osservatore registra la posizione del punto d'incontro. Supponiamo che l'osservatore fisso veda i due segnali incontrarsi nel punto a distanza $L/2$ da ciascun palo, cioè nel punto di mezzo tra i due pali. L'osservatore sul treno nota invece che i segnali si incontrano in un punto che non è a metà della lunghezza del treno, ma più vicino alla coda del treno stesso. Fin qui i fatti. Vediamo ora le interpretazioni.

L'osservatore fisso conclude che i due segnali hanno percorso la stessa distanza ($L/2$) e, poiché viaggiano entrambi con velocità c , hanno impiegato lo stesso tempo a raggiungere il punto d'incontro. Quindi devono essere stati emessi allo stesso istante: $t_1 = t_2$. Inoltre, trova del tutto naturale che l'osservatore sul treno trovi il punto d'incontro spostato verso la coda. Infatti, nel tempo necessario perché i due segnali percorrano lo spazio fino al punto d'incontro il treno si è mosso.

L'osservatore sul treno deve poter spiegare le sue osservazioni senza bisogno di comunicare con l'osservatore fisso. Tutto quello che sa, è che due segnali sono stati emessi a certi tempi e che gli spazi che essi percorrono fino al punto d'incontro sono diversi. Sono possibili due spiegazioni alternative: i segnali sono stati emessi contemporaneamente, ma le velocità di propagazione dei due segnali differiscono tra loro, oppure le velocità sono uguali, ma i segnali non sono stati emessi contemporaneamente. La prima alternativa è quella fornita dalla fisica classica, secondo la quale lo scorrere del tempo è indipendente

dallo stato di moto dell'osservatore (e quindi se $t_1 = t_2$ dev'essere anche $t'_1 = t'_2$) e la velocità della luce si compone con quella della sorgente. Poiché la sorgente luminosa in coda appare allontanarsi dall'osservatore con velocità v , la velocità della luce è $c - v$, minore di quella che si avrebbe se la sorgente fosse fissa. Con analogo ragionamento si conclude che la velocità del segnale luminoso proveniente dalla sorgente in testa al treno, che appare avvicinarsi all'osservatore, è $c + v$, maggiore di quella di una sorgente fissa. Lo spazio percorso dal segnale luminoso proveniente dalla coda del treno è quindi minore di quello percorso dal segnale proveniente dalla testa e quindi il punto d'incontro è più vicino alla coda, come di fatto osservato. Questa spiegazione è tuttavia in conflitto con il principio della costanza della velocità della luce, solidamente basato sui risultati dell'esperimento di Michelson che provano che la velocità della luce NON si compone con quella della sorgente. Ne concludiamo che questa interpretazione è inaccettabile e che l'UNICA interpretazione possibile è che i segnali non siano stati emessi allo stesso tempo, $t'_1 \neq t'_2$, e più precisamente che il segnale proveniente dalla coda sia stato emesso dopo quello proveniente dalla testa.

L'analisi di questo esperimento concettuale ci porta dunque a concludere che due eventi possono essere simultanei in un sistema e non esserlo in un altro: la simultaneità è un concetto relativo. Questo risultato ci appare strano, ma solo perché la violazione della simultaneità è così piccola nel mondo "normale" che non ce ne accorgiamo. Peraltro, non troviamo nulla di strano nel fatto che la posizione sia un concetto relativo. Ma qualunque fatto fisico, qualunque *evento*, è contraddistinto sia dalla posizione che dal tempo in cui avviene. La relatività, a differenza della fisica classica, tratta spazio e tempo in maniera simmetrica ed individua l'arena in cui hanno luogo gli eventi come l'insieme dello spazio e del tempo, o come generalmente si dice, lo spazio-tempo.

Le novità introdotte dall'approccio di Einstein non si limitano alle misure di tempo. Chiediamoci infatti come si possa misurare la lunghezza di un oggetto che sia in movimento rispetto all'osservatore. Potremmo immaginare di marcare, allo stesso istante, le posizioni dei due estremi dell'oggetto su una scala graduata. Ma la simultaneità non è un fatto assoluto e quindi ci possiamo aspettare che anche le lunghezze degli oggetti siano relative. Osservatori in diverso stato di moto misureranno lunghezze differenti.

Ma se l'intervallo temporale tra due eventi dipende dal sistema di riferimento, possiamo immaginare di trovare due sistemi in cui l'ordine temporale degli eventi risulti invertito? Ci si rende facilmente conto che se i due eventi in questione fossero legati da un rapporto causa-effetto, sarebbe violato il principio di causalità che afferma che la causa deve sempre precedere l'effetto. L'abbandono del principio di causalità porterebbe di fatto all'impossibilità di costruire una teoria fisica coerente ed il mantenimento di questo principio viene considerato fondamentale. La traduzione di questa condizione nel formalismo della relatività implica che nessun segnale possa propagarsi a velocità maggiore di quella della luce.

L'accurata analisi dei processi di misura effettuata da Einstein permette di determinare

in maniera univoca le leggi matematiche che connettono i valori delle grandezze fisiche misurate in due diversi sistemi inerziali. Non è sorprendente che tali leggi risultino essere le trasformazioni di Lorentz, già introdotte in connessione con le equazioni di Maxwell. Tali trasformazioni coinvolgono sia le variabili spaziali che quelle temporali e sono quindi legate alla struttura «geometrica» dello spazio-tempo. Per comprendere il significato della frase precedente, consideriamo due sistemi di coordinate nello spazio ordinario (quello della geometria euclidea) che siano ruotati uno rispetto all'altro. Vi sono delle leggi di trasformazione ben precise che permettono di passare dai valori delle coordinate in uno dei sistemi a quelle nell'altro. La forma di tali trasformazioni dipende dal fatto che lo spazio ordinario è appunto euclideo. Le trasformazioni di Lorentz possono essere pensate come l'analogo spazio-temporale delle rotazioni nello spazio ordinario, ma lo spazio-tempo risulta essere non-euclideo. Gli spazi non-euclidei non sono necessariamente dei concetti astrusi: la superficie della Terra non è uno spazio euclideo. Per rendersene conto basta osservare che due meridiani, che sono paralleli tra loro all'equatore, si incontrano al polo, contrariamente a quanto prescritto da uno dei postulati di Euclide.

Il legame tra la forma matematica delle trasformazioni e la struttura geometrica dello spazio-tempo è una delle innovazioni fondamentali della teoria della relatività. Questo concetto rappresenterà una delle basi dello sviluppo della Relatività Generale.

Le conseguenze della relatività non si limitano alla cinematica, ma si estendono anche a tutto il resto della fisica. Tra queste, non si può non ricordare uno dei risultati più importanti della dinamica relativistica, la relazione tra massa ed energia. Questa relazione, una delle più celebri della fisica, si scrive nella forma:

$$E = \gamma mc^2 \quad ; \quad \gamma = 1 / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

dove m è la massa del corpo, v la velocità del corpo rispetto all'osservatore e c la velocità della luce. Si osservi che la precedente relazione viene spesso scritta come $E = mc^2$, includendo nella definizione di m anche il termine γ . La relatività prevede dunque che anche un corpo a riposo ($v = 0$) possieda una certa quantità di energia, che risulta essere enormemente grande, visto l'elevato valore di c . Questa "energia di riposo" rappresenta una formidabile riserva energetica, che può essere utilizzata quando sussistano le condizioni che permettono di trasformarla in altre forme di energia. Ciò si verifica durante le reazioni nucleari e questo spiega la grande quantità di energia che esse liberano con effetti talora devastanti, come durante le esplosioni nucleari, ma anche con effetti benefici, come nell'interno del Sole, dove le reazioni nucleari forniscono l'energia che viene poi irradiata nello spazio circostante permettendo la vita sulla Terra.

La Relatività Ristretta, detta così perché la sua applicazione è «ristretta», cioè limitata alle trasformazioni tra sistemi inerziali, è una delle teorie meglio verificate sperimentalmente. Senza di essa non saremmo in grado di spiegare i fenomeni di alta

energia del mondo microscopico e non sarebbe stato possibile far funzionare i grandi acceleratori di particelle utilizzati dai fisici nei loro esperimenti. Anche la comprensione di molti fenomeni astrofisici necessita dei concetti sviluppati dalla teoria della relatività. Per esempio, l'emissione elettromagnetica di molte sorgenti cosmiche è spiegata dall'interazione di particelle relativistiche con campi magnetici.

Il problema della gravità e il principio di equivalenza.

Una volta accettati i concetti della teoria della Relatività, ci si rende facilmente conto di come la teoria della gravitazione universale di Newton necessiti di una revisione. Secondo tale teoria, infatti, tra due corpi di masse m_1 e m_2 posti a distanza d si esercita una forza attrattiva, F , pari a

$$F = \frac{Gm_1m_2}{d^2}$$

dove G è la costante di gravitazione universale. Se la distanza d varia, la teoria di Newton prevede che anche la forza F vari, adattandosi *istantaneamente* al valore richiesto dalla precedente formula. Si avrebbe quindi la propagazione istantanea di un segnale, contrariamente a quanto richiesto dalla teoria della Relatività Ristretta e dal principio di causalità, come illustrato in precedenza. Bisognerà dunque procedere ad una revisione della teoria della gravità e la via scelta da Einstein si basa sul legame esistente tra le leggi fisiche e la struttura dello spazio-tempo, già messo in luce nell'ambito delle trasformazioni tra sistemi inerziali. La revisione della teoria della gravitazione porterà inoltre ad estendere anche ai sistemi non-inerziali il principio di relatività e consentirà di affermare che *le leggi della fisica sono le stesse in qualunque sistema di riferimento.*

Per definizione, un sistema non inerziale è un sistema in cui viene violato il principio d'inerzia. Per esempio, un osservatore che si trovi su un disco rotante osserverebbe che per mantenere fermo un corpo è necessario applicargli una forza diretta radialmente verso il centro. In caso contrario, cioè se sul corpo non è applicata alcuna forza, esso si allontana con una certa accelerazione, che risulta indipendente dalla massa del corpo e pari a $\omega^2 r$ dove ω è la velocità angolare del disco e r è la distanza del corpo dal centro. Il sistema rotante è dunque non-inerziale, ma l'osservatore sul disco potrebbe comunque utilizzare la meccanica newtoniana (quella dei sistemi inerziali) per descrivere il moto, utilizzando la relazione $F = m a$ e dicendo che il corpo è in realtà sottoposto ad una forza, la forza centrifuga, il cui valore si ottiene moltiplicando l'accelerazione misurata, $\omega^2 r$, per la massa m del corpo. Un osservatore inerziale, cioè che non partecipi del moto del disco, descriverebbe lo stesso moto in maniera assai più semplice: Infatti, per lui il corpo non è soggetto a forze e quindi, in virtù del principio d'inerzia, la sua traiettoria è una retta, percorsa con velocità costante e pari alla velocità locale del punto del disco da cui è stato rilasciato il corpo in questione. È chiaro che, fatte le dovute trasformazioni tra le coordinate del sistema fisso e quelle ancorate al sistema rotante, la traiettoria risulterebbe esattamente la stessa, ma la descrizione nel sistema inerziale è più semplice per due aspetti: non c'è bisogno di introdurre una forza e la traiettoria è una retta

(mentre non lo è rispetto all'osservatore sul disco). Riassumendo, potremmo dire che l'essere ancorati ad un sistema non-inerziale comporta una penalizzazione, quella di dover introdurre nella descrizione dei moti delle nuove forze, dette forze inerziali, che hanno la caratteristica di essere proporzionali alla massa. È possibile eliminare questo tipo di forze, semplicemente descrivendo la dinamica del sistema da un opportuno sistema inerziale.

La massa che interviene nelle forze inerziali rappresenta un attributo del corpo che si *oppone* al moto: a parità di forza, tanto maggiore la massa, tanto minore l'accelerazione. Ma lo stesso termine, «massa», compare anche nella legge di gravitazione universale, come una proprietà caratteristica che *provoca* una forza e quindi un moto. Per distinguere questi due tipi di massa, che in linea di principio non dovrebbero coincidere, visto che descrivono proprietà dei corpi non solo diverse, ma addirittura antitetiche, chiameremo la prima (quella che si oppone al moto) massa inerziale e la seconda massa gravitazionale. Tuttavia, una serie di esperimenti, fra i più precisi mai realizzati, dimostrano l'identità delle due masse. Questo risultato va sotto il nome di principio di equivalenza. Esso è la chiave di volta della nuova teoria della gravità: siccome la forza di gravità è proporzionale alla massa gravitazionale, ma questa è uguale alla massa inerziale, la gravità ha la stessa natura delle forze inerziali e quindi può essere eliminata dalla descrizione della dinamica con un'opportuna scelta del sistema di riferimento!

Che la precedente non sia un'affermazione peregrina lo si può verificare considerando la situazione che si verificherebbe in un ascensore in caduta libera, cioè un ascensore a cui è stata tranciata la corda di sostegno. Un osservatore che, per sua disgrazia, si trovasse all'interno, giudicherebbe di trovarsi in un sistema inerziale. Infatti, qualunque oggetto lasciato libero non si sposterebbe rispetto a lui, in quanto entrambi cadrebbero con la stessa accelerazione: nell'ascensore in caduta libera è come se la gravità non esistesse. Anche un satellite in orbita attorno alla Terra è un sistema in cui la gravità è stata apparentemente eliminata, come le immagini che mostrano gli astronauti al lavoro ci confermano. È quindi vero che la gravità, come le altre forze inerziali, può essere eliminata dalla descrizione con la scelta di un opportuno sistema di riferimento. I sistemi «inerziali» sono ora i sistemi in caduta libera, cioè un sistemi in moto *accelerato*. L'eliminazione della gravità è solo «locale» nello spazio e nel tempo. Infatti, se nell'ascensore avessimo più oggetti in caduta libera, sufficientemente lontani tra loro, ci accorgeremmo che le distanze reciproche cambiano poiché le loro traiettorie, viste da un sistema esterno, non sono parallele, ma convergono verso il centro della Terra. In generale poi, la gravità locale cambia nel tempo, a causa del moto dei corpi che ne sono le sorgenti. In altre parole, non esiste un unico sistema di riferimento che elimini la gravità «globalmente» cioè dappertutto e per tempi comunque lunghi.

5. La Relatività Generale

Il principio di equivalenza implica l'impossibilità per un osservatore di determinare

in maniera assoluta la presenza della gravità. Infatti, consideriamo due sistemi: uno in moto uniforme, ma con gravità e l'altro senza gravità, ma in moto accelerato con un'accelerazione uguale e contraria all'accelerazione gravitazionale del primo. Qualunque esperienza eseguita nei due sistemi darebbe esattamente lo stesso risultato. Possiamo quindi «eliminare» la gravità, cioè non tenerne conto nel conteggio delle forze, pur di utilizzare sistemi di riferimento in moto accelerato, che di conseguenza vengono ad acquisire un ruolo nuovo, quello di sistemi inerziali «equivalenti». Appare dunque altamente desiderabile estendere anche ad essi il principio di relatività: «le leggi della fisica sono le stesse anche nei sistemi un moto accelerato e non soltanto in quelli in moto relativo uniforme». Ma tale estensione richiede una riformulazione delle leggi, come si può evincere dalle considerazioni seguenti.

Un corpo «libero», cioè non soggetto a forze percorre con velocità costante una traiettoria rettilinea rispetto ad un sistema inerziale. Rispetto ad un sistema accelerato, con una accelerazione costante in una direzione non coincidente con quella della velocità, la sua traiettoria risulterà curva. Tuttavia il corpo è libero anche nel sistema accelerato e non sembra possibile conciliare i dettami del principio di inerzia (i corpi liberi si muovono lungo rette) con il principio di relatività generale (le leggi hanno la stessa forma in qualunque sistema). Per risolvere la contraddizione è necessario riformulare il principio d'inerzia, tenendo presente una delle proprietà della retta. In uno spazio euclideo, infatti, la retta può essere definita come la curva di minima lunghezza che unisce due punti dati. Curve con questa proprietà vengono dette *geodetiche*. Su una sfera le geodetiche sono archi di cerchio massimo: la forma delle geodetiche è strettamente legata alla geometria dello spazio. Ritornando al principio d'inerzia in uno spazio euclideo potremmo enunciarlo dicendo che le traiettorie dei corpi liberi sono delle geodetiche. Ma questa definizione può essere generalizzata a qualunque sistema, inerziale o meno. La presenza della gravità si fa sentire modificando localmente la struttura dello spazio-tempo. La traiettoria di un corpo libero è *sempre* una geodetica. Se la gravità non c'è, lo spazio è piatto (euclideo) e la geodetica è una retta, se invece la gravità è presente, lo spazio è curvo (non euclideo) e la geodetica non è una retta.

Si osservi come venga completamente capovolto lo schema newtoniano. Per Newton la struttura geometrica dello spazio-tempo è assegnata a priori e le traiettorie dei corpi sono determinate dalla gravità. Per Einstein, le traiettorie sono fissate a priori (sono delle geodetiche) e la struttura dello spazio-tempo è determinata dalla gravità.

Rimane ancora da precisare in che modo la presenza di materia modifichi la struttura geometrica dello spazio-tempo e Einstein, influenzato dalle idee di Ernst Mach, suppone che essa sia determinata dalla distribuzione su larga scala della materia. O più precisamente, visto che materia ed energia sono equivalenti dal punto di vista della Relatività Ristretta, sarà la distribuzione di energia su larga scala a plasmare la struttura geometrica dello spazio-tempo. Quest'ultimo sarà in generale curvo, ma localmente potrà essere considerato piatto, così come ogni superficie è localmente equivalente al suo piano tangente. Come si vede, esiste un perfetto parallelismo tra la

descrizione geometrica e quella fisica. Lo spazio incurvato dalla gravità è localmente descrivibile dallo spazio piatto di un sistema senza gravità. L'entità della curvatura è una misura dell'intensità del campo gravitazionale. Per campi deboli la Relatività Generale riproduce esattamente i risultati della gravità newtoniana, così come la Relatività Ristretta riproduceva i risultati della fisica classica per velocità piccole rispetto a c .

Lo schema della nuova teoria della gravitazione è contenuto nelle equazioni di Einstein: si tratta di un sistema piuttosto complesso di 10 equazioni accoppiate, la cui soluzione per via analitica è praticamente impossibile, tranne che in pochi casi semplici (ma non per questo meno importanti). Anche la soluzione per via numerica presenta delle difficoltà formidabili, persino con i moderni calcolatori elettronici. Nonostante questo, la struttura concettuale delle equazioni di Einstein è assai semplice, poiché raggruppa da un lato tutte le proprietà geometriche dello spazio-tempo e dall'altro tutte le informazioni sulla distribuzione spazio-temporale dell'energia, in uno schema di straordinaria eleganza formale. Gli unici parametri esterni alla teoria che compaiono nelle equazioni sono le costanti universali G e c . Non ci sono cioè parametri di valore sconosciuto che possano essere «aggiustati» per ottenere l'accordo con i dati sperimentali. In un certo senso quindi, la Relatività Generale è una teoria «a rischio»: se le previsioni non tornano, non c'è modo di ottenere un accordo con piccoli ritocchi, ma bisogna modificare profondamente l'intera teoria. Ciononostante, tutte le previsioni per le quali è stata possibile una verifica sperimentale sono state a tutt'oggi brillantemente confermate. Si tratta in genere di effetti molto piccoli, ma che possono divenire rilevanti soprattutto in campo astronomico.

Einstein stesso propose alcuni test della Relatività Generale: lo spostamento verso il rosso delle righe spettrali per effetto gravitazionale, la deflessione della luce da parte di un campo gravitazionale e lo spostamento secolare del perielio di Mercurio. Descriverò brevemente solo il secondo di questi effetti. Consideriamo un raggio di luce: per un osservatore in quiete rispetto alla sorgente esso percorrerà una traiettoria rettilinea. Ma per un osservatore in moto accelerato in una direzione ortogonale a quella del raggio luminoso, tale traiettoria risulterebbe curva e il principio di equivalenza ci dice allora che anche la traiettoria di un raggio di luce in un campo gravitazionale deve risultare curva. È chiaro che l'entità della deviazione dipende dall'intensità del campo gravitazionale e quindi che l'esperienza debba essere fatta utilizzando il campo gravitazionale più forte a disposizione. Einstein propose di studiare la deviazione di quei raggi luminosi emessi dalle stelle che lambiscono la superficie del Sole che sono quindi soggetti a un forte campo gravitazionale. Normalmente non è possibile effettuare questa osservazione perché la debole luce delle stelle è sovrastata dalla luminosità del Sole. Una tale osservazione è tuttavia possibile durante un'eclisse. L'apparente spostamento di posizione fu misurato per la prima volta durante l'eclisse solare del 1919 e confermò pienamente le previsioni della teoria. Recentemente, è stata verificata, seppure indirettamente, un'altra delle previsioni della teoria, cioè l'esistenza delle onde gravitazionali. Quest'ultime sono il mezzo con cui viene segnalata nello spazio circostante la variazione locale di un campo

gravitazionale. Esse sono dunque analoghe alle onde elettromagnetiche e si propagano anch'esse con velocità c . La verifica si ottiene dall'osservazione dell'allungamento del periodo orbitale di una pulsar in un sistema binario, che risulta perfettamente compatibile con l'ipotesi che il sistema emetta onde gravitazionali al tasso previsto dalla Relatività Generale. Una rivelazione diretta delle onde gravitazionali è attesa nei prossimi anni con l'entrata in funzione dei sistemi LIGO negli Stati Uniti d'America e VIRGO in Italia.

Nonostante che tutti gli esperimenti citati abbiano un interesse puramente scientifico, sarebbe errato pensare che la Relatività Generale abbia solo un valore accademico. I moderni dispositivi per la navigazione satellitare, che ormai vengono installati sulle automobili, non sarebbero in grado di ottenere la precisione richiesta, se gli algoritmi che permettono di calcolare la posizione con un errore dell'ordine del metro non tenessero conto della Relatività Generale.

TESTI CONSIGLIATI

Durrell, C., *La relatività con le quattro operazioni*, Bollati Boringhieri, Torino 1967.

Einstein, A., *Relatività, esposizione divulgativa*, Bollati Boringhieri, Torino 1980.

Russell, B. *L'ABC della relatività*, Longanesi, Milano 2005.

ALBERT EINSTEIN: IL LATO UMANO

ROBERTO FIESCHI

Dipartimento di Fisica, Università di Parma

Sommario. In questo intervento espongo schematicamente le posizioni che Einstein assunse su vari problemi sociali che caratterizzarono la prima metà del secolo scorso. Ricorro, ove possibile alla sua testimonianza diretta.

1. Responsabilità dello scienziato

Come è noto proprio a tutti, Einstein è uno dei massimi scienziati del Novecento, e certo il più noto e caro al grande pubblico, e influente al di fuori dell'ambiente scientifico. Di sé come scienziato scrisse: «Durante una lunga vita ho dedicato tutte le mie facoltà a raggiungere una comprensione un po' più profonda della struttura della realtà fisica».

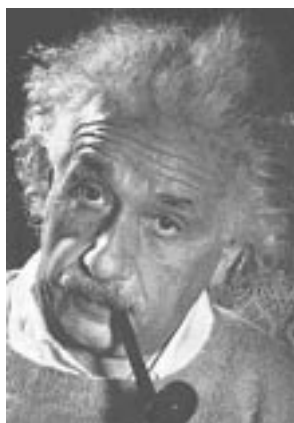


Figura 1. Albert Einstein.

La sua attività scientifica più rilevante: si svolse nel trentennio 1905-1935, ma proseguì intensa fino alla fine. A due anni dalla morte, in una lettera alla regina del Belgio, sua amica, scrisse: «18 crudeli anni sono passati da allora, anni pieni di amare delusioni [...] Ciò che mi è rimasto è il lavoro senza speranza intorno a problemi scientifici difficili».

Ma Einstein visse intensamente i drammi del suo tempo, che lo coinvolsero anche personalmente: la prima guerra mondiale, l'avvento del nazismo, la persecuzione degli ebrei, la seconda guerra mondiale, il terrore atomico, le vicende dello Stato di Israele. La sua sensibilità lo spinse a impegnarsi sui temi sociali che agitavano il suo tempo, in particolare contro il militarismo e la guerra. Conscio della sua enorme popolarità, intervenne a varie riprese per far sentire la sua opinione e per influenzare i grandi della terra e la gente comune. Con molta modestia scrisse di sé: «La sola cosa che ho

fatto è questa: a tratti ho espresso pubblicamente la mia opinione su quelle condizioni sociali che io considero a tal punto cattive e infelici da rendere il silenzio una colpevole complicità».

I suoi interventi, pubblici e privati (innumerevoli sono le lettere che scrisse a persone di ogni tipo che a lui si rivolgevano da ogni parte del mondo), contrastano con il suo carattere solitario: «In singolare contrasto con il mio senso di giustizia e di impegno sociale [...] sono proprio un cavallo che vuole tirare da solo. Mai mi sono dato pienamente né allo stato, né alla terra natale, né agli amici e neppure ai congiunti più prossimi [...] Ho sempre sentito il bisogno di solitudine». Questo atteggiamento si riflesse anche nei suoi rapporti familiari, e qui sta forse il lato poco affascinante della personalità di Einstein.

2. Fra due manifesti

L'attività socio-politica di Einstein copre l'arco di tempo che intercorre fra due manifesti, entrambi nati dalla guerra, entrambi non di pugno dello stesso Einstein. Il primo, della fine del 1914, quando in Europa già la guerra provocava immense stragi, fu scritto in risposta al famoso *Manifesto al mondo civile* firmato dai più illustri intellettuali tedeschi, nel quale si legge: «Non fosse per il militarismo tedesco, la cultura tedesca sarebbe stata spazzata via dalla faccia della Terra [...] L'esercito tedesco e il popolo tedesco oggi stanno spalla a spalla». Esso porta fra l'altro le firme di scienziati come Max Planck, Wilhelm Roentgen, Walther Nernst.

Un intellettuale pacifista tedesco preparò allora il *Manifesto agli Europei*, nel quale si legge: «La lotta che oggi infuria non potrà condurre a una vittoria; tutte le nazioni che vi partecipano pagheranno un prezzo estremamente elevato» e si chiede pace e un nuovo ordine che non racchiuda i germi di guerre future, in una Europa unita. Molti decenni dovranno trascorrere perché questo sogno (limitatamente all'Europa!) si realizzi.

Il *Manifesto agli Europei* non ebbe successo, fu firmato solo da quattro persone, fra le quali Einstein, e non fu reso pubblico; molti pacifisti non osarono aderirvi, intimiditi dall'atmosfera di nazionalismo bellicista nella Germania d'allora.



Figura 2. Einstein ventenne.

Il secondo manifesto, noto col nome di *Manifesto Russell-Einstein*, fu firmato da Einstein l'undici aprile 1955, due giorni prima di morire. Questo secondo manifesto fu concepito dopo lo sviluppo della bomba H (che ha una potenza mille volte maggiore di quella delle bombe che distrussero Hiroshima e Nagasaki), quando la situazione mondiale appariva sempre più grave, ed ebbe una risonanza enorme. In esso si legge fra l'altro: «Questo è dunque il problema che vi presentiamo, netto, terribile e inevitabile: dobbiamo porre fine alla razza umana oppure l'umanità dovrà rinunciare alla guerra?»

3. Concezione del mondo

Il laicismo e il sostanziale ateismo di Einstein sono fuori dubbio; li ritroviamo ad esempio in queste citazioni:

Non posso immaginarmi un Dio che ricompensa e che punisce l'oggetto della sua creazione ... Non voglio e non posso figurarmi un individuo che sopravviva alla sua morte corporale [...] Alla base del lavoro scientifico si trova la convinzione, analoga al sentimento religioso, che il mondo è fondato sulla ragione e può essere compreso. ... Questa convinzione ... costituisce per me l'idea di Dio; in linguaggio corrente si può chiamarla panteismo (Spinoza). (da *Come io vedo il mondo*, 1930)



Figura 3. Einstein nel 1947.

Non ho rapporti con le tradizioni confessionali.

Il concetto dell'anima senza corpo mi pare del tutto privo di significato (in risposta ad una lettera del 1921)

Non credo nell'immortalità dell'individuo e credo che l'etica sia un interesse esclusivamente umano che non deriva da alcuna autorità sovranaturale. (in risposta ad una lettera del 1953)

Soddisfare per quanto è possibile le aspirazioni e i bisogni di tutti, raggiungendo l'armonia e la bellezza nei rapporti umani [in risposta a uno studente sul senso della vita. (1950)]

4. Antimilitarismo e pacifismo

Questi sentimenti accompagnarono Einstein lungo la sua intera esistenza, fin da

quando, giovane studente, manifestò profonda intolleranza per l'autoritarismo di stile prussiano, fino al punto da rifiutare la cittadinanza tedesca. Con l'avvento del Nazismo Einstein fu attaccato per il suo pacifismo e come ebreo; la sua stessa vita fu messa in pericolo, così che fu costretto a lasciare la Germania. Fino all'avvento del Nazismo si era espresso a più riprese in appoggio all'obiezione di coscienza al servizio militare; in seguito, di fronte al rischio di una guerra di aggressione da parte della Germania di Hitler, questo atteggiamento intransigente cambiò (si vedano le ultime tre citazioni che seguono).



Figura 4. Hitler al potere.



Figura 5. Mussolini e Hitler.



Figura 6. La notte dei cristalli a Berlino.

Il mio pacifismo è un sentimento istintivo ... causato da una profonda ripugnanza per ogni forma di crudeltà e di odio. (1929)

Disprezzo profondamente chi è felice di marciare nei ranghi al seguito di una musica: costui solo per errore ha ricevuto un cervello. Bisogna sopprimere questa vergogna della civiltà (il regime militare) il più rapidamente possibile. (da *Come io vedo il mondo*, 1930)

Il grande e deplorabile sviluppo assunto dal nazionalismo è, a mio giudizio, legato all'esistenza del servizio militare obbligatorio e degli eserciti nazionali. (1931)

Fino al 1933 ho sostenuto l'obiezione di coscienza. Ma con l'avvento del Fascismo mi sono reso conto che non si può mantenere questo punto di vista, se non al rischio che il mondo cada nelle mani dei più terribili nemici dell'umanità (da una lettera a uno studente americano imprigionato per obiezione di coscienza, 1941)

Il rifiuto del servizio militare sarebbe saggio se fosse possibile ovunque nel mondo. [...] Ma l'antimilitarismo individuale è impossibile in Russia, mentre i paesi democratici sono diventati più aggressivi. (1948)

Non sono quello che si può chiamare un pacifista religioso. Considero preferibile combattere piuttosto che lasciarsi macellare senza muovere un dito. (1951)

5. La bomba atomica

È noto che Einstein nel 1939, poco prima che Hitler scatenasse la guerra in Europa, su suggerimento di Leo Szilard scrisse una lettera al Presidente Roosevelt per informarlo che le ricerche sulla fissione dell'uranio avrebbero potuto portare alla costruzione di una bomba di potenza inusitata, e del rischio che i tedeschi si impegnassero in tale direzione.



Figura 7. Einstein con Leo Szilard.

Nel 1950 scrisse a un amico: «Io considerai che (firmare la lettera) fosse un mio dovere perché c'erano precise indicazioni che i tedeschi stessero lavorando a un tale progetto». E prima della morte scrisse a von Laue: «Se avessi saputo che il timore (che Hitler per primo avesse la bomba) non era giustificato, né io né Szilard avremmo

contribuito ad aprire questo vaso di Pandora».

Nel dopoguerra, quando gli spaventosi effetti delle armi nucleari erano sotto gli occhi di tutto il mondo, e fino all'ultimo famoso Manifesto, non si stancò di ammonire l'umanità dei rischi che si correvano e di sottolineare la particolare responsabilità degli scienziati.

Dagli atti della Conferenza dell'Emergency Committee (1946), alla quale partecipò:

Non c'è alcuna difesa militare dalle bombe atomiche, né se ne può prevedere. [...] Non c'è soluzione, eccetto il controllo internazionale e, alla fine, l'eliminazione della guerra. [...] Noi scienziati dobbiamo considerare nostro solenne dovere fare tutto ciò che è in nostro potere per impedire che queste armi siano usate. Aprire gli occhi agli uomini di tutto il mondo è la missione sociale più importante che gli intellettuali abbiano mai avuto. (1948)

Nel nostro tempo scienziati e ingegneri hanno una responsabilità morale particolare, perché lo sviluppo di mezzi militari di distruzione di massa dipende dal loro lavoro. (1950)

Dal messaggio al popolo giapponese nell'anniversario di Hiroshima, due anni prima della morte:

È bene che la memoria di Hiroshima e Nagasaki sia tenuta viva nel cuore degli uomini. Bisogna sostenere che ogni sforzo per garantire la pace attraverso alleanze militari condurrà alla guerra e alla distruzione universale.



Figura 8. La bomba atomica che distrusse Hiroshima.



Figura 9. Hiroshima distrutta, agosto 1945.

6. Rapporti internazionali – Organizzazione politica sovranazionale

Durante tutta la sua vita Einstein si batté per il superamento dei nazionalismi e per la

creazione di una struttura sovranazionale dotata di poteri forti, in grado di risolvere le controversie internazionali evitando le guerre.

Già alla fine del 1914, quando la Germania stava vincendo sui tutti i fronti, Einstein prese pubblicamente posizione per una pace immediata, senza annessioni, e per la creazione di un'organizzazione internazionale per prevenire future guerre. A guerra finita, nel 1920 accolse con fiducia la creazione della Società delle Nazioni e si impegnò personalmente nel Comitato per la cooperazione intellettuale, ad essa connesso. Ben presto però (1932) si rese conto della incapacità della Società delle Nazioni a promuovere il disarmo. Ecco alcuni esempi:

Finché non sarà stato raggiunto un accordo inteso a limitare la sovranità degli Stati obbligando ciascuno di essi a un'azione collettiva contro quel paese che resiste alla decisione della Corte Arbitrale (della Società delle Nazioni) non ci sarà dato di uscire dallo stato generale di anarchia e di terrore in cui viviamo. (1931)



Figura 10. Pasadena, 1931.

Le armi offensive oggi disponibili non lasciano alcun luogo della terra al sicuro da una improvvisa distruzione totale. L'unica speranza di sopravvivenza sta nella creazione di un governo mondiale che sia in grado di risolvere i contrasti fra le nazioni con decisioni vincolanti. (1946)

7 – Democrazia e socialismo

L'opposizione di Einstein a ogni forma di dittatura è fuori dubbio:

Sembra che al vertice (nell'Unione Sovietica) abbia luogo una lotta personale nella quale individui assetati di potere impiegano mezzi incredibili. Alla base c'è una completa oppressione dell'individuo e l'abolizione della libertà di parola. (1932)

Sono contro le dittature. Non potrei mai vivere in Italia all'ombra del Fascio, né in Russia sotto il controllo della polizia segreta e, naturalmente, ancor meno nella Germania di oggi. (1933)



Figura 11. Nel suo studio, a Berlino.

Nel 1933 si dimise dall'Accademia delle Scienze di Prussia e abbandonò la cittadinanza prussiana. «Ritengo dovere di ogni democratico un'azione decisa per salvare la libertà in Spagna. Il successo della vostra giusta e importante causa è caro al mio cuore» (dal messaggio a favore dei combattenti della Repubblica spagnola contro il colpo di stato di Franco).

Altrettanto chiara è la sua critica alla struttura sociale basata sul capitalismo e la sua propensione per una struttura socialista dell'economia. Queste posizioni sono chiaramente espresse in un suo articolo del 1949:

L'anarchia economica della società capitalista, quale esiste oggi, è secondo me la vera fonte del male [...] Il capitale privato tende a essere concentrato nelle mani di una minoranza [...] Il risultato di questo sviluppo è una oligarchia del capitale privato il cui enorme potere non può essere effettivamente arrestato nemmeno da una società politica democraticamente organizzata [...] La conseguenza è che di fatto i rappresentanti del popolo non proteggono sufficientemente gli interessi degli strati meno privilegiati della popolazione [...] Inoltre, nelle condizioni esistenti, i capitalisti privati controllano inevitabilmente, in modo diretto o indiretto, le principali fonti di informazione (stampa, radio, insegnamento) [...] Sono convinto che vi sia un solo modo per eliminare questi gravi mali: la creazione di una economia socialista, accompagnata da un sistema educativo volto a fini sociali [...] È tuttavia necessario ricordare che un'economia pianificata non è ancora socialismo [...] Un'economia pianificata può essere accompagnata dal completo asservimento dell'individuo.

8. Sionismo e Stato di Israele

Einstein nacque da genitori ebrei non praticanti e non diede particolare importanza all'origine razziale dei suoi. La sensibilità verso i problemi del sionismo si sviluppò negli anni Venti, ma senza interesse per la religione ebraica. Più tardi, col dilagare dell'antisemitismo, affermò l'orgoglio della propria origine e, alla fine dei suoi anni scrisse a un amico: «Ti ringrazio, seppure in quest'ora tarda per avermi aiutato a diventare cosciente della mia anima ebraica».

Nel 1921 collaborò alla fondazione dell'università ebraica di Gerusalemme per

la quale in seguito raccolse i fondi. Tuttavia non condivise l'obiettivo di uno stato nazionale ebraico in Palestina e fu invece favorevole a uno stato multinazionale. Nel 1932 scrisse: «Tocca a noi risolvere il problema della convivenza fianco a fianco con i nostri fratelli arabi in una forma aperta, generosa e degna. Ci è offerta l'occasione di dimostrare che cosa il popolo ebraico ha imparato in migliaia d'anni di martirio». E ancora sei anni dopo disse in un discorso: «Troverei più ragionevole un accordo con gli arabi sulla base della comune aspirazione a vivere in pace, piuttosto che ricorrere alla creazione di uno stato ebraico».



Figura 12. In barca a vela, 1936.

Dopo la fine della seconda guerra mondiale è evidente che il suo sogno è fallito, ed Einstein se ne rende amaramente conto.

9. Qualche considerazione

Abbiamo delineato due binari nella vita di Einstein, quello dell'impegno scientifico e quello del ruolo sociale. Lungo il primo i successi furono immensi, lungo il secondo i suoi messaggi furono (e sono) inascoltati: organizzazione sovranazionale che impedisca le guerre, abolizione delle bombe atomiche, Stato d'Israele basato sulla convivenza pacifica, struttura economica che superi l'anarchia della società capitalista, e più in generale il sogno di un mondo fondato sulla ragione e sulla comprensione reciproca.



Figura 13. Mentre suona il violino, 1941.

Il suo messaggio umano, il suo disegno di indicare la via verso un mondo più giusto e senza guerre, fallì, ma influenzò e confortò innumerevoli persone. Per questo impegno è giusto riconoscere che Einstein appartiene all'umanità.

BIBLIOGRAFIA

- Einstein, A., *Come io vedo il mondo*, Newton Compton, Roma 1975.
Dukas, H. e Hoffman, B., *Albert Einstein. Il lato umano*, Einaudi, Torino 1980.
Fieschi, R., *Albert Einstein*, Edizioni Cultura della Pace, S. Domenico di Fiesole 1987.
Martin, C. N., *Vita di Einstein*, Editori Riuniti, Roma 1983.

Nota: le immagini sono prese dal sito <http://www.if.ufrj.br/famous/physlist.html>

FILOSOFIA E SCIENZA*

PAOLO PARRINI

Dipartimento di Filosofia, Università di Firenze

I rapporti fra scienza e filosofia non sono né semplici né ‘pacifici’. Al contrario, sono complessi e, molto spesso, ‘conflittuali’. La cosa risulta tanto più strana quando si consideri che molte discipline scientifiche si sono staccate dal grembo della filosofia. Il titolo di una delle grandi opere che insieme al *Dialogo sopra i due massimi sistemi* di Galileo sta all’origine della fisica si intitola *Philosophiae naturalis principia mathematica*. E Newton vi affronta questioni metodologiche e ‘metafisiche’ che da sempre sono al centro dell’interesse dei filosofi. Prendiamo, per esempio, la questione dello spazio. Alla concezione assolutista di Newton se ne contrapponeva una di tipo relazionale. La discussione sulle due alternative si è nutrita di un costante e fecondo intreccio di analisi filosofiche ed elaborazioni scientifiche. La soluzione trascendentale proposta da Kant verrà criticata da Herbart, le cui idee filosofiche costituiranno a loro volta, insieme alla teoria delle superfici curve di Gauss (il ‘principe dei matematici’), un fondamentale motivo ispiratore della teoria riemanniana delle varietà continue. E con essa lo spazio perde il carattere di intuizione formale che possedeva in Kant per divenire un concetto comprendente sotto di sé una molteplicità di spazi possibili (euclideo e non euclidei).

In seguito le dottrine di Riemann e degli altri creatori delle nuove geometrie susciteranno un dibattito che condurrà alla nascita del convenzionalismo dello scienziato-epistemologo Henri Poincaré. La formulazione della teoria della relatività, dovuta a un fisico – Albert Einstein – nella cui opera troviamo nuovamente un inestricabile intreccio di scienza e filosofia, darà una spinta ulteriore allo sviluppo dell’epistemologia, sia generale sia applicata. Le conquiste della fisica relativistica hanno condotto, per esempio, al riaccendersi della discussione sul problema filosofico della conoscenza a priori. E oggi, a cent’anni dalla memoria sulla relatività ristretta, si dibatte con rinnovato vigore sulla natura dello spaziotempo a livello tanto scientifico quanto filosofico, disponendo di un ventaglio di opzioni teoriche sempre più ricco e articolato: assolutismo e relazionalismo, realismo e relativismo, convenzionalismo e oggettivismo, apriorismo e empirismo.

Quanto detto per la fisica potrebbe essere esteso ad altre branche della scienza, sia a quelle consolidate (poniamo la biologia) sia a quelle che versano in uno stato più magmatico. Si pensi, per esempio, alle neuroscienze e alla filosofia della mente. Al momento attuale sia la scienza sia la filosofia stanno dando ciascuna il proprio contributo alla comprensione di fenomeni complessi come la natura della coscienza e degli stati mentali, e quindi a problematiche antiche come la contrapposizione tra

materialismo e spiritualismo, tra determinismo e libertà del volere, tra riduzionismo e antiriduzionismo.

Eppure, nonostante tutto ciò, molti ostacoli continuano a rendere difficile una proficua intesa tra scienziati e filosofi. Mi limiterò a indicarne un paio. Tanto per cominciare, scienziati e filosofi procedono secondo metodologie e interessi differenti. Per un filosofo contano soprattutto l'analisi dei concetti e la ricerca di concezioni agganciate a prospettive tendenzialmente 'totalizzanti'. Per uno scienziato contano soprattutto i dati di esperienza, le prove logicamente e matematicamente fondate, il vaglio di congetture circoscritte e circoscrivibili; inoltre è sempre forte la sua speranza di evitare le ipotesi limitandosi ai puri e semplici fatti (*Hypotheses non fingo*, diceva Newton). In secondo luogo, sono purtroppo numerosi gli scienziati che giudicano la filosofia con criteri inappropriati e i filosofi che si pronunciano su una scienza che (più o meno consapevolmente) sentono come nemica e della quale hanno un'immagine quasi sempre imprecisa e talvolta caricaturale. Soprattutto in Italia, troppi filosofi tengono poco conto dei versi di Giacomo Noventa, «Un poeta pol far de note zorno, Un filosofo nò ...» anche quando parlano di questioni trattate da discipline scientifiche come la logica matematica o la fisica, la biologia o la psicologia.

Perché le difficoltà nei rapporti fra scienza e filosofia siano state e continuino ad essere particolarmente forti qui da noi è cosa che, a sua volta, è dovuta a molte ragioni. Le più importanti di esse affondano le loro radici nella tradizione culturale italiana come questa è venuta strutturandosi in epoca moderna. Non è certo il caso di rifarne la storia a partire da Galileo. È noto che tentativi di ritessere quei rapporti su basi epistemologicamente solide si sono scontrati con svalutazioni di vario genere (e aventi varie finalità) del sapere scientifico e delle filosofie ad esso saldamente agganciate. Anche nel recente passato – intendo il Novecento – momenti di rinascita di una cultura epistemologica all'altezza dei tempi si sono scontrati (spesso riportando la peggio) con atteggiamenti filosofici e storico-filosofici estranei e talora avversi (anche quando dichiaravano il contrario) al lavoro teorico effettivo.

Questa situazione, nonostante alcuni indubbi progressi compiuti a partire dal secondo dopoguerra, continua a sussistere ancor oggi. E si riverbera su tutti gli aspetti della vita filosofica, culturale e scientifica del nostro paese: sui programmi di formazione scolastica e universitaria, sul modo di gestire istituzioni culturali e sedi di discussione importanti, sulle scelte accademiche, sulle cose che si scrivono nelle pagine culturali dei giornali o che si dicono attraverso i mezzi di comunicazione di massa, e così via. Su alcuni di questi temi mi sono soffermato altrove e non posso che rimandare a ciò che ho cercato di documentare in [3]. Qui vorrei limitarmi a due osservazioni conclusive che portano, per così dire, la prima una buona notizia e la seconda una notizia cattiva.

Anzitutto mi piacerebbe ricordare (perché per lo più si continua ad ignorarlo) che anche nella piccola Italia del Novecento si è avuto un bell'esempio di interazione fra scienza e filosofia. Nei primi decenni del secolo scorso, infatti, si realizzò un'importante 'sinergia' tra le idee di un filosofo come Giovanni Vailati e la concezione soggettivistica

della probabilità del matematico Bruno de Finetti – ancor oggi uno dei maggiori programmi di ricerca perseguiti a livello internazionale. De Finetti trasse spunto proprio dalla filosofia di Hume e dalla lezione che Vailati aveva ricavato dal pragmatismo americano di Peirce e dalle idee logiche di Peano. È de Finetti stesso a ricordarci che il suo soggettivismo scaturisce dall'applicazione alla probabilità dell'idea vailatiana che «una definizione valida di una grandezza avente senso [...] deve essere *operativa*, cioè basata sull'indicazione degli esperimenti – sia pure esperimenti concettuali – da eseguire per ottenerne la misura» [2, pp. 172-173].

Con la seconda osservazione vorrei invece indicare un altro dei tanti fattori che da noi rendono difficoltosa l'interazione fra scienza e filosofia. Per introdurlo mi servirò delle parole sottilmente ironiche con cui, intorno agli anni Venti, il fisico inglese Norman Robert Campbell si rivolgeva ai suoi colleghi scienziati per persuaderli dell'importanza scientifica dell'indagine che lui chiamava 'metafisica', ma che io preferirei chiamare semplicemente 'filosofica'. Dopo aver osservato che siamo tutti metafisici (ossia filosofi), fisici inclusi, egli dichiarava che il mondo non si divide tra coloro che sostengono dottrine metafisiche (o filosofiche) e coloro che non le sostengono, ma piuttosto fra quelli che le sostengono per qualche ragione e quelli che le sostengono senza averne nessuna [1, p. 12].

Nonostante i passi avanti compiuti, a me pare che ancora si avverta, nella nostra cultura, una carenza epistemologica di fondo. Troppi scienziati e filosofi non si preoccupano a sufficienza di giustificare quello che sostengono sui loro reciproci rapporti con una strumentazione adeguata, e cioè andando al di là di perorazioni 'pro o contro' di natura essenzialmente retorica. Lo stesso dibattito che in questi giorni è tornato a fiorire sullo scientismo e sulle contestazioni della scienza in nome della filosofia e viceversa pare singolarmente povero di categorie e di argomentazioni teorico-filosofiche.

NOTE

* Questo testo riproduce un articolo dallo stesso titolo pubblicato il 27/09/2005 nella sezione Scuola del sito dell'Istituto della Enciclopedia Italiana Treccani (www.treccani.it). Si ringrazia l'Istituto dell'Enciclopedia Italiana per averne concesso la pubblicazione anche in questa sede.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Campbell, N. R., *Foundations of Science*, Dover edition, New York 1957.
- [2] de Finetti, B., *La logica dell'incerto*, Il Saggiatore, Milano 1989.
- [3] Parrini, P., *Filosofia e scienza nell'Italia del Novecento. Figure, correnti, battaglie*, Guerini e Associati, Milano 2004.

FEDERIGO ENRIQUES, FILOSOFO

ORNELLA POMPEO FARACOVÌ

Centro Studi Enriques, Livorno

Abramo Giulio Umberto Federigo Enriques nacque a Livorno il 5 gennaio 1871 e morì a Roma il 14 giugno 1946. Discendeva da una famiglia di ebrei sefarditi, la cui presenza nel porto toscano è attestata fin dalla prima metà del secolo XVII: un Isaac Israel Enriques figura, nel 1644, tra i fondatori di una istituzione benefica ‘per maritar donzelle’ (*Mohar ha Betulot*); un Daniel Enriques Valensin viene condannato nel 1648 per comportamento irriverente durante un rito in sinagoga¹. Nella città senza ghetto, dove il granduca Ferdinando I, con le Lettere Patenti del 1591 e 1593, aveva promulgato la Costituzione Livornina, per accogliere mercanti ebrei, mori, persiani, armeni, rendendoli «liberi ed esenti da qualsivoglia debito civile o criminale» contratto al di fuori della Toscana, i suoi antenati erano giunti dalla penisola Iberica, passando attraverso il Portogallo. Di questo ultimo, importante particolare è testimone la grafia del nome, Enriques, alla portoghese, e non Enriquez, alla spagnola; né può escludersi che la denominazione fosse nata proprio in rapporto a servizi prestati alla corte di Enrico (in portoghese Enrique), a indicare l'appartenenza alla cerchia del re.

Federigo, che nell'ambiente familiare era chiamato Ghigo, alla toscana, ebbe due fratelli: Paolo, futuro studioso di biologia, tra i primi in Italia ad occuparsi di genetica, ed Elbina, che divenne la moglie di un altro grande matematico, legato a Federigo da diuturni rapporti di collaborazione e amicizia, Guido Castelnuovo. Il padre, Giacomo, era un facoltoso mercante di tappeti, attività che lo portava sovente in viaggio lungo le coste del Mediterraneo. L'educazione sua e dei fratelli fu dunque seguita in prima persona dalla madre, Matilde Coriat, colta ed energica, originaria di Tunisi, dove risiedeva una importante comunità di ebrei livornesi, indicati con la denominazione *grana*, dalla parola *Gorni*, con la quale è chiamata in arabo Livorno. Matilde era di madrelingua francese; un elemento che certo influì sul perfetto bilinguismo di Federigo, che con la cultura scientifica e filosofica francese ebbe sempre rapporti particolarmente stretti, alternando scritti in francese a quelli in italiano. Della attenzione con la quale si occupava dell'educazione della mente dei tre figli, non senza segnalare con un sorriso i tratti vulcanici dell'intelligenza del piccolo Federigo, e i suoi precoci interessi matematici, è testimone una lettera del 1883, indirizzata alla sorella Fortunée e pubblicata molti anni dopo dalla nipote Adriana, figlia del matematico:

[...] Elbina studia col Sig. Rodolfo, e ci dà molte soddisfazioni. Ghigo ha compiuto l'altr'ieri 13 anni. Anche lui studia benino. In questi giorni, figurati, gli è venuto il filone della geometria. Ma tu sai com'è questo figliuolo:

ogni giorno ha un filone nuovo per il capo che gli dura quanto *l'espace d'un matin...*²

Il Sig. Rodolfo era il maestro privato dei fratelli Enriques. Non sappiamo in qual misura il suo insegnamento, sorretto forse dai suggerimenti della signora Matilde, abbia contribuito a stimolare nel piccolo Federigo l'atteggiamento logico e classificatorio di cui è singolare documento una pagina di diario, redatta all'età di otto anni e mezzo e anch'essa pubblicata, postuma, dalla figlia:

Oggetti che possiedo

Io possiedo 13 oggetti.

Gli oggetti che possiedo sono di due specie: oggetti isolati e finimenti.

Chiamo *oggetto isolato* un oggetto che non ha niente di simile né di comune con le altre cose che ho.

Chiamo *finimento* un gruppo di due oggetti o di tanti oggetti che servono per uno stesso scopo o per scopi simili.

Talvolta due o più oggetti isolati si riuniscono a formare un finimento.

Lista degli *oggetti isolati* : 1) Trottola; 2) Frusta; 3) Lanterna magica; 4) Barchetta di legno;

Lista dei *finimenti*: 1) Arnesi da falegname: martello, sega. 2) Oggetti per scrivere: penna di avorio, calamaio, cartella, timbro, lapis d'argento. 3) Oggetti d'oro: orologio del nonno, catena del nonno³.

Trasferitosi a Pisa con la famiglia nel 1878, Federigo vi completò gli studi; fu allievo della Scuola Normale Superiore e si laureò in matematica nel 1891. I suoi studi sulle superficie algebriche ne fecero presto uno dei più grandi matematici italiani del Novecento. Un matematico, bisogna dire, di tipo particolare; un matematico-filosofo, per il quale fin dagli anni giovanili fu del tutto imprescindibile il rapporto con la filosofia. Abbiamo su questo punto una interessante testimonianza di G. Scorza Dragoni:

Una luminosa mattina romana, passeggiavo i viali del Pincio in compagnia di Federigo Enriques. La conversazione si era portata su questioni prettamente filosofiche. Ci eravamo scoperti entrambi condotti allo studio delle scienze, diciamo esatte, da una infezione filosofica liceale, e dalla convinzione che soltanto nella filosofia naturale potevamo trovare una risposta (parziale, d'accordo) ai problemi che ci avevano affascinato negli anni del liceo⁴.

Ma quale tipo di filosofia attrasse il giovane Enriques? Fu lui stesso a rievocare l'impossibilità di aderire alle prospettive del positivismo, che lo aveva accomunato ad altri studenti pisani, senza che nessuno di loro potesse in alcun modo far proprio il verbo degli hegeliani italiani, autorevolmente rappresentati a Pisa da Donato Jaja, maestro di un altro grande normalista, poco più giovane di Enriques, Giovanni Gentile:

La dialettica hegeliana degli scolari del prof. Jaja, col suo linguaggio caratteristico, repugnava alle nostre menti, senza che potessimo aderire all'imperante filosofia positiva. Gli autori ai quali guardavamo non erano Büchner e Moleschott, e nemmeno Auguste Comte, ma semmai Darwin e Spencer, cui si aggiunsero più tardi Stuart Mill e Ribot. Fra gli italiani discutevamo di Lombroso, mentre non conoscevamo Ardigò, che non apprezzammo neanche quando lo

incontrammo. Ci sembrava (e non so se avessimo proprio torto) che la sua maniera di pensare e di parlare fosse piuttosto da teologo che da uomo di scienza, sebbene col suo concetto dogmatico ei volesse fare della scienza stessa una nuova Bibbia, da sostituire all'antica.⁵

Verso la metà dell'Ottocento – leggiamo in un altro scritto – lo sviluppo delle scienze, che già aveva recato brillanti applicazioni tecniche, «dava luogo alle più larghe speranze anche nell'ordine morale e sociale». Era largamente condivisa la convinzione che gli uomini, sciolti dalla soggezione religiosa, «avrebbero trovato nel sapere la base nuova di un'autorità capace di governarli»; si faceva strada una fiducia incondizionata nelle immancabili conseguenze benefiche della scienza. Il limite del positivismo fu il non avvertire i lati deboli di codeste dottrine che, pur con qualche incertezza e contraddizione, «si fondevano e penetravano in una grande apoteosi della scienza». Proprio dalla critica di tali errori mosse la vasta reazione antiintellettualistica di fine secolo. La conoscenza non può guidare la condotta degli uomini; il volere non prende norma dal sapere, ma dagli interessi o dai sentimenti: «per tal modo il materialismo storico e l'idealismo religioso, fra loro in lotta, convergono ugualmente in una svalutazione della scienza. E di questa non tardò il Brunetière a proclamare la bancarotta»⁶. Alla reazione antiscientifica contemporanea, nella quale convergono le correnti filosofiche più varie, idealismo e irrazionalismo in primo luogo, è necessario contrapporre una filosofia scientifica che sappia difendere il valore della scienza, senza indulgere alla visione dogmatica del vecchio positivismo, «sempre pronto a credere che Nostra Signora la Scienza conceda bell'e fatta la propria verità agli assidui lettori della sua bibbia»⁷. La prospettiva filosofica cui guardare è quella aperta dal criticismo kantiano, e dai suoi sviluppi nella cultura filosofica e scientifica europea a partire dal secondo Ottocento. Ad essa Enriques attinge, nella ricerca sui fondamenti del sapere geometrico, che accompagna fin dagli inizi il suo lavoro matematico:

Carissimo Guido, mentre le questioni matematiche sonnecchiano fino al miglior tempo, io mi sto occupando da più giorni di un'altra questione che dalla matematica prende solo il pretesto: sentendone il nome tu proverai più orrore che stupore. Si tratta del problema filosofico dello spazio. Libri di psicologia e di logica, di fisiologia e di psicologia comparata, di critica della conoscenza ecc. passano sul mio tavolino dove li assaporo con voluttà tentando di estrarne il succo per ciò che concerne il mio problema... Leggi la *Logik* del Wundt, quella parte almeno che riguarda i metodo della matematica, e pensa che è un fisiologo che scrive così: un fisiologo che non teme di salire l'erta della concezione kantiana per illuminare dall'alto il gran corso di tutte le scienze⁸.

Il riferimento a Kant, inteso in maniera tutt'altro che scolastica ed ortodossa, anzi liberamente rivisitato e reinterpretato, costituisce lo sfondo dei lavori filosofici di Enriques, a partire dalla riflessione intorno al concetto geometrico di spazio, che apre solennemente le *Lezioni di geometria proiettiva* del 1896: «Dall'ordine delle cose esterne, nella rappresentazione data alla mente dai sensi, scaturisce il concetto di spazio»⁹. In due importanti articoli del 1900-1901, e successivamente nel cap. IV del grande libro

del 1906, *Problemi della scienza*, Enriques chiarisce il senso di quella definizione, attraverso la distinzione fra tre diversi lati del concetto di spazio: spazio reale, spazio rappresentativo, spazio geometrico. Spazio reale è «l'ordine delle cose esterne», ossia l'insieme dei rapporti spaziali reali, testimoniati dall'esperienza del mondo esterno. In tale definizione è richiamata la definizione enriquesiana del reale, come «rapporto invariante fra sensazioni e volizioni»: reali sono cioè quegli aspetti delle cose che non mutano al mutare delle condizioni osservative, volontariamente disposte. Spazio rappresentativo, o psicologico, è il modo di configurare i rapporti spaziali, inscritto, per così dire, nel funzionamento dei nostri organi di senso. Spazio geometrico è lo spazio costruito dal matematico, in rapporto con lo spazio psicologico (ma non da esso meccanicamente derivato), nel tentativo di esplorare i molteplici lati dello spazio reale. Tale distinzione consente di dar conto della pluralità delle concezioni geometriche dello spazio, legata agli sviluppi della geometria non euclidea, senza abbandonare la nozione kantiana di spazio, come forma pura a priori dell'intuizione sensibile. Le due concezioni, a prima vista inconciliabili, possono infatti coesistere, ove si tenga conto che lo spazio geometrico non coincide con lo spazio rappresentativo, ma ne costituisce una elaborazione e uno sviluppo, anche plurale.

Attraverso questa concezione della conoscenza geometrica, come prodotto di una costruzione della mente, operata a partire dal dato empirico in una pluralità di direzioni, matura la concezione enriquesiana della verità scientifica non come punto di arrivo definitivo ed assoluto, ma come frutto sempre parziale e rivedibile dello sforzo umano di pervenire alla verità. È questo l'approssimazionalismo di Enriques; ad illustrarlo, portiamo due citazioni fra le molte possibili:

Se la verità è soltanto un passo verso la verità, il valore della scienza consisterà piuttosto nel camminare che nel fermarsi ad un termine provvisoriamente raggiunto. I fatti, le leggi, le teorie riceveranno il loro senso non tanto come sistema compiuto e statico, quanto nella loro reciproca concatenazione e nel loro sviluppo [...]

Noi sappiamo ora che la verità della scienza non si trova come qualche cosa di compiuto ed assoluto in nessuna teoria; ma ogni teoria, ogni costruzione di un sistema di idee provvisoriamente formate dal pensiero per rappresentare e spiegare il mondo dei fenomeni esprime qualche cosa di vero; e la verità totale per l'uomo è nella serie dei sistemi possibili, e conseguentemente nella evoluzione storica, nella quale le teorie vengono fatte e disfatte, col risultato di procurarci una conoscenza sempre più vasta e più ravvicinata¹⁰.

La filosofia scientifica di Enriques, con le sue implicazioni kantiane, presentava rilevanti punti di contatto con l'orientamento filosofico e scientifico vivo nella cultura europea fra i due secoli, specie in ambito tedesco e francese, volto a tener fermo il valore della scienza, contro gli epigoni dell'idealismo hegeliano, ma anche a rivendicare, contro l'empirismo positivista, il carattere attivo e costruttivo del conoscere scientifico. Organo di tale tendenza fu in Francia, a partire dall'ultimo

decennio dell'Ottocento, la «Revue de Métaphysique et de Morale» (che tra i suoi numerosi illustri collaboratori poté annoverare anche Enriques), il cui orientamento è ben espresso nella parola d'ordine formulata in una lettera di uno dei suoi fondatori e direttori, Xavier Léon: «Soyons rationalistes avec rage, contre les empiristes de toutes les catégories»¹¹. All'interno di tale orientamento, che si sviluppò fruttuosamente nel primo quindicennio del Novecento, per infrangersi poi attraverso quell'immane tragedia che fu la prima guerra mondiale, proprio la matematica venne individuata come espressione somma del carattere attivo del conoscere scientifico. Nelle iniziative internazionali che esso promosse, si produsse un significativo avvicinamento tra filosofi e matematici; e fu con soddisfazione e compiacimento che nel 1908, alla conclusione del Congresso di Heidelberg, il bollettino della Société Française de Philosophie, assai vicina alla «Revue de Métaphysique et de Morale», poté annunciare, come uno dei frutti più significativi di tale avvicinamento, l'incarico, affidato proprio ad Enriques, matematico di professione, di organizzare per il 1911 il quarto congresso internazionale di filosofia a Bologna, la città nella quale insegnava.

Come è ben noto, il ruolo in tal modo assegnato ad Enriques, come referente italiano dell'orientamento internazionale di filosofia scientifica, che abbiamo richiamato, inquietò profondamente Croce e Gentile, in quella fase, e ancor per breve tempo, uniti nello sforzo di accreditare, anche attraverso la rivista «La Critica», un diverso programma di rinnovamento della cultura filosofica italiana. Frutto della rotta di collisione fra i due differenti orientamenti fu la polemica antienriquesiana, ingaggiata da Croce, alla fine del Congresso, con una intervista a Guido De Ruggiero, per il «Giornale d'Italia», cui seguirono, da una parte e dall'altra, diversi altri interventi. La tesi di Croce era molto semplice: Enriques era un matematico; non aveva dunque titoli per parlare di filosofia. Questa affermazione, non ulteriormente argomentata, fu ribadita più volte, anche in risposta alle repliche di Enriques, ad esempio in questa forma: «Le questioni filosofiche non si trattano ad orecchio, ma richiedono una lunga preparazione, che Ella, matematico, non possiede »¹².

La separazione essenziale tra filosofia e matematica costituiva un caposaldo del pensiero di Croce: la prima era la forma più alta del sapere teoretico; la seconda, come in genere tutta la scienza, apparteneva al momento economico dello spirito pratico, ed era dotata di utilità strumentale, ma priva di portata conoscitiva. Una delle formulazioni più incisive della replica enriquesiana a tale concezione può essere rintracciata nelle breve nota pubblicata nel 1914 sul giornale *Il Marzocco*, in margine ad un incontro internazionale di filosofi e matematici, organizzato in prima persona anche da Enriques. Senza che Croce sia nominato, il suo punto di vista è brevemente riassunto: «Mi par di sentire qualcuno dei miei lettori: che cosa diamine possono discutere insieme filosofi e matematici? Allegro convegno in cui gl'interlocutori non hanno nulla in comune che li interessi!»¹³. Tale convincimento, molto diffuso in Italia, corrisponde fedelmente all'ordinamento degli studi, con la separazione netta fra cultura letteraria e formazione scientifica. Così la scelta operata dal giovane munito della licenza liceale, che si affaccia

alla soglia dell'Università, ha sovente il significato di un giuramento solenne:

il futuro letterato, storico, filosofo, consapevole della nobiltà della sua missione, promette di abbandonare per sempre quella matematica che fu – ahimè – il suo tormento nella scuola media, e che è cosa troppo pratica, troppo minuta, per occupare un cervello aperto ai grandi voli della poesia o della metafisica; mentre il futuro matematico giura a se stesso di chiudere per sempre i libri di latino o di greco...¹⁴

Ma tale diffusa concezione non rende giustizia in primo luogo alla tradizione culturale italiana: è proprio in Italia che sorsero nell'antichità le prime grandi scuole filosofiche ispirate alla matematica, come la pitagorica e l'eleatica; tutta pervasa di una visione matematica dell'universo fu poi la filosofia galileiana. È ben vero che tali glorie sembrano oggi dimenticate dagli italiani, i quali «lasciano che i più bei pensieri dei nostri matematici ed astronomi passino nella storia della filosofia coi nomi di Cartesio o di Locke», e che a qualche storico straniero tocchi per avventura mettere in rilievo il significato filosofico della scienza di Galileo. Senza insistere su questa applicazione alla storia del pensiero scientifico della risorgimentale sottolineatura del ruolo svolto dal Rinascimento italiano alle origini della moderna cultura europea, prosegue ricordando, «(per non tornare con Platone al mondo antico) Cartesio e Leibniz», grandi matematici che furono anche grandi filosofi. La conclusione è precisa:

Se questi sommi pensatori rinascessero ai giorni nostri, assai li meraviglierebbe l'interpretazione delle loro dottrine per parte di storici della filosofia incapaci di comprenderne lo spirito matematico. Eppure codesta interpretazione è essenziale per spiegare lo sviluppo ulteriore del pensiero, che fa capo a Kant¹⁵.

Lo scontro con Croce fu un segnale importante della indisponibilità del neoidealismo italiano ad accogliere e meditare le sollecitazioni che sul terreno del rapporto tra filosofia e scienza venivano dall'orientamento internazionale di filosofia scientifica, imbevuto di temi kantiani, del quale Enriques fu in quella fase il più importante referente italiano. Coerentemente, la riforma della scuola e dell'Università, varata nel 1923 da Giovanni Gentile, Ministro della Pubblica Istruzione nel governo Mussolini, ribadì e consolidò la reciproca separazione fra insegnamento umanistico e insegnamento scientifico, facendo dell'umanesimo letterario e filosofico l'asse portante della nuova scuola. In qualità di presidente della Mathesis, l'associazione dei docenti di matematica e di fisica, Enriques ebbe veste istituzionale per intervenire sul ministro in rapporto alla nuova organizzazione della scuola. In proposito, la sua linea fu quella di insistere per ampliare il ruolo dell'insegnamento scientifico, accettando nel contempo la valorizzazione della cultura classica e l'introduzione della trattazione storica della filosofia. Non si trattava, si badi bene, di un atteggiamento di subalternità nei confronti di Gentile, con il quale peraltro Enriques mantenne per tutta la vita rapporti di collaborazione e di stima, in particolare nel periodo nel quale Gentile lo volle direttore della sezione di matematica dell'Enciclopedia Italiana. Dell'istruzione classica secondaria, infatti, Enriques era un convinto sostenitore fin dai primi anni del secolo, quando aveva svolto un ruolo

assai attivo all'interno della Associazione dei docenti universitari, e nei dibattiti della Federazione Nazionale Insegnanti Scuola Media, secondo la linea efficacemente riassunta in un passo di una lettera a Giovanni Vailati:

Quanto alla questione pedagogica cui Ella mi accenna, le dirò ch'io dò il più alto valore all'istruzione classica secondaria, come Ella forse già sa; temo quindi che i nuovi progetti tolgano il beneficio di questa istruzione a coloro che, secondo me, ne hanno più bisogno, cioè i futuri scienziati¹⁶.

Sul piano dell'organizzazione dei programmi e degli orari, gli sforzi di Enriques non ottennero grandi risultati. La massima concessione che Gentile fece alle istanze da lui rappresentate fu l'inserimento nei programmi dei Licei Scientifici dell'insegnamento della storia del pensiero filosofico e scientifico. Proprio alla storia del pensiero scientifico, e alla sua capacità di mostrare nel suo concreto farsi quell'interazione fra matematica e filosofia, che costituisce lo sfondo al di fuori del quale mal si comprendono molti dei grandi temi dei protagonisti della storia del pensiero, da Pitagora a Platone, da Democrito allo stesso Aristotele, da Galileo a Descartes e Leibniz, fino ai contemporanei come Poincaré, Enriques dedicò, fra gli anni Venti e gli anni Quaranta, molti scritti e molte energie. Direttore dell'Istituto Nazionale per la storia delle scienze fisiche e matematiche, varato nel 1923 presso la Facoltà di Scienze dell'Università di Roma, e della Scuola di perfezionamento nella storia delle Scienze, sorta due anni dopo, si adoperò invano, negli anni Trenta, per l'istituzione di cattedre universitarie per la materia; pubblicò diversi importanti volumi e tenne corsi, fra i quali memorabile quello svolto per la scuola di preparazione universitaria per studenti ebrei, organizzata clandestinamente a Roma da Guido Castelnuovo. Ecco in proposito una preziosa testimonianza:

Il corso che tenne di storia delle matematiche fu un memorabile avvenimento, che richiamò non soltanto gli studenti d'ingegneria. Il bel vecchio, l'affascinante signore che saliva sulla cattedra coi modi di chi ne ha fatto il suo trono, e vi deponne con gesto regale un paio di guanti di cinghiale sempre nuovi, sempre impeccabili, parlava con la voce piana e diritta dei grandi persuasori. Conduceva gli ascoltatori alla comprensione limpida di relazioni complesse, all'individuazione di nessi mai sospettati¹⁷.

Fra le valutazioni più esatte ed equanimi del senso del lavoro filosofico e storiografico svolto da Enriques, senza interruzione, in anni difficili, citeremo, per concludere quella espressa molto più tardi, nel corso delle celebrazioni per il centenario della nascita, da Augusto Guzzo:

Ma soprattutto si deve dire che – quale che sia stata l'intonazione, nell'Enriques giovane, della sua appassionata insistenza per ricondurre la filosofia alla scienza – [...] egli è rimasto su la breccia per mezzo secolo a ricordare a noi, che eravamo dall'altra parte, il dovere di capire la scienza, perché sia piena e completa la comprensione filosofica dell'umana civiltà e dell'uomo suo autore¹⁸.

NOTE

- ¹ Per queste ed altre notizie sulle radici livornesi di F. Enriques si veda [15], p. 263.
- ² Si veda [4], p. 80.
- ³ Ivi, pp. 77-78.
- ⁴ La citazione è tratta da [14], p. 78.
- ⁵ Si veda [8], pp. 377-378.
- ⁶ La citazione è tratta da [6], p. 4.
- ⁷ Il tema è svolto in [10], p. 48.
- ⁸ Il brano è tratto da una lettera di Enriques a Guido Castelnuovo, datata 4 maggio 1896. Si veda [13], pp. 260-261.
- ⁹ Si veda [5], p. 1.
- ¹⁰ Si vedano [9], p. 3, e [10], p. 85.
- ¹¹ Lettera di X. Léon a E. Halévy, 1891, in [1], p. 11.
- ¹² Si veda [2], p. 261.
- ¹³ Si veda [7].
- ¹⁴ Ibidem.
- ¹⁵ Ibidem.
- ¹⁶ F. Enriques a G. Vailati, 17 maggio 1902, in [16], p. 578.
- ¹⁷ Si veda [3], p. 96.
- ¹⁸ La citazione è tratta da [12], p. 871.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bergson, H., *Lettere a Xavier Léon e ad altri*, a cura di R. Ragghianti, Bibliopolis, Napoli 1992.
- [2] Croce, B., *Pagine sparse*, vol. I, *Letteratura e critica*, Laterza, Bari 1960.
- [3] Della Seta, F., *L'incendio del Tevere*, Paolo Gaspari Editore, Udine s.d.
- [4] Enriques, A., Ricordi del babbo, *Periodico di matematiche*, S.IV, vol. XXV, n. 2, 1947, pp. 73-80.
- [5] Enriques, F. *Lezioni di geometria proiettiva*, Zanichelli, Bologna 1898, rist. anast. Zanichelli, Bologna, 1996.
- [6] Enriques, F. *Scienza e razionalismo*, Zanichelli, Bologna 1912, rist. anast. Zanichelli, Bologna 1990.
- [7] Enriques, F., Un convegno di matematici e di filosofi, *Il Marzocco*, 8 marzo 1914, p. 2.
- [8] Enriques, F., I motivi della filosofia di Eugenio Rignano, *Scientia*, a. XXIV, vol. XLVII, 1930, pp. 337-384.
- [9] Enriques, F., *Il significato della storia del pensiero scientifico*, Zanichelli, Bologna 1934.
- [10] Enriques, F., *La teoria della conoscenza scientifica da Kant ai nostri giorni* (1938), Zanichelli, Bologna 1983.
- [11] *Gentile e i matematici italiani. Lettere 1907-1943*, a cura di A. Guerraggio e P. Nastasi, Bollati Boringhieri, Torino 1993.
- [12] Guzzo, A., Parole del Presidente dell'Accademia delle Scienze di Torino, *Atti dell'Accademia delle Scienze di Torino*, 1971, pp. 865-899.
- [13] *Riposte armonie. Lettere di Federigo Enriques a Guido Castelnuovo*, a cura di U. Bottazzini, A. Conte, P. Gario, Bollati Boringhieri, Torino 1996.
- [14] Scorza Dragoni, G., Su alcuni paradossi matematici. Conferenza tenuta il 5 marzo 1953, *Rendiconti del seminario matematico e fisico di Milano*, XXIV, 1952-53, pp. 78-87.
- [15] Torrigiani G., Per una biografia di Federigo Enriques, in *Federigo Enriques. Filosofia e storia del pensiero scientifico*, a cura di Faracovi, O. P. e Speranza, F., Belforte, Livorno 1998.
- [16] Vailati, G., *Epistolario*, a cura di G. Lanaro, Einaudi, Torino, 1971.

BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE DEGLI SCRITTI DI ENRIQUES

1. Scritti matematici:

Memorie scelte di geometria, 3 voll., Accademia dei Lincei, Roma 1956-1966.

Lezioni di geometria proiettiva, Zanichelli, Bologna 1898; rist. anast., Zanichelli, Bologna 1996.

Lezioni sulla teoria geometrica delle equazioni e delle funzioni algebriche, in collaborazione con O. Chisini, Zanichelli, Bologna 1915-1934, 4 voll.; rist. anast. Zanichelli, Bologna 1985, 2 voll.

Lezioni sulla teoria delle superficie algebriche, raccolte da L. Campedelli, 2 parti, Cedam, Padova 1932-1934.

Le superficie razionali, in collaborazione con F. Conforto, Zanichelli, Bologna 1939.

Le superficie algebriche, Prefazione di Guido Castelnuovo, Zanichelli, Bologna 1949.

Voci per la sezione di Matematica dell'Enciclopedia Italiana:

Abeliano; Alessandria d'Egitto; Analisi; Angolo; Assioma; Assiomatica; Assoluto: l'assoluto nella matematica e nella fisica; Assurdo; Astrazione; Bertini, Eugenio; Betti, Enrico; Brianchon, Charles Julien; Castelnuovo, Guido; Cerchio; Continuità; Corrispondenza; Curve; Definizione; Dimensioni; Dimostrazione; Geometria; Grandezza; Incommensurabile; Inerzia: parte relativa alla matematica e alla dinamica; Infinito: l'infinito nella storia della fisica e della matematica; Irrazionale: Matematica; Matematica; Meccanicismo; Moto; Naturali, scienze; Numero: Matematica; Parmenide di Elea: Parmenide e la Geometria; Postulato; Problema; Punto; Spazio: le teorie dello spazio e la geometria; Superficie: IV Superficie algebriche; Uguaglianza.

2. Scritti per la scuola:

Questioni riguardanti la geometria elementare, Zanichelli, Bologna 1900.

Questioni riguardanti le matematiche elementari, Zanichelli, Bologna 1912.

Elementi di geometria (in collaborazione con Ugo Amaldi, Zanichelli, Bologna 1903).

3. Scritti di filosofia e di storia del pensiero scientifico:

Problemi della scienza, Zanichelli, Bologna 1906; rist. anast. Zanichelli, Bologna 1985.

Scienza e razionalismo, Zanichelli, Bologna 1912; rist. anast. Zanichelli, Bologna 1990.

Per la storia della logica, Zanichelli, Bologna 1922; rist. anast. Zanichelli, Bologna 1987.

Le matematiche nella storia e nella cultura, Zanichelli, Bologna 1938, rist. 1985.

Storia del pensiero scientifico antico, in collaborazione con G. de Santillana, Treves, Milano 1932.

Histoire de la pensée scientifique, in collaborazione con G. de Santillana, Hermann, Parigi 1934-1939, 6 voll.

Compendio di storia del pensiero scientifico, Zanichelli, Bologna 1937, rist. anast. Zanichelli, Bologna 1982.

La théorie de la connaissance scientifique de Kant à nos jours, Hermann, Parigi 1938; trad. it. Zanichelli, Bologna 1983.

Causalité et déterminisme dans la philosophie et l'histoire des sciences, Hermann, Parigi 1941; trad. it. Atlantica, Roma 1945.

Il pensiero di Democrito di Abdera, in collaborazione con M. Mazziotti, Zanichelli, Bologna 1948.

Per la bibliografia completa: *Federigo Enriques. Matematiche e filosofia. Lettere inedite. Bibliografia degli scritti*, a cura di O.P. Faracovi e L. M. Scarantino, Belforte, Livorno 2001.

DA KANT A EINSTEIN: UN DIBATTITO

Premessa

L'impatto della teoria della relatività, prima nella forma ristretta e poi in quella generale, sulla riflessione epistemologica del Novecento è stato enorme. Ha dato luogo a diffusi fraintendimenti (tipo: «ora possiamo finalmente dire che tutto è relativo»), ma ha anche permesso di raffinare una delle parti più solide della filosofia, ovvero la filosofia della geometria e la filosofia della fisica. La lezione einsteiniana è stata raccolta soprattutto dai neoempiristi, che ne hanno fatto un'arma contro la dottrina kantiana secondo cui esistono verità a priori (come tali, supposte incontrovertibili) che esprimano conoscenze sul mondo (e non semplicemente sulla struttura logica del pensiero). Kant includeva fra queste verità i principi della metrica euclidea e alcuni principi soggiacenti alla meccanica classica. Gli sviluppi della fisica sono stati presi come una prova che la dottrina kantiana doveva essere abbandonata non solo in questo caso, ma in ogni altro. Ma accanto ai neoempiristi, anche i neokantiani hanno variamente cercato di far fronte alle nuove scoperte, cercando di isolare un nucleo autonomo della dottrina di Kant che risultasse indipendente da un intento fondativo nei confronti del sistema newtoniano.

Su questi temi si è svolto a Lucca (sabato 22 ottobre 2005) un ampio dibattito, rivolto a insegnanti e studenti della scuola secondaria superiore, al fine di chiarire alcuni aspetti generali del rapporto fra l'epistemologia kantiana e la teoria della relatività. In questo modo si voleva anche segnalare l'opportunità di un dialogo maggiore fra insegnanti di discipline diverse quando ci si preoccupi di far capire (anche in minima parte) il significato delle idee avanzate da figure come Kant e Einstein. Dopo il saluto dell'assessore provinciale Cecilia Carmassi, al dibattito hanno partecipato, nell'ordine, Luca Landi, Paolo Parrini e Silvestro Marcucci, i cui rispettivi interventi sono qui di seguito raccolti.

È con profonda amarezza che sono venuto a conoscenza della morte improvvisa di Marcucci, avvenuta il 28 dicembre. Marcucci, docente per molti anni all'Università di Pisa e presidente della Società Italiana di Studi Kantiani, è stato uno dei maggiori studiosi italiani del pensiero di Kant. Alcune delle sue numerose pubblicazioni sono tradotte in più lingue. Univa alla competenza storica e filologica una rara chiarezza d'espressione oltre che una contagiosa passione teoretica. La sua perdita priva la comunità filosofica italiana di una figura di riferimento. Il contributo al dibattito, che si era preoccupato di farmi avere subito dopo, è purtroppo il suo ultimo scritto.

A. P.

LA SCIENZA E IL SUO RIFLESSO TRASCENDENTALE: DA KANT A CASSIRER

LUCA LANDI

Liceo Artistico 'R. Cottini', Torino

1. Il valore conoscitivo della scienza

Una delle conseguenze principali del distacco della scienza dalla filosofia avvenuto nell'età moderna, e divenuto particolarmente drastico dalla metà del Settecento in poi, riguarda l'apertura di nuovi problemi *interni* all'attività filosofica, che si trova sia a dover giustificare la propria funzione nei confronti della scienza, sia a tentare di ricomprenderne metodi e risultati all'interno di una visione generale del mondo. Non è un caso quindi che l'atteggiamento dei filosofi assuma spesso un carattere di accettazione o, al contrario, di rifiuto della scienza, con tutte le possibili gradazioni dei due diversi casi.

Ad uno sguardo che tenga sufficientemente conto dell'evoluzione storica del problema, le due evenienze non sembrano però dotate di una perfetta simmetria. Nel caso del rifiuto, il riferimento appare per lo più improntato a quella che può essere chiamata, con un termine che oggi appartiene soprattutto alla storia delle idee, un'*immagine della scienza*, ovvero un complesso ideale in cui l'attività scientifica viene liberata e sollevata, per così dire, dai suoi aspetti e finalità peculiari al fine di inglobarla in un ambito culturale più ampio, fatto di istituzioni, di valori generali, di rapporti del sapere scientifico con altri saperi, di confronto con istanze etiche, sociali e religiose vigenti in un dato tempo.

Alla scienza in presa diretta si sostituisce così una specie di simulacro di secondo livello che, se può avere un significato per lo storico, per il filosofo non può che comportare lo smarrimento del senso fondamentale della pratica scientifica e la neutralizzazione della sua portata conoscitiva. L'*immagine* la otteniamo proiettandola su uno sfondo, ma su questo sfondo il quadro di partenza evidentemente si confonde. A questa istanza di considerazione globale sembrerebbe quindi naturale associare una inevitabile diluizione dei contenuti e della forza euristica diretta di ogni teoria scientifica, con l'accentuazione di tutti gli aspetti indiretti.

Nel caso specifico del filosofo, la mossa può anche consistere nel ricorrere allo strumento speculativo che presume di abbracciare l'intero e il globale, ossia al sistema. È questo il caso di Hegel e della sua *Naturphilosophie*, per cui la scienza viene a radicarsi nello sviluppo del sistema dell'Assoluto, sistema che è al tempo stesso sia ideale che reale. Se in tal modo la scienza acquisisce una (parziale) dignità filosofica, paga tuttavia un

prezzo in termini di esteriorità e formalismo: è ben nota la critica hegeliana al metodo sperimentale, od anche, per esempio, la considerazione di Newton come «il barbaro che tratta la luce a sacchi». Di particolare eloquenza è la trattazione dello strumento matematico, incapace di cogliere il divenire dell'essenza, dotato di un fine 'povero' e di un contenuto deficitario, cosicché «nel conoscere matematico la considerazione è un operare che, per la cosa, viene da fuori; ne segue quindi che la cosa vera viene alterata»¹.

Anche Schelling, nella sua filosofia della natura, segue gli stessi passi di Hegel sebbene, come ha notato Dietrich von Engelhardt, entrambi studino intensamente le scienze naturali del loro tempo e quindi non siano semplicemente disinformati. È evidente che il risultato dell'approccio idealista è quello di trasformare la scienza in un'immagine proiettata, in un insieme di procedure di interpretazione che descrivono il livello inferiore degli eventi, ma al tempo stesso sviano dalla vera realtà, che sta da un'altra parte e che costituisce il bersaglio conoscitivo più importante.

Ma accettare e valorizzare la scienza può esser fatto solo se si riconosce il suo contributo positivo all'impostazione, se non alla soluzione, dei problemi inerenti alla conoscenza in generale. Come risulta chiaro dalla prima rivoluzione scientifica in poi, la scienza è nata per offrire risposte concrete a questioni altrettanto concrete, e per fornire una conoscenza il più possibile rigorosa, e soprattutto *vera*, di parti e fenomeni della natura nella duplice forma della *spiegazione* e della *previsione*. Che poi il filosofo pieghi, per così dire, l'indagine scientifica ai suoi presupposti taciti o manifesti e che quindi non esista una sua interpretazione neutrale fa parte del gioco, ma ciò che conta è la rilevanza, di principio, della scienza in quanto pratica epistemica feconda per la questione filosofica generale della conoscenza e il fatto che quest'ultima non possa essere trattata indipendentemente dagli sviluppi e dai risultati della prima.

E questo è proprio il caso di Kant e della sua trattazione della scienza, svolta nella *Critica della ragion pura*. All'interno dell'edificazione della conoscenza sui giudizi sintetici a priori, anche in Kant è contemplato un problema sistematico, ma in un senso assai diverso da quello hegeliano. Anzitutto non sussiste una preoccupazione, per così dire, intrasistemica, poiché la *Critica della ragion pura*, come è affermato nell'*Introduzione*, è un «trattato del metodo» e non un «sistema» della scienza. In secondo luogo, il sistema è semmai relativo alla «architettonica della ragion pura», ossia all'unità che trasforma una conoscenza comune in scienza, un aggregato in un sistema: se proprio di sistema della ragione vogliamo parlare, non possiamo che dargli un senso *regolativo*, non realistico. Con ciò, la filosofia diviene il sistema di tutta la conoscenza filosofica, mai data in concreto, in quanto obiettivo a cui tende la riflessione, da cui la nota affermazione che non si può imparare la filosofia, ma solo a filosofare.

Da questo discende anche un'ulteriore conseguenza: il filosofo – anch'egli piuttosto un'entità fittizia, un'idea sottintesa ad ogni sforzo teoretico – è il «legislatore» della ragione umana, che pone la relazione di ogni conoscenza, compresa la scienza, con le finalità della ragione stessa. Così il filosofo non è un *Vernunftkünstler* (ragionatore o

artista della ragione, uno che utilizza ad arte la ragione per uno scopo specifico) come il matematico, lo scienziato e il logico, ma piuttosto qualcuno che «sta dietro di loro e li utilizza in vista dei fini essenziali della ragione»². Il concetto «cosmico» della filosofia, come lo chiama Kant, costituisce quindi lo spazio teoretico globale entro cui il filosofo può dunque analizzare le scienze, seguendone il cammino sul piano dell'intelletto e setacciandone i fondamenti.

2. Dal fatto scientifico al metodo trascendentale

Kant propone nella *Critica della ragion pura* un percorso, lineare nella sua intenzione, che dalla mente perviene al mondo attraverso il giudizio, le categorie (con la loro deduzione trascendentale) e lo schematismo. Agli schemi trascendentali si associano poi giudizi di valore universale cui Kant dà il nome di «principi», in quanto leggi (sintetiche a priori) che governano l'applicazione delle categorie ad un fenomeno qualunque, e che stanno a fondamento della scienza empirica.

La funzione di quella parte della *Critica della ragion pura* che s'intitola *Analitica dei principi*, con la sua quadripartizione tra assiomi dell'intuizione, anticipazioni della percezione, analogie dell'esperienza e postulati del pensiero empirico, tiene conto soprattutto (nelle analogie dell'esperienza, laddove tratta della sostanza, della causalità e dell'azione reciproca) delle esigenze della fisica newtoniana, anche se, a rigore, il suo quadro teorico specifico sembrerebbe mirare più ad una teoria generale della scienza e non tanto ad una dottrina fisica particolare. Sulla funzione dei «principi» Kant è forse più chiaro nella delucidazione che offre nei *Prolegomeni*, quando afferma che i principi «costituiscono un sistema fisiologico, cioè un sistema naturale, il quale precede ogni conoscenza empirica della natura, la rende anzi possibile, e quindi può essere chiamato la vera e propria scienza universale e pura della natura»³.

Questa interpretazione kantiana della scienza non si ferma alla *Critica della ragion pura*, ma prosegue con i *Principi metafisici della scienza della natura* (1786, si veda [6]) e poi anche nel cosiddetto *Opus postumum*, nel progetto incompiuto noto come *Passaggio dai principi metafisici della scienza della natura alla fisica*: l'accezione di metafisica è qui da intendere come metafisica critica o, secondo la *Critica della ragion pura*, come metafisica della natura, ovvero scienza dei concetti puri relativi alla «conoscenza teoretica di tutte le cose». I *Principi* propongono una teoria a priori dei corpi e della materia, incentrata sulle leggi del moto e coinvolgente le forze in cui trovano spazio il principio di conservazione della massa, il principio d'inerzia e quello di azione/reazione (sintetici a priori). Nel cosiddetto *Passaggio* l'accento si sposta invece sulle forze intrinseche della materia, diverse da quelle agenti dall'esterno, di natura chimica, con la postulazione di un etere (il cosiddetto 'calorico') presente in tutti i corpi e responsabile dei movimenti interni all'origine dei processi percettivi.

Il punto saliente dell'interpretazione kantiana della scienza sta nella costante applicazione del metodo trascendentale, la cui funzione consiste nel risalire alle condizioni di possibilità dell'esperienza. Kant stabilisce una ferrea equazione tra

conoscenza ed esperienza di oggetti, in base ad una duplice direttiva: in primo luogo occorre riconoscere la necessità della «regola dell'intelletto», la quale «si concreta in concetti a priori, rispetto ai quali tutti gli oggetti dell'esperienza debbono regolarsi e coi quali debbono accordarsi»⁴. In secondo luogo, «non ci è possibile aver conoscenza di un oggetto in quanto cosa in se stessa, bensì soltanto come oggetto dell'intuizione sensibile, cioè in quanto fenomeno»⁵. Su tali basi, il metodo trascendentale affronta così la questione di diritto, indagando la legittimità e il campo d'applicazione delle scienze di fatto, facendone emergere i presupposti latenti in quanto forme universali e necessarie costitutive del nostro concetto di natura.

3. *Le avventure dell'a priori*

Il rapporto istituito da Kant tra scienza e filosofia prosegue nel corso dell'Ottocento, raggiungendo la sua massima espressione nelle scuole neokantiane fiorite in Germania alla fine del secolo e nei primi decenni del Novecento. Nella Scuola di Marburgo, sicuramente da questo punto di vista la più rilevante, la riproposizione dell'impostazione trascendentale si scontra con il punto dolente lasciato in eredità dal pensatore di Königsberg: se la filosofia ha sempre da riferirsi ad un fatto scientifico storicamente dato e storicamente variabile, che ne è del sistema degli a priori, modellato come unico su di un paradigma scientifico, quello newtoniano, per certi versi superato da teorie empiricamente cogenti come la relatività e la meccanica quantistica?

A tale questione, portata al centro del dibattito anche dai neoempiristi, risponde soprattutto Ernst Cassirer con la sua teoria universale degli invarianti dell'esperienza, che possiamo considerare il tentativo più avanzato in difesa dell'impostazione trascendentale e forse il suo canto del cigno. L'intera ricerca epistemologica di Cassirer converge sulla possibilità della riaffermazione, all'interno dei mutamenti del sapere scientifico, del metodo trascendentale anche se è ben chiaro che occorre procedere oltre Kant, destrutturando l'idea di un *set* categoriale fisso e dato una volta per tutte. Si rintracciano così «pure funzioni di forma e di ordinamento», dove la forma, che sta a rappresentare il momento «propriamente creativo»,

non si può intendere come forma rigida, ma va necessariamente intesa come forma viva e mobile. [...] In tal modo la storia della fisica non è la storia della scoperta di una semplice sequela di 'fatti', bensì quella della scoperta di sempre nuove attrezzature concettuali specifiche. Ma cionondimeno, in ogni mutamento di queste attrezzature concettuali, [...] si conferma l'unità di quei principi metodici sui quali si fonda la sua stessa problematica»⁶.

L'originaria concezione kantiana dell'a priori va quindi rimpiazzata, o meglio dinamizzata, mediante la consapevolezza dei caratteri della contestualità e della relatività storica dell'apparato formale, preservandone peraltro gli aspetti della costitutività e dell'apoditticità.

Il primo problema che si presenta è quello della contingenza, in quanto sembrerebbe che l'a priori non possa oltrepassare i singoli paradigmi che si succedono nell'evoluzione

della scienza. Cassirer intende risolvere questo problema identificando nella crescita della conoscenza un doppio movimento: da un lato sussiste l'emergere di nuovi a priori (vedi il concetto di gruppo in algebra), dall'altro i vecchi a priori (spazio, tempo, causalità, ecc.) non scompaiono ma subiscono, per così dire, un processo di raffinamento costante, assicurando ai diversi sistemi teorici una trama formale comune in grado di assicurarne l'intertraducibilità.

Il punto d'approdo di Cassirer è così una conferma dell'a priori come legalità pervasiva, come regola della conoscenza della natura, emancipato dal riferimento a costanti di tipo materiale. Ma l'a priori kantiano risulta troppo ricco di contenuto: l'operazione cassireriana consisterà quindi nella sua *depurazione*, ovvero in una sorta di regressione ulteriore sul piano della formalità. In tale profonda revisione permane tuttavia il carattere universale e necessario delle forme conoscitive, legato a un'assunzione esclusivamente logico-metodologica, poiché non si può prescindere in generale da una pura funzione di ordinamento, pena la dissoluzione dell'oggettività della scienza: la costanza della forma, sostiene in proposito Cassirer, non è costanza statica dell'essere, ma dell'«uso logico» dinamico. I nostri nessi ideali sono

le direttrici fisse secondo le quali si orienta l'esperienza nella sua scientifica elaborazione formale. Questa *funzione* che essi continuamente compiono è il loro permanente e indistruttibile valore che si afferma e si conferma identico di fronte ad ogni variare del contingente materiale empirico⁷.

Su queste basi andrà quindi costruita una teoria degli «invarianti ultimi dell'esperienza» (i principi sintetici a priori), che conferiscono unità al processo conoscitivo e scientifico, costituendo la legge immanente del suo procedere.

È indubbio che la concezione dell'a priori venga sottoposta da Cassirer a una tensione notevole in cui, tra l'altro, il movimento di regressione nella formalità convive con l'accentuazione di aspetti operativi e, potremmo dire, quasi-pragmatici, insieme alla sempre maggior pervasività dell'elemento regolativo. Resta comunque aperto una questione non secondaria – di fatto non presente in Kant –, relativa a come la materia possa congiungersi ad una forma, per usare qui una metafora, così 'eterea' e da essa così distante e, se vogliamo far compiere il passo ulteriore alle acquisizioni cassireriane, a come possa sopravvivere un a priori sintetico relativizzato in cui sia eliminato il connotato apodittico. È questo un problema che ancora oggi emerge dalle discussioni sulla teoria kantiana della scienza (si vedano soprattutto [2], [7] e [8]) e sulle sue possibili interpretazioni in senso non solo storico ma anche teorico.

NOTE

¹ [3], p. 24.

² [4], p. 593.

³ [5], p. 65.

⁴ [4], p. 11.

⁵ [4], p. 16.

⁶ [1], p. 562

⁷ [1], p. 428.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Cassirer, E., *Sostanza e funzione. Sulla teoria della relatività di Einstein*, La Nuova Italia, Firenze, 1973.
- [2] Friedman, M., *Kant and the Exact Sciences*, Harvard University Press, Cambridge, 1992.
- [3] Hegel, G.W.F., *Fenomenologia dello spirito*, La Nuova Italia, Firenze, 1996.
- [4] Kant, I., *Critica della ragion pura*, UTET, Torino, 1986.
- [5] Kant, I., *Prolegomeni ad ogni futura metafisica*, Laterza, Roma-Bari, 1982.
- [6] Kant, I., *Principi metafisici della scienza della natura*, Bompiani, Milano, 2003.
- [7] Parrini, P. (a cura di), *Kant and Contemporary Epistemology*, Kluwer, Dordrecht, 1994.
- [8] Watkins, E. (a cura di), *Kant and the Sciences*, Oxford University Press, Oxford, 2001.

I FILOSOFI E LA SCIENZA: DA KANT AD EINSTEIN

PAOLO PARRINI

Dipartimento di Filosofia, Università di Firenze

Non vi è un completo accordo fra gli interpreti su quale debba essere considerato lo scopo fondamentale della *Critica della ragion pura*, se la formulazione di una teoria dell'esperienza scientifica oppure la fondazione della metafisica come scienza – secondo quanto recita il titolo di un'altra celebre opera kantiana, i *Prolegomeni ad ogni futura metafisica che vorrà presentarsi come scienza*. Come che sia, nessuno può dubitare del fatto che una parte cospicua dello sforzo speculativo di Kant si sia indirizzato ad una chiarificazione filosofica della possibilità di una scienza universale e necessaria della natura, e che egli abbia visto l'incarnazione di tale scienza soprattutto nella matematica e nella fisica galileiano-newtoniana del proprio tempo, analizzata nei dettagli in un altro suo importante scritto, *I primi principi metafisici della scienza della natura*. Per questo, molti hanno sostenuto che gli sviluppi scientifici successivi come la costruzione delle geometrie non euclidee, la discussione dei fondamenti della matematica e l'elaborazione della logica simbolica, ed infine l'imporsi di teorie come la fisica relativistica e la meccanica quantistica hanno messo in crisi l'epistemologia di Kant.

Nella prima metà del secolo scorso gli empiristi logici (Schlick, Reichenbach, Carnap, ecc.) hanno affermato che tali sviluppi comporterebbero la negazione della concezione kantiana dei giudizi sintetici a priori, ossia della concezione secondo cui si darebbero giudizi, come per esempio il principio di causalità o gli assiomi della geometria euclidea, che, pur essendo sintetici, ovvero capaci di darci informazioni intorno alla realtà, godrebbero nondimeno di una validità universale e necessaria. Gli empiristi logici hanno teso ad estendere all'intero dominio del sintetico a priori ciò che Einstein diceva dei giudizi matematici nella sua celebre conferenza del 1921, *Geometrie und Erfahrung*: «nella misura in cui le proposizioni matematiche si riferiscono alla realtà, esse non sono certe; e nella misura in cui esse sono certe, non si riferiscono alla realtà». Per loro i giudizi sintetici a priori di Kant sono in realtà o dei giudizi analitici (e allora sono certi, ma non dicono nulla sulla realtà), o dei giudizi sintetici a posteriori di natura assai generale (e allora sono informativi, ma non sono certi), oppure ancora delle regole del metodo che come tali non possono essere considerate né vere né false. In ogni caso, non sono principi che siano al tempo stesso provvisti di contenuto conoscitivo ed apoditticamente certi. Quanto al procedimento trascendentale con cui Kant pretendeva di fondare l'oggettiva validità universale e necessaria di tali giudizi, si tratterebbe di un metodo fallace basato su assunzioni insostenibili o comunque non dimostrabili.

Ripetutamente gli empiristi logici hanno fatto consistere il nucleo essenziale

dell'empirismo proprio nella tesi che il sintetico a priori non esiste, ed è appunto in forza del loro rifiuto della teoria kantiana dei giudizi sintetici a priori che essi si sono dichiarati empiristi. Questo non significa che abbiano negato in blocco l'epistemologia di Kant. Al contrario, i neoempiristi hanno detto più volte che non era loro intenzione spingere il rifiuto del sintetico a priori fino al punto di negare il ruolo della soggettività nella conoscenza scientifica, sebbene poi abbiano inteso tale ruolo in forme diverse, più o meno accentuate. In particolare, ad un certo punto essi sono giunti a sostenere che le componenti soggettive riguardano solo la forma linguistica e le regole metodologiche che presiedono alla formulazione e all'accettazione delle teorie scientifiche. In tal modo hanno finito per dare espressione ad una visione riduzionistica del rapporto teoria/esperienza secondo la quale tutta la nostra conoscenza del mondo è ricavata dall'esperienza e le trasformazioni dei dati empirici sono puramente tautologico-analitiche. In questo senso per gli empiristi logici, e in particolare per Reichenbach, è gravemente errato pensare che la teoria einsteiniana della relatività possa essere citata a sostegno di una concezione relativistica della verità. Al contrario, quando venga correttamente intesa, essa costituisce un argomento potente per ritenere che il relativismo vada riferito non alla verità in se stessa, ma alla pluralità di forme linguistiche empiricamente equivalenti mediante cui può venir formulata.

Una parte cospicua degli scienziati e degli epistemologi contemporanei non ha seguito gli empiristi logici in questa negazione del sintetico a priori, anche se spesso e volentieri le critiche rivolte ad essi nascevano da un serio fraintendimento delle loro posizioni. Einstein, per esempio, il quale inizialmente era stato molto vicino all'atteggiamento assunto dai neoempiristi contro Kant e il neokantismo di Cassirer, in seguito ha preso le distanze dalle versioni più riduzionistiche della loro epistemologia. Pur continuando a rifiutare gli «errori» di coloro che anche dopo Kant seguitavano a difendere il sintetico a priori nella sua versione originaria, egli ha più di una volta sottolineato la validità della tesi kantiana che non è possibile capire il dato empirico senza far uso di concetti e di principi assai generali ancorché non assolutamente validi e sempre empiricamente rivedibili (una tesi che, per la verità, gli empiristi logici non hanno mai contestato).

Sul versante epistemologico le cose sono ancora più complicate. Molti filosofi della scienza, sebbene rifiutino il sintetico a priori così come proposto da Kant, hanno nondimeno affermato che bisognerebbe distinguere tra il metodo che egli applica nell'esaminare la fisica del suo tempo e la teoria dei giudizi sintetici a priori. Quest'ultima non ha retto alla prova degli sviluppi scientifici successivi, ma il metodo impiegato da Kant conserverebbe la sua validità e potrebbe essere applicato con profitto alle teorie scientifiche elaborate dopo di lui. Anche nel caso di queste ultime, infatti, non sarebbe possibile comprendere il complesso rapporto che intrattengono con l'esperienza se non si distingue tra componenti sintetiche a posteriori in senso per così dire pieno e componenti sintetiche le quali, pur dipendendo dall'esperienza globalmente presa, non possono essere connesse, come le precedenti, a questa o quella esperienza specifica. Per

certi versi, tale idea era già stata intravista da Reichenbach in un'opera giovanile, [1]. In essa, infatti, pur rifiutando il sintetico a priori, egli riconosceva una certa validità ad altri aspetti della filosofia kantiana e sosteneva la necessità di distinguere, all'interno di una teoria, fra quelli che sono i principi di coordinazione (o di costituzione) e gli altri enunciati nomologici.

Scrive Reichenbach in una pagina particolarmente incisiva del libro citato:

Al contrario delle leggi singole, [i principî costitutivi] non dicono *cosa* viene conosciuto nel caso individuale, bensì *come* viene conosciuto; essi definiscono il conoscibile, dicono cosa significa la conoscenza secondo il suo senso logico. [...] E noi comprendiamo che le condizioni odierne della conoscenza non possono essere più le stesse del tempo di Kant: *giacché il concetto di conoscenza si è modificato ed il mutato oggetto della conoscenza fisica presuppone anche altre condizioni logiche*. Questo mutamento poteva avvenire solo in connessione con l'esperienza, e perciò anche i principî della conoscenza sono determinati attraverso l'esperienza. Ma la loro validità si fonda non soltanto sul giudizio di singole esperienze, bensì sulla possibilità dell'intero sistema della conoscenza: questo è il senso dell'a priori. Il fatto che possiamo descrivere la realtà per mezzo di relazioni metriche fra quattro coordinate è tanto certo quanto la validità della totalità della fisica; solo la forma specifica di queste regole è divenuta un problema della fisica empirica. Questo principio costituisce la base della concezione concettuale della realtà fisica. *Ogni* esperienza fisica compiuta finora ha confermato questo principio. Ma ciò non esclude che un giorno si presentino esperienze che costringano nuovamente ad un ampliamento continuo — allora la fisica dovrà cambiare un'altra volta il suo concetto di oggetto e proporre nuovi principî della conoscenza. A priori significa: *prima* della conoscenza, ma non: per ogni tempo, e neanche: indipendente dall'esperienza [1, p. 151 e segg.].

In tempi recenti si è tornati a riprendere concezioni simili a quelle di Reichenbach appena esposte – e paradossalmente lo si è fatto proprio in reazione a forme di empirismo radicale come quella di Quine che nega ogni legittimità alle distinzioni fra l'analitico e il sintetico e fra l'apriori e l'a posteriori. Da più versanti sono state avanzate teorie cosiddette 'funzionali' e 'relativizzate' dell'a priori. Ciò è avvenuto in modo più o meno forte. A parte coloro i quali, innestandosi nel filone del neokantismo marburghese e cassireriano, vorrebbero ancora qualificare come trascendentale l'indagine sui presupposti linguistici e teorico-concettuali del sapere scientifico, altri epistemologi, pur respingendo come troppo forte, e quindi insostenibile, ogni genere di rimando al trascendentale, ritengono che per dare conto in modo articolato del rapporto teoria/esperienza sia necessario distinguere tra enunciati propriamente empirici (o sintetici a posteriori) ed enunciati *relativamente* a priori, di tipo sia analitico sia sintetico. In questo modo si continua a rifiutare il sintetico a priori kantiano e le sue pretese fondazionalistico-trascententali, ma si riconosce una certa validità al modo in cui Kant aveva guardato alla scienza del suo tempo e ne aveva descritto la struttura.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Reichenbach H., *Relativitätstheorie und Erkenntnis apriori*, Springer, Berlino 1920;
trad. it., *Relatività e conoscenza a priori*, Laterza, Roma-Bari 1984.

SU L'ATTUALITÀ DELL'APRIORI KANTIANO

SILVESTRO MARCUCCI

Dipartimento di Filosofia, Università di Pisa

Nelle nostre osservazioni, per motivi di brevità, terremo presente solo la *Critica della ragion pura* e citeremo dalla seconda edizione, quella più nota, del 1787. Tanto si è detto e discusso sulla famosa tavola delle categorie dell'intelletto. Partiamo però da una affermazione, questa per la verità non molto nota, che Kant stesso fa a proposito della tavola delle categorie. A suo avviso, su di essa «si possono fare diverse considerazioni, che forse potrebbero avere importanti conseguenze rispetto alla forma scientifica di tutte le conoscenze razionali»¹.

Infatti, tre sono le «osservazioni» (*Betrachtungen*) che Kant fa a proposito dei quattro gruppi delle 12 categorie, divise secondo la quantità (unità, pluralità, totalità), la qualità (realtà, negazione, limitazione), la relazione (inerenza e sussistenza, causalità, reciprocità), la modalità (possibilità, esistenza, necessità). La prima di tali osservazioni, che ci interessa solo relativamente, riguarda la divisione delle categorie in due classi: la prima classe, costituita dalle categorie della quantità e della qualità, Kant la definisce «classe delle categorie matematiche», perché «è indirizzata agli oggetti della intuizione [sensibile]»; la seconda, che ha a che fare solo con oggetti già esistenti, egli la chiama «classe delle categorie dinamiche»². Ma sono soprattutto la seconda e la terza osservazione che hanno una rilevanza storica, teoretica e scientifica, che reputiamo estremamente utile evidenziare.

La «seconda osservazione» riguarda la terza categoria di ognuno dei quattro gruppi, e precisamente le categorie della *totalità*, della *limitazione*, della *reciprocità* e della *necessità*. Di esse Kant rivendica l'originalità – e questo è già un punto storicamente e teoreticamente importante –, quando afferma: «Non si pensi che la terza categoria si riduca a un semplice concetto derivato, e non sia un concetto primitivo dell'intelletto puro. Perché l'unione della prima colla seconda categoria, per poter produrre il terzo concetto, richiede uno speciale atto dell'intelletto, che non fa tutt'uno con quello che si è esercitato nel primo e nel secondo»³.

La triplicità di ogni «momento» nelle «quattro classi» della tavola delle categorie risulta così teoreticamente fondata; e tale suddivisione a *tre* di ogni classe, conseguenza anche di quella «sistematicità» di stampo wolffiano che era tipica del tempo, è importante e significativa per due diversi ordini di motivi, tra loro storicamente connessi. In primo luogo, perché si tratta di una innovazione di Kant che si contrappone alla tradizionale divisione a *due*, come appare dalle categorie matematiche e come si trova, per esempio,

in Leonhard Euler (1707-1783) allorché, in una delle sue *Lettere a una principessa tedesca*, distingue le proposizioni in *universali* e *particolari* dal punto di vista della *quantità* (Kant vi aggiunge anche le *singolari*) ed in *affermative* e *negative* dal punto di vista della *qualità* (Kant vi aggiunge le proposizioni *infinite*, le quali possono avere la formula $a = n-1$ o, meglio: $a = \infty-1$, di cui un esempio può essere: «questo abito è *non* bianco», proposizione che è diversa dalle due proposizioni, rispettivamente affermativa e negativa: «questo abito è bianco», «questo abito *non* è bianco»⁴. Per motivi forse non inutili di chiarezza, giova qui aggiungere una cosa molto nota, ma che ha sollevato problemi a non finire: la derivazione della tavola delle categorie dalla tavola dei giudizi⁵. Ma una cosa sicuramente meno nota è la fecondità gnoseologica del giudizio infinito (nell'esempio sopra citato, infiniti possono essere i colori dell'abito: meno uno, il bianco) centrato non tanto sull'«è», ma sul «non», cioè su una *negazione* non puramente logica, ma con un ampio spettro di applicazione.

A mio avviso, da qui nasce la dialettica da Hegel in poi, che fa centro non solo sull'affermazione, ma anche su una negazione non puramente logica, una negazione con ampio valore gnoseologico: in ultima analisi, una negazione *immersa* nella storia. Ecco perché, in secondo luogo, si spiega e si giustifica il profondo motivo per cui Hegel, pur tra tante critiche, loderà Kant per aver scoperto *per primo* la *triplicità*, per il filosofo di Stoccarda importante e fondamentale, nella classificazione dei giudizi, perché essa è propria del procedimento di tesi-antitesi-sintesi, che sta alla base, in generale, di ogni dialettica; anche se bisogna aggiungere che la prospettiva teoretica e storica di Hegel e dei posteriori filosofi «dialettici» è ben diversa e più ampia della suddetta «triplicità» kantiana, sicché è da condividere quanto scrive Luigi Scaravelli quando parla, a questo proposito, di «filiatura apparente». «È da notare – afferma infatti lo Scaravelli – che quando Hegel riprenderà questa triplicità (e loderà Kant d'averla scoperta, ma lo biasimerà d'averla lasciata infruttuosa), la triplicità diventerà nelle mani di Hegel una concezione che poco o nulla serba del carattere che aveva in Kant. (Si tratta dei soliti casi di ... filiatura apparente)»⁶.

Ma se a livello strettamente logico si può dubitare, sulla scia di Hegel, della fecondità della «triplicità» kantiana, senza negare però la sua importanza storica per essere stato Kant il primo ad averla scoperta, non altrettanto si può dire per la sua importanza scientifica ed epistemologica, se ci si sofferma ad esaminare, insieme a Kant, natura e sviluppi della categoria di reciprocità, a cui il filosofo di Königsberg dedica, in maniera specifica una intera «osservazione», la terza appunto; e questo perché – osserva Kant – «di una sola categoria, quella della *reciprocità* (*Gemeinschaft*), che si trova sotto il terzo titolo, la coincidenza con la forma del giudizio disgiuntivo [...] non salta così agli occhi come le altre»⁷. Intanto, che cosa si deve intendere per *Gemeinschaft*? «La *reciprocità* – scrive Kant – è la causalità (*Causalität*) di una sostanza in vicendevole determinazione con un'altra»⁸. Si ha a che fare – spiega ancora Kant – con un «concatenamento» (*Verknüpfung*) che «viene pensato in una *totalità di cose*, in cui una di esse, non è *subordinata*, come effetto, all'altra, quale causa della sua esistenza,

ma insieme anche e reciprocamente *coordinata* come causa rispetto alla determinazione delle altre (come in un corpo, le cui parti si attirano scambievolmente l'una con l'altra, e anche si contrastano); ed è questa una specie di unione affatto diversa da quella che si trova nel semplice rapporto di causa e di effetto (di principio e di conseguenza), dove la conseguenza non determina alla sua volta il principio, e perciò (come nel caso del creatore e del mondo) non forma con essa un tutto»⁹.

Questo brano è di una importanza eccezionale e ci dice molto di più di quanto appare ad una prima lettura. In primo luogo, a livello logico, c'è uno stretto rapporto tra il concetto di «totalità di cose» (*Ganze der Dinge*) e quello di «classe chiusa» di cui abbiamo precedentemente parlato (vedi nota 5), cioè di quella classe che contiene la *totalità* degli elementi che la compongono. Un esempio, questo, di come la «sistematica» non è sempre 'archeologia'! In secondo luogo, a livello teoretico, si affronta già qui il tema del rapporto «coordinazione-subordinazione», che sarà un tema centrale della *Critica del Giudizio*; e, più in particolare, il tema del rapporto «creatore-mondo», qui come esempio appena accennato, sarà un tema centrale delle ultime pagine della seconda parte dell'opera, la *Critica del Giudizio teleologico*. In terzo luogo, a livello epistemologico, l'esempio apportato da Kant di un corpo le cui parti si attirano o si respingono reciprocamente, ci anticipa quanto egli dirà più ampiamente in seguito, nella *Analitica dei principi*, a proposito della terza «Analogia dell'esperienza»: proposizione fondamentale (*Grundsatz*) derivata appunto dalla categoria della reciprocità, com'è il caso degli altri sette principi, anch'essi strettamente collegati alla tavola delle categorie.

Ma, infine, e questa è la cosa più importante da notare, non solo Kant stacca nettamente tra di loro causalità e reciprocità ma, a livello scientifico, pare dare maggiore importanza alla seconda rispetto alla prima, con due importanti conseguenze: con un distacco, su questo piano, dalla fisica newtoniana, tutta centrata sul principio di causa; con l'anticipazione – non sappiamo dire quanto cosciente – di una posizione che è tipica della scienza a noi contemporanea. Infatti oggi si considera come un fatto ormai acquisito che nella scienza, e più specificamente nella determinazione delle leggi scientifiche, non si tratta tanto o soltanto di stabilire, come ci prescrive il principio di causalità, un rapporto di inclusione tra classi più o meno chiuse di fenomeni, quanto invece di stabilire una relazione regolare, anche se non sempre rigorosamente necessaria, tra gli stessi fenomeni.

Questo hanno notato, prima di noi, studiosi competenti e attenti della problematica kantiana. Ci limitiamo a ricordare i giudizi di due studiosi, che sono stati stimati docenti di Filosofia teoretica (cattedra che, prima di loro, fu ricoperta da Giovanni Gentile e, in epoca più recente, anche da chi scrive) presso l'Università di Pisa. Diceva Luigi Scaravelli in una delle sue «Lezioni» sulla *Critica della ragion pura*, quando commentava la tavola dei giudizi:

Sebbene tutti i giudizi di questa tavola siano importanti alla pari, pure sarebbe opportuno richiamare l'attenzione su uno di essi: quello disgiuntivo: il quale poi dà luogo alla categoria della *reciprocità*, la quale a sua volta fonderà – nella

Analitica dei principi – il principio della reciprocità. Questo principio è *capitale per la costituzione e la possibilità stessa degli oggetti fisici e dei fenomeni scientifici* [il corsivo è mio] (due espressioni sinonime) ché, senza di esso, non esisterebbe nessun oggetto¹⁰.

E in un manoscritto pubblicato postumo, intitolato «Reciprocità», ha scritto quella che Kant stesso chiama «l'apologia di questo principio», ne ha a sua volta «tessuto l'elogio» ed ha, con bella frase, «incoronato la reciprocità regina e maga dell'esistenza»¹¹. A sua volta Francesco Barone, nel 1957, dopo aver rilevato che, modernamente, «il Kant del maturo criticismo pone accanto ai giudizi categorici, e irriducibili ad essi, i giudizi ipotetici e disgiuntivi»¹², osserva giustamente che tale «distinzione»

è anche alla base delle parti fondamentali dell'analitica dei principi (seconda e terza analogia dell'esperienza: principio di causalità e principio di azione reciproca) in cui vengono espressi rapporti che non rientrano nella schema soggetto-predicato, in quanto nella determinazione delle leggi scientifiche non si tratta di stabilire un rapporto di inclusione tra classi, bensì di fissare una relazione regolare tra fenomeni¹³.

Anche se il discorso di Barone parte da premesse di carattere logico mentre quello di Scaravelli è tutto rivolto a considerazioni di carattere fisico, tuttavia entrambi, con esplicito riferimento alla categoria della reciprocità, hanno evidenziato, di aspetti fondamentali dell'apriori kantiano, la loro apertura nei confronti della scienza contemporanea. E nel compiere tale meritoria opera hanno avuto un illustre precursore, a cui lo stesso Scaravelli si è richiamato¹⁴, in uno scienziato noto e famoso, che ha segnato tutta un'epoca, proprio quella a noi contemporanea. Intendiamo alludere a Albert Einstein; e ci soffermeremo ad esaminare soltanto quanto egli ebbe a dire in un incontro tra fisici e filosofi che, a buon diritto, può essere definito storico.

Tale incontro avvenne a Parigi presso la «Société française de philosophie» il 6 aprile 1922. Su invito del suo presidente Xavier Léon – fondatore della ancor oggi celebre «Revue de métaphysique et de morale» e convinto animatore degli incontri tra filosofi e scienziati – e del fisico Paul Langevin – scolaro di Poincaré, titolare della cattedra di fisica sperimentale ed uno dei più convinti sostenitori delle teorie einsteiniane – Einstein viene in Francia, a Parigi, e compie così anche un importante atto «politico», perché inaugura la ripresa di uno scambio culturale tra la Francia e la Germania, interrotto a causa degli eventi legati alla prima guerra mondiale. A tale «seduta», che è stata definita «feconda»¹⁵, parteciparono, oltre a Langevin, vari fisici e, tra i filosofi, Henri Berson, Émile Meyerson e Léon Brunschvicg.

Delle varie osservazioni di questi tre importanti filosofi francesi contemporanei e delle relative risposte di Einstein, ci siamo occupati in un precedente lavoro¹⁶. In questa sede, ci interessa soltanto quanto è stato detto su Kant e sul suo «apriorismo» e, più in particolare, sul concetto di «reciprocità».

È cosa nota che Brunschvicg, nelle sue più importanti opere¹⁷, ha posto una stretta relazione tra l'epistemologia kantiana e la teoria della relatività, pur non trascurando

di evidenziare i punti in cui Einstein «supera» lo stesso Kant. Anche nella «seduta» del 6 aprile 1922, egli afferma tra l'altro, in maniera fin troppo sintetica ma efficace: «la concezione kantiana ci gettava nelle *antinomie*, la concezione einsteiniana ce ne libera»¹⁸; ma, afferma infatti, in maniera sintetica ma chiara:

L'avvento della relatività segna sicuramente una rivoluzione [...], che la vediamo delinearci con il *relativismo kantiano* [...]. Già con Kant, il parallelismo delle idee e delle cose si cambia in connessione, in *reciprocità*; con il Signor Einstein questa connessione, questa *reciprocità* acquista una profondità insospettata, perché la relatività fa apparire più astratta l'espressione della realtà fisica, nello stesso momento in cui essa precisa il significato di puro strumento di lavoro, che appartiene al matematico¹⁹.

Su queste affermazioni, Einstein prende posizione e dà risposte interessanti e significative le quali, già su un piano generale, sono rivelative di una cautela storica e filosofica veramente rara, specie ai nostri tempi, in uno scienziato. Premesso che «ogni filosofo ha il suo proprio Kant», sicché le scarse indicazioni date da Brunschvicg non gli permettono di capire a fondo qual è la sua 'vera' interpretazione di Kant; premesso altresì che «per quanto mi riguarda, non credo che la mia teoria concordi in tutti i punti con il pensiero di Kant, *almeno come appare a me*»²⁰, egli dichiara in maniera significativa che «*ciò che mi sembra la cosa più importante nella filosofia di Kant è che, in essa, si parla di concetti a priori per costruire la scienza*»²¹. Premesso ancora che «si possono contrapporre due punti di vista: l'apriorismo di Kant, nel quale certi concetti preesistono nella nostra coscienza, ed il convenzionalismo di Poincaré»²², egli si dichiara tuttavia convinto che «questi due punti di vista si accordano su questo punto che la scienza ha bisogno, per essere costruita, di *concetti arbitrari*»²³, cioè non di concetti empirici, ricavati espressamente dall'esperienza sensibile. Ma conclude sconsolato: «Quanto a sapere se questi concetti sono dati *a priori* oppure se sono convenzioni arbitrarie, non posso dire niente»²⁴.

Queste due pagine di colloquio tra un filosofo e uno scienziato ci dicono molto di più di quanto appare a prima vista. Intanto ritorna in primo piano, sia pure situato in una cornice più ampia, quel concetto di «reciprocità» sul quale, non a caso, ci siamo ampiamente soffermati all'inizio del nostro discorso. Eppoi da parte dei nostri due autori si afferma – con prove *scientifiche* irrefutabili – l'*imprescindibilità dell'apriori* nella nostra conoscenza e nella scienza, sicché un discorso sull'apriori si rivela sempre, anche oggi, pienamente attuale. Ed è proprio quanto anche in tempi molto recenti, partendo da Kant ma andando altresì oltre (e talvolta contro) Kant, si è fatto soprattutto da parte di scienziati (ho presente l'esempio dell'etologo Konrad Lorenz) e di filosofi, primo tra tutti Karl Popper.

Ma sono specialmente due affermazioni di Einstein, quella iniziale «ognuno ha il suo proprio Kant» e quella finale, sul rapporto apriorismo-convenzionalismo «non posso dire niente», che ci sembrano interessanti e significative. La prima dimostra l'ampiezza e la fecondità di un pensiero, quello kantiano, che è ben lungi – come effettivamente lo

è – dall’essere pienamente esplorato. La seconda contiene un invito convinto e sincero alla cautela, a tener sempre presente, cioè, quel concetto di «limite» (*Grenze*), che è sempre stato al centro ed ha caratterizzato tutto quanto il pensiero kantiano.

NOTE

1 Cfr. [6], p. 98.

2 Cfr. [6], p. 99.

3 *Ibidem*.

4 Cfr. [5], Lettera 102, pp. 347-350. Per quanto riguarda la natura e l'importanza per l'intera problematica kantiana del giudizio infinito, e la ulteriore spiegazione delle suddette formule da me create, cfr [8], pp. 78-79.

5 Anche i giudizi sono divisi in *quattro* «titoli», costituiti anch'essi da *tre* «momenti». Secondo la «quantità», i giudizi sono universali («Tutti gli A sono B»), particolari («Alcuni A sono B»), singolari («Questo A è B»), da cui le categorie della quantità: totalità, pluralità, unità. Secondo la «qualità», i giudizi sono affermativi («A è B»), negativi («A non è B»), infiniti («A è non B»), da cui le categorie della qualità: realtà, negazione, limitazione (nell'esempio sopra citato: limitazione a qualcosa che però *si nega*). Secondo la «relazione», i giudizi sono categorici («C'è un A...»), ipotetici («Se A allora B»), disgiuntivi («A è o a o b...»: ma la classe, come pensa Kant, deve essere, come si dice oggi, chiusa, cioè contenere tutti gli elementi della stessa classe; l'esempio più semplice può essere: «Paolo o è vivo o è morto»); da cui le categorie della inerenza e sussistenza, della causalità e dipendenza (causa e effetto), della reciprocità (azione reciproca fra agente e paziente). Infine, per quanto riguarda la «modalità», i giudizi sono problematici (esempio: «può piovere»), assertori (esempio: «piove»), apodittici (esempio: «deve piovere»), da cui le categorie della possibilità-impossibilità, esistenza-inesistenza, necessità-contingenza. Ricavare tutto ciò, costò a Kant sforzo e fatica; era, però, il risultato del voler fare, sulla scia del 'maestro' Christian Wolff, filosofia alla maniera del tempo, allorché si identificavano i due termini filosofia e sistema, cosa che anche Kant teorizza e fa; si espose però a critiche varie e numerose, dall'Ottocento ai nostri giorni.

6 Cfr. [11], p. 222.

7 Cfr. [6], p. 99.

8 *Ibidem*.

9 Cfr. [6], p. 100.

10 Cfr. [11], p. 222.

11 Cfr. [12], p. 120.

12 Cfr. [1], p. 174.

13 *Ibidem*.

14 Cfr. soprattutto il *Saggio sulla categoria kantiana della realtà*, [10], poi ripubblicato da Mario Corsi nel secondo volume delle opere, seguendo il suggerimento dello stesso Scaravelli, col titolo *Kant e la fisica moderna*, in *Opere*, vol. II, cit., pp. 1-189.

15 Cfr. [9], p. 4.

16 Cfr. [7].

17 Cfr. [3] e [4].

18 Cfr. [2], p. 100.

19 Cfr. [2], p. 101.

20 *Ibidem*; il corsivo è mio.

21 *Ibidem*, pp. 101-102; il corsivo è mio.

22 *Ibidem*, p. 102.

23 *Ibidem*; il corsivo è mio.

24 *Ibidem*.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Barone F., *Logica formale e logica trascendentale*, vol. I, *Da Leibniz a Kant* [1957], II edizione, Edizioni di «Filosofia», Torino 1964.
- [2] Brunschvicg L., La théorie de la relativité, in *Bulletin de la Société française de philosophie*, Séance du 6 avril 1922, tome XXII, A. Colin, Paris 1922.
- [3] Brunschvicg L., *L'expérience humaine et la causalité physique*, F. Alcan, Paris 1922;
- [4] Brunschvicg L., *Les étapes de la philosophie mathématique*, F. Alcan, Paris 1929.
- [5] Eulero L., *Lettere a una principessa tedesca*, a cura di G. Cantelli, Boringhieri, Torino 1958.
- [6] Kant I., *Critica della ragion pura*, trad. it. a cura di G. Gentile e G. Lombardo-Radice, rivista da V. Mathieu, VIII edizione, Laterza, Roma-Bari 1995.
- [7] Marcucci S., «Tempo» e «relatività» nella filosofia francese contemporanea, M. Pacini Fazzi, Lucca 1996.
- [8] Marcucci S., *Guida alla lettura della "Critica della ragion pura" di Kant*, IV edizione, Laterza, Roma-Bari 2005.
- [9] PATY M., Einstein et la philosophie en France: à propos du séjour de 1922, *La Pensée*, 210, 1980, pp. 3-11.
- [10] Scaravelli L. *Saggio sulla categoria kantiana della realtà*, Sansoni, Firenze 1947.
- [11] Scaravelli L., *Lezioni sulla «Critica della ragion pura»*, in *Opere*, a cura di M. Corsi, vol. II, La Nuova Italia, Firenze 1968.
- [12] Scaravelli L., *L'Analitica trascendentale. Scritti inediti su Kant*, in *Opere*, cit., vol. III, La Nuova Italia, Firenze 1990; «Reciprocità», pp. 120-146.

LA FILOSOFIA DELLA SCIENZA IN ITALIA

PAOLO PARRINI

Dipartimento di Filosofia, Università di Firenze

Premessa

Mi soffermerò sullo sviluppo della filosofia della scienza in Italia a partire dagli ultimi anni dell'Ottocento fino ai nostri giorni. Cercherò di indicare i tratti essenziali di questo percorso e concluderò con alcune osservazioni riguardanti la situazione della disciplina in Italia e le sue prospettive future.

Nel complesso riprenderò in forma sintetica quanto ho cercato di mostrare in [7]. Scandirò così la presentazione secondo quelle che a me paiono le tre fasi principali attraversate dal pensiero epistemologico italiano nel periodo considerato, precisando fin da subito che se la suddivisione in tre periodi riesce abbastanza naturale, non altrettanto può dirsi per i contorni cronologici che li delimitano. Mentre per certi aspetti pare opportuno collocare il passaggio dalla prima fase alla seconda intorno alla metà degli anni Trenta, per altri sembra giustificato mantenere la demarcazione tradizionale legata ai grandi avvenimenti storico-politici venuti a compimento nell'anno della Liberazione, il 1945. Quanto al confine tra la seconda e la terza fase, per alcuni versi può risultare opportuno introdurre la divisione all'altezza dei primi anni Sessanta, per altri pare meglio posticiparla alla seconda metà degli anni Settanta. Siccome queste possibilità di scansioni cronologiche alternative sono strettamente collegate alla natura dei contenuti filosofici, le discuterò all'interno dei paragrafi dedicati alla seconda e alla terza fase, ossia, rispettivamente nel §2 e nel §3.

1. La prima fase

La prima fase va all'incirca dalla fine del secolo XIX alla prima metà degli anni Trenta (o alla prima metà degli anni Quaranta) del secolo XX. Essa è caratterizzata da due aspetti contrastanti che appartengono a momenti distinti. Nel primo decennio si ha una rigogliosa fioritura di studi logico-fondazionali e epistemologici condotti con uno stile di pensiero che è analogo a quello dei paesi all'avanguardia in tali campi d'indagine. Rientrano in questo periodo l'opera di Giuseppe Peano e di altri logici e matematici a lui più o meno vicini (Alessandro Padoa, Mario Pieri, Cesare Burali-Forti, ecc.), il pensiero di Giovanni Vailati e Mario Calderoni i quali elaborano in modo originale la prospettiva pragmatista muovendo proprio dalle acquisizioni logiche peaniane, e infine le prime impegnative opere (*Problemi della scienza*, Bologna, 1906; *Scienza e razionalismo*, ivi, 1912) del matematico Federigo Enriques (1871-1946). Nei decenni successivi sarà soprattutto quest'ultimo a mantenere in vita la tradizione della

‘filosofia scientifica’ pubblicando la rivista *Scientia*, aperta ad importanti collaborazioni internazionali, e confrontandosi criticamente con il pensiero epistemologico di altri pensatori statunitensi e europei, in particolare con quello degli esponenti dei Circoli di Vienna e di Berlino.

Nei due decenni successivi, dopo gli attacchi di Benedetto Croce, Giovanni Gentile e Guido De Ruggiero contro Enriques, accusato di diletterismo e incompetenza filosofica, si assiste, invece, all'emarginazione delle filosofie scientificamente orientate e alla progressiva affermazione di concezioni idealistiche e storicistiche – affermazione che, da un certo momento in poi, si accompagnerà all'instaurazione e al rafforzamento della dittatura fascista. Così, l'indagine epistemologica condotta in modo analitico e a stretto contatto con l'effettivo sapere scientifico viene soppiantata dalle discussioni sulla scienza come forma dello spirito e sui suoi rapporti con la religione e con la filosofia. È certo singolare che, in tempi recenti, si sia fatto leva proprio su simili discussioni per sostenere che l'idealismo sarebbe stato meno ostile alla scienza e a una riflessione su di essa di quanto comunemente si creda. Il punto essenziale, infatti, non è il riconoscimento dell'esistenza della ‘scienza’, ma il significato culturale e filosofico che le viene attribuito e il modo di indagarla. E in questa prospettiva pare difficile negare l'estraneità degli approcci idealistici e storicistici italiani al tipo di lavoro che veniva svolto a livello internazionale e che anche da noi figure benemerite quali Enriques, Vailati e Calderoni avevano cominciato ad intraprendere.

Oltre che dall'affermazione dell'idealismo, l'emarginazione delle filosofie d'ispirazione scientifica fu agevolata da vari altri fattori: la marcata diffidenza verso la filosofia da parte di Peano e di molti matematici a lui legati; la prematura scomparsa di Vailati (nel 1909, all'età di soli 46 anni); la scarsa propensione della stragrande maggioranza dei fisici italiani a dibattere gli aspetti filosofici della teoria einsteiniana della relatività e della meccanica quantistica; il fatto che tanti oppositori dell'idealismo, inizialmente orientati in senso positivistico, finirono per allontanarsi dalle posizioni di partenza per varie ragioni (non ultime quelle di pratica opportunità) e approdarono a forme di spiritualismo più o meno accentuate e/o religiosamente orientate; e, infine, il diffondersi pressoché incontrastato anche tra i non idealisti di un'interpretazione integralmente strumentalistica dell'analisi epistemologica della scienza condotta da scienziati e filosofi quali Mach e Poincaré.

Tutto questo concorre a spiegare perché, nell'Italia di quel periodo, diversamente che in Germania e in Austria, non si sia sviluppato un pensiero filosofico capace di arginare la cosiddetta ‘reazione idealistica’ contro la scienza. Non si deve credere, tuttavia, che anche in quegli anni non siano stati conseguiti risultati importanti e significativi. E ciò per quanto riguarda sia il filone epistemologico che fa capo ad Enriques, sia la linea di pensiero che si diparte dal pragmatismo logico di Vailati e che – come dirò – influenza profondamente il matematico Bruno de Finetti. Purtroppo, nella maggior parte dei contributi dedicati negli ultimi decenni a tali autori, anche in quelli che hanno mirato a una rivalutazione della loro opera, spesso non si è saputo dare un apprezzamento

dei risultati da essi conseguiti che fosse epistemologicamente all'altezza di questi stessi risultati. In realtà, il ritardo epistemologico che si è accumulato nel tempo ha fatto sentire il suo peso anche nei modi con cui la cultura filosofica italiana ha guardato alla propria stessa tradizione in tale campo.

Nel caso di Enriques, per esempio, è a lungo mancata la capacità di collocarne l'opera sullo sfondo dell'epistemologia internazionale. Non si è potuto cogliere, così, come egli non abbia avuto una visione pienamente corretta dell'empirismo logico e abbia dato una interpretazione davvero inadeguata del convenzionalismo di Poincaré. Tale interpretazione (proprio come avveniva nel caso di Croce) appiattiva il raffinato convenzionalismo dello studioso francese in una concezione economicistica e strumentalistica della scienza, ignorandone quegli aspetti che ne fanno, all'opposto, il tentativo di elaborare una nuova nozione di oggettività scientifica (cosa, invece, che verrà ben compresa tanto da Cassirer quanto dagli empiristi logici). Per le medesime ragioni non sono stati visti in tutta la loro importanza neppure gli aspetti di originalità del pensiero epistemologico enriquesiano: per esempio, la lettura che egli suggerisce della teoria einsteiniana della relatività, la concezione della logica e alcuni argomenti a difesa del realismo e del valore conoscitivo della scienza. Infatti, mentre Croce dà una valutazione *positiva* delle idee di Mach e di Poincaré – entrambe erroneamente interpretate come il riconoscimento del mero carattere pratico-economico dei concetti scientifici – Enriques commette, sì, lo stesso errore d'interpretazione, ma cerca di criticare quelle idee argomentando in favore di una concezione realistica della scienza e appoggiandosi a tal fine sull'aspetto storico-dinamico del pensiero scientifico.

Anche nel caso di Vailati si sono tentate molte rivalutazioni. Ma spesso queste buone intenzioni si sono scontrate con l'incapacità di individuare i suoi contributi effettivi, come per esempio la visione davvero assai acuta del rapporto teoria/esperienza. Infatti, la trattazione vailatiana dell'argomento, in saggi scritti talvolta in collaborazione con l'amico Mario Calderoni, fa ben apprezzare il contrasto che divide Poincaré e Duhem e ne enuclea le implicazioni su temi centrali come il valore conoscitivo della scienza, la nozione di analiticità o il criterio pragmatista di significato. Non per niente sia Vailati sia Calderoni, anticipando idee degli empiristi logici e di Quine, riescono a mostrare come l'olismo duhemiano (secondo il quale l'esperienza parla pro o contro il complesso delle nostre ipotesi e non pro o contro un'ipotesi singolarmente considerata) richieda un'interpretazione relativizzata dell'analiticità e metta a nudo alcuni aspetti problematici della concezione verificazionale del significato.

Inoltre, per lungo tempo non è stato visto il forte influsso che Vailati ha esercitato sullo sviluppo della teoria soggettivistica della probabilità (o 'probabilismo radicale') elaborata da Bruno de Finetti, il cui pensiero, in verità, attraversa tutte e tre le fasi da noi considerate perché si svolge in un arco di tempo che va dalla seconda metà degli anni Venti fino alla morte, avvenuta nel 1985. Oggi questa teoria è considerata una delle principali concezioni della probabilità e viene ampiamente dibattuta a livello internazionale. Essa costituisce uno splendido esempio di interazione fra filosofia e

scienza, fra i pochi realizzati in Italia. Infatti, per caratterizzare il concetto di probabilità de Finetti fa tesoro del pragmatismo logico vailatiano secondo il quale al significato di un concetto scientifico deve accompagnarsi una caratterizzazione operativa legata alle sue condizioni di applicabilità empirica.

Oggi, con un'attrezzatura epistemologica migliorata, si può apprezzare al meglio l'elevato livello qualitativo non solo delle teorie di Peano e delle posizioni definetiane, ma anche delle appena illustrate concezioni filosofiche di Vailati e di Calderoni. A molti anni di distanza dai primi tentativi di rivalutazione della loro opera avvenuti nel clima di rinnovamento culturale seguito alla Liberazione, a me continua a sembrare che siano proprio la maturità teorica e il respiro internazionale di questi autori a dover essere storicamente sottolineati, più che l'unilateralità o le manchevolezze di certe loro specifiche prospettive.

2. La seconda fase

La seconda fase va dalla prima metà degli anni Trenta (o dagli anni Quaranta) ai primi anni Sessanta (o alla seconda metà degli anni Settanta). Dirò qualcosa sulla conclusione di questa fase nel §3; qui mi soffermerò sull'inizio. Esso può essere collocato più indietro nel tempo se si assume quale discriminante il sorgere dei contatti fra la cultura filosofica italiana e le idee del movimento neopositivista. Risalgono infatti ai primi anni Trenta alcuni significativi scritti sui Circoli di Vienna e di Berlino apparsi sulla rivista *Scientia* e la prima opera di Ludovico Geymonat su *La nuova filosofia della natura in Germania*, [5]. La fase deve partire invece dalla prima metà degli anni Quaranta se si preferisce collegare il rinnovamento filosofico italiano alla caduta del fascismo, alla fine della guerra e alla Liberazione. In tal caso si prenderà come data emblematica quel 1945 con cui sempre Geymonat volle far apparire il suo libro *Studi per un nuovo razionalismo*, uscito per i tipi dell'editore Chiantore di Torino.

In questa seconda fase c'è il tentativo di creare le condizioni perché anche in Italia sia possibile tornare a coltivare studi di filosofia scientifica. Sono soprattutto pensatori quali Ludovico Geymonat e Giulio Preti a prodigarsi in tale direzione. Nel generale clima 'neo-illuministico', che ha il suo centro nel cosiddetto 'esistenzialismo positivo' di Nicola Abbagnano e che impronta una parte cospicua della filosofia italiana nella seconda metà degli anni Quaranta e per buona parte degli anni Cinquanta, si assiste a una ripresa delle indagini epistemologiche con la pubblicazione di nuove riviste (*Analisi*, *Sigma*, *Methodos*) e con il costituirsi di gruppi di ricerca composti da scienziati e filosofi come il Centro di studi metodologici di Torino.

Un tratto caratteristico dell'opera di Geymonat e di Preti, il quale nel 1957 pubblicherà l'opera filosofica forse più significativa di questa stagione culturale (*Praxis ed empirismo*, [10]), è la fusione fra due propositi diversi: far conoscere gli aspetti di maggior rilievo delle filosofie europee e statunitensi di indirizzo analitico, scientifico e logicizzante ed elaborare prospettive personali. Non credo si possa far leva su tale aspetto del pensiero dei due autori (soprattutto di Preti) per muovere loro accuse di

superficialità e/o di eclettismo. Credo anzi – al contrario – che un’analisi teoricamente avveduta dei loro scritti trovi anche in questo aspetto elementi di vitalità e di originalità. Resta tuttavia il fatto che la sovrapposizione dei due propositi anzidetti influisce talvolta sul lavoro di ‘importazione’, in quanto l’intenzione di informare, accompagnandosi ad un intento critico più o meno accentuato, non di rado provoca ‘forzature’ interpretative o veri e propri fraintendimenti. Ma al di là di queste limitazioni, a Geymonat e a Preti va riconosciuto il merito di essersi impegnati a fondo per il rinnovamento della nostra cultura filosofica e per reimpostarne i rapporti con la scienza recuperando il valore culturale in senso pieno del sapere scientifico.

I loro sforzi, però, non furono coronati dal successo che meritavano. Le ragioni sono varie. L’empirismo logico che essi avevano introdotto non ricevette, in quegli anni, sufficiente considerazione e il debito approfondimento. Le tesi fondamentali del movimento vennero osteggiate da più parti. Non solo dalla cultura filosofica cattolica, per lo più comprensibilmente ostile alla sua critica radicale della metafisica, ma anche dalla cultura filosofica laica, dominata dalle correnti storicistico-umanistiche più o meno vicine al marxismo e condizionata dalla scarsa attitudine alla teoresi di buona parte della propria storiografia, ad un tempo vogliosa e incapace di confrontarsi con le questioni concettuali che il neoempirismo poneva. Inoltre, i caposaldi teorici del movimento vennero spesso e volentieri fraintesi, come avveniva in modo emblematico nella diffusa e assai fortunata monografia di Francesco Barone, *Il neopositivismo logico*, [3].

L’empirismo logico fu così accusato di antiumanesimo, di essere l’espressione arida e reazionaria del capitalismo avanzato, di spazzare via la filosofia con la metafisica, di esprimere una concezione ingenuamente empiristica che non attribuiva il debito peso al ruolo della soggettività nella conoscenza scientifica. Più in generale, contro di esso si sollevò l’umanesimo retorico e genericamente storicistico prevalente nel mondo culturale italiano, compreso quello legato a un certo particolare modo di coltivare gli studi storico-filosofici. Perché una caratteristica importante di quegli anni fu il tentativo congiunto di liberarsi dell’ingombrante eredità del recente passato crociano e gentiliano e di evitare alcuni aspetti ‘dilettanteschi’ del nostro modo di praticare l’indagine teorico-filosofica ‘rifugiandosi’ nella storia della filosofia e ponendo l’accento più sulla storia che sulla filosofia. Si trascurò in tal modo che difficilmente tale tuffo nella storia avrebbe potuto costituire il rimedio migliore all’effettiva, cronica carenza di spessore teorico di una parte assai cospicua della tradizione filosofica italiana. Ed infatti alla fine è risultato chiaro che una simile scelta, oltre a non favorire lo svecchiamento e il rinnovamento ‘vero’ della nostra mentalità dominante, non ha giovato neppure agli studi storico-filosofici i quali spesso hanno perduto la capacità di trattare in modo adeguato gli aspetti più concettuali e teorici delle filosofie del passato. Non per niente in tempi recenti alcuni responsabili di importanti riviste dal glorioso passato hanno cautamente cominciato a guardare con occhi critici al tipo di ‘filosofia’ da loro stessi promosso, privilegiato e ‘protetto’ per svariati decenni (vedi [6]).

Tuttavia l’effetto forse più grave del modo nostrano di recepire il neopositivismo

è stato l'ostacolo frapposto ad un'assimilazione profonda e diffusa della lezione epistemologica del movimento, un'assimilazione capace di coglierne tutta la ricchezza e complessità. Proprio a ciò possono essere ricondotti, a mio parere, alcuni degli aspetti più deboli della cultura filosofica italiana sia negli anni Cinquanta e Sessanta, sia negli anni che giungono fino a noi, nei quali continuano a comparire, accanto a trattazioni di buon livello, opere di assai discutibile valore scientifico. Penso, per esempio, alla facilità con cui a un certo punto si sono vantate delle anticipazioni italiane della 'nuova filosofia della scienza' solo perché, in maniera banalmente conforme alla nostra tradizione storicistica, era stato posto l'accento su una considerazione dinamica oltre che statica delle teorie scientifiche (senza per altro ricavare da ciò risultati epistemologici di un qualche livello); alla recezione acritica del popperismo prima e della 'nuova filosofia della scienza' poi, una recezione che avrebbe potuto essere ben più avvertita se fosse stata preceduta da una migliore assimilazione di quella concezione neopositivistica di cui i nuovi epistemologi si erano, non a caso, abbondantemente nutriti; alla disinvoltura con cui qualche autorevole studioso, forte solo delle più orecchiabili enunciazioni popperiane, si è improvvisato storico dei rapporti tra scienza e filosofia nel Novecento; e infine a tutto il gran parlare che si è fatto, e per certi versi si continua a fare, di metafisica influente, di crisi della ragione, di paradigmi indiziari, di abduzione e di perdita dell'oggettività senza che ci sia un'adeguata consapevolezza delle complesse categorie epistemologiche chiamate in gioco. Ancora oggi capita di leggere – ed anche in sedi che si autoqualificano autorevoli – discussioni su scienza e magia, su scienza e filosofia o su scienza e anti-scienza nelle quali è difficile avvertire la presenza di una cultura epistemologica all'altezza dei temi e dei tempi.

3. La terza fase

La terza fase è quella che ci riguarda direttamente e va all'incirca dai primi anni Sessanta, quando compaiono le prime trattazioni istituzionali di logica e di filosofia della scienza, fino ai giorni nostri. In questo arco di tempo si è cercato di raccogliere i frutti dell'opera di svecchiamento e di aggiornamento promossa da studiosi quali Preti e Geymonat nella seconda fase, e ci si è impegnati in un tipo di lavoro che, almeno nelle intenzioni, potesse reggere il confronto con le ricerche dei paesi con più robuste e affermate tradizioni di tipo 'analitico'. La produzione di tale periodo presenta così dei tratti peculiari, di somiglianza e di differenza, rispetto alla produzione del periodo precedente. Ma per comprendere questi tratti è necessario tener conto di ciò che nel frattempo era avvenuto fuori d'Italia.

Allorché da noi discipline come la logica, l'epistemologia e la filosofia del linguaggio erano assenti o rimanevano ai margini della scena, e cioè all'incirca fra il 1910 e il 1940, all'estero, invece, esse avevano attraversato un momento di grande sviluppo a cui si era accompagnata l'affermazione delle maggiori correnti di filosofia analitica, in modo particolare dell'empirismo logico e dell'analisi del linguaggio comune. Nel quindicennio successivo, grosso modo dal '40 al '55, tali correnti vanno incontro

ad una sorta di dissoluzione, ma questa dissoluzione non significa affatto una crisi dell'approccio analitico. Anzi, la vitalità di esso è così forte e marcata che in breve tempo il raggio della sua applicazione si allarga. Nel volgere di alcuni anni accanto alla filosofia della scienza e alla filosofia del linguaggio assumono una consistenza autonoma ambiti disciplinari come la filosofia della conoscenza, la filosofia della mente, l'ontologia e la bioetica. E proprio in virtù del trattamento analitico delle diverse tematiche, in ognuno di tali ambiti, sia pure secondo un percorso più o meno lento e accidentato, viene a consolidarsi un complesso di conoscenze istituzionali o quasi-istituzionali le quali, nel caso dell'epistemologia, sono massicciamente tributarie al lavoro svolto dagli empiristi logici.

Nell'Italia del secondo dopoguerra, come è naturale, non si riesce subito a tenere il passo con gli sviluppi internazionali. Per tutti gli anni Quaranta, Cinquanta e Sessanta si osserva non di rado, anche nel caso di filosofi e studiosi più competenti, una qualche discrasia tra il loro trattamento di questa o quell'idea logica o epistemologica e lo stile e la strumentazione con cui analoghe questioni vengono affrontate all'estero. A un certo punto, però, comincia ad affermarsi anche da noi una maggiore 'professionalità' la quale, tuttavia, non è raggiunta da tutte le discipline nello stesso momento. Per ragioni strettamente connesse alla natura dei vari campi di studio, tale 'professionalità' si diffonde dapprima (intorno agli anni Sessanta) nel campo della logica e solo in seguito (all'incirca intorno agli anni Settanta) attraverso un processo più lento e difficoltoso si estende alla filosofia della scienza, alla filosofia del linguaggio e alla filosofia analitica. Ecco perché l'inizio della terza fase può essere collocato negli anni Sessanta o negli anni Settanta a seconda che si prenda come parametro la situazione della Logica matematica o la situazione della Filosofia della Scienza, della Filosofia del linguaggio e della Filosofia analitica in generale.

Tanto nel campo della logica (un campo che tornerà a trovare la sua dignità istituzionale soprattutto per merito di Ettore Casari), quanto in quelli della filosofia della fisica, della filosofia della scienza e della filosofia della conoscenza, negli ultimi decenni si è avuta anche in Italia una progressiva diffusione a livello accademico delle relative discipline e sono apparsi numerosi lavori in cui si discutono le principali problematiche affrontate a livello internazionale. Dopo le prime trattazioni epistemologiche più o meno istituzionali di studiosi quali Alberto Pasquinelli (in particolare, [9]) ed Evandro Agazzi (in particolare, [1]), e dopo alcuni lavori dedicati agli aspetti logico-formali delle teorie fisiche dovuti soprattutto a Maria Luisa Dalla Chiara in collaborazione con Giuliano Toraldo di Francia (in particolare, [4]), il dibattito epistemologico degli anni successivi ha toccato il problema della conoscenza scientifica in tutti i suoi molteplici aspetti.

Accantonato dagli stessi allievi il tentativo geymonatiano di costruire una filosofia della scienza improntata al materialismo dialettico, la discussione si è concentrata fondamentalmente sui temi dell'oggettività e della razionalità della scienza secondo l'impostazione degli empiristi logici, di Popper (introdotto in Italia soprattutto da Dario

Antiseri con la monografia [2]) e dei cosiddetti 'nuovi filosofi della scienza' (Norwood Russell Hanson, Thomas S. Kuhn e Paul K. Feyerabend). Oltre a chi scrive (in particolare, [8]) sono intervenuti nell'ampio dibattito noti epistemologi italiani come, per esempio, Marcello Pera (che in svariate opere ha portato avanti l'insegnamento del suo maestro Francesco Barone), Rosaria Egidi, Marco Mondadori (prematuramente scomparso nel 1999). Nell'impossibilità di dare conto in modo dettagliato di ciò che attualmente si sta facendo in Italia in questo campo, mi limiterò ad una valutazione complessiva.

Come ho detto alla fine del paragrafo precedente parlando del rapporto fra l'empirismo logico e la nostra cultura filosofica, permangono a tutt'oggi aspetti scarsamente soddisfacenti dovuti a fattori di varia natura. Alcuni sono legati alla struttura e al funzionamento delle istituzioni italiane, da quelle scolastiche a quelle universitarie o parauniversitarie nelle loro differenti articolazioni. Altri sono dovuti ad un modo nel complesso attardato di concepire la vita scientifica, un modo che tuttora non si è emancipato da un modello culturale umanistico-retorico e storicistico in senso lato che guarda con sospetto e sfiducia all'elaborazione teorica, almeno in quei molti casi in cui tale elaborazione non si limita alla logica formale. Nel complesso, tuttavia, anche in Italia ci si trova oggi di fronte ad una ricerca epistemologica viva e vitale. Essa produce ancora risultati di valore e rilevanza disuguali, ma nell'insieme può legittimamente aspirare ad entrare nel circuito internazionale e spesso vi è entrata a pieno titolo. In alcuni casi, infatti, si sono prodotte opere che anziché muoversi al carro di ciò che veniva fatto all'estero, hanno anticipato concezioni teoriche e prospettive storiografiche che solo in seguito si sono imposte a livello internazionale. Inoltre, dal diffondersi degli studi epistemologici e di filosofia analitica è scaturito un significativo mutamento di sensibilità che ha condotto, tra l'altro, a un certo ridimensionamento del valore culturale tradizionalmente attribuito agli studi storico-filosofici. Il che sta producendo degli effetti secondo me assai benefici pure sul livello e sulla qualità della nostra attività storiografica. Piano piano, anche sul piano filosofico stiamo avviandoci a divenire un paese 'normale'.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Agazzi E., *Temi e problemi di filosofia della fisica*, Manfredi, Milano 1969; 2^a ed., Abete, Roma 1974.
- [2] Antiseri D., *Karl R. Popper. Epistemologia e società aperta*, Armando, Roma 1972.
- [3] Barone F., *Il neopositivismo logico*, Edizioni di Filosofia, Torino 1953; 2^a ed. riveduta, ampliata e aggiornate, Laterza, Roma-Bari 1977; 3^a ed. con aggiunte, ivi, 1986.
- [4] Dalla Chiara M. L., Toraldo di Francia G., *Le teorie fisiche. Un'analisi formale*, Boringhieri, Torino 1981.
- [5] Geymonat L., *La nuova filosofia della natura in Germania*, Bocca, Torino 1934.
- [6] Mori M., "Rivista di filosofia", in *Segni e comprensione, Dossier sulle riviste italiane di filosofia*, 18 n. 52, Maggio-Agosto 2004: pp. 25-32
- [7] Parrini P., *Filosofia e scienza nell'Italia del Novecento. Figure, correnti, battaglie*, Guerini e Associati, Milano, 2004.
- [8] Parrini P., *Conoscenza e realtà. Saggio di filosofia positiva*, Laterza, Roma-Bari, 1995; ed. inglese rivista, Kluwer, Dordrecht 1998.
- [9] Pasquinelli A., *Nuovi principi di epistemologia*, Feltrinelli, Milano 1964.
- [10] Preti G., *Praxis ed empirismo*, Einaudi, Torino 1957.

LA CULTURA FILOSOFICA ITALIANA E LA SCIENZA

ALESSANDRO PAGNINI

Dipartimento di Filosofia, Università di Firenze

1. Premessa

È un tema ‘caldo’ quello del sottosviluppo scientifico dell’Italia. Recentemente Luciano Gallino, [8], ha parlato dell’Italia come di un paese avviato verso il «nanismo produttivo» (ormai caduta dal 26° al 46° posto per la competitività e dal 31° al 50° per il livello tecnologico), e il fisico Carlo Bernardini, [4], ha messo in evidenza la «denutrizione scientifica» del nostro popolo. Le ragioni di questo sono ovviamente soprattutto politiche, di gestione e allocazione delle risorse, di leggi finanziarie, di priorità date secondo modelli di sviluppo che un certo governo politico ha fatto propri (Enrico Bellone è prodigo di dati a dir poco allarmanti sulla politica italiana per la ricerca scientifica nel suo libro su *La scienza negata*, [2]). Ma qui ci interroghiamo su un aspetto di questo deficit scientifico italiano che, pur essendo non sufficiente a spiegarne le ragioni profonde, ritengo sia molto indicativo e informativo. Certo, bisognerebbe capire cosa viene prima; se una carenza di alfabetizzazione scientifica per ragioni sociali, economiche e politiche che si riflette nella cultura, o seppure, in qualche misura, si tratta di un movimento dall’alto verso il basso, dai contenuti e dalle forme del sapere verso il senso comune, l’immagine pubblica della scienza, i modelli e gli standard cui la gente (ma anche la classe politica e dirigente) si conforma per formulare e risolvere i problemi quotidiani e di amministrazione della cosa pubblica. È un dilemma di non facile soluzione.

Conforta che in Italia ci sia un fresco interesse sociologico per questi problemi; e, a proposito, segnalo il bel libro di Paola Borgna sulle *Immagini pubbliche della scienza*, [5], che ha il pregio di affrontare il tema con un’attenzione comparativa a paesi come l’Inghilterra e gli Stati Uniti (dove l’alfabetizzazione scientifica è ben maggiore) e dunque di fornire elementi che, nel confronto, possono orientare la valutazione. Di fatto, comunque, c’è la endemica carenza di coscienza scientifica in Italia; che talvolta dà anche esiti grotteschi. Recentemente è stato un umanista, il linguista Tullio De Mauro, [7], a lamentare l’accezione restrittiva che si dà spesso in Italia del concetto di «cultura», indicando come esemplare il volume curato da Alberto Asor Rosa su *La cultura* nella *Storia d’Italia* Einaudi; dove, dice De Mauro,

si parla di cultura al singolare, dal 1870 al 1976, ed è inutile cercare qualsiasi nome che non sia di scrittore, poeta, romanziere, critico letterario, storico della letteratura, saggista di varia umanità. E non c’è traccia del fatto che siano esistiti

in questo paese non solo singoli studiosi, ma scuole e tradizioni di discipline naturalistiche, fisiche, matematiche. La cultura è – in questa accezione – [solo] conoscenza delle belle lettere. [7] p. 4.

Perché questo? Le ragioni sono tante e complesse. Ma qui intendo mostrare che una buona parte di responsabilità ce l'ha la nostra cultura filosofica.

Tratterò dunque del *carattere* della filosofia italiana e dei suoi rapporti con la scienza in generale; con tutte le cautele richieste da una trattazione del genere, che necessariamente astrae e semplifica. Va comunque detto che parlare del carattere della filosofia italiana non è fare un esercizio accademico e soltanto interpretativo; è bensì richiamare un aspetto che ha occupato, per ragioni soprattutto storico-politiche, una buona parte della filosofia italiana dal Settecento a oggi, e in particolare dall'Unità a oggi (da quando l'Italia si è costituita in nazione ed è diventata, per dirla col poeta, «una d'arme, di lingua e d'altare»). È cioè richiamare un qualcosa che ha avuto un valore *identitario*, e conseguentemente *normativo* e *programmatico* nella nostra cultura; e significa anche individuare alcune delle fonti che si riveleranno più duraturamente influenti e più rilevanti nella pratica, e anche nella istituzionalizzazione, della nostra filosofia.

2. L'antiscientismo filosofico da Vico al postmoderno

Isaiah Berlin – può essere istruttivo il punto di vista di un intellettuale che osserva la cultura italiana ma non appartiene ad essa – ha parlato in *Against the Current*, di un “divorzio” tra la scienza e la cultura umanistica che, in Italia, ha avuto in Giambattista Vico forse il suo più influente teorizzatore. Berlin ci dice persuasivamente che «prima del Settecento non vi era [...] alcuna percezione di tale contrapposizione», [3] p. 162. Vico fu «per inclinazione un umanista religioso con una ricca immaginazione storica», [3] p. 138, non simpatetico «con il grande movimento materialista e scientifico che era deciso a spazzar via gli ultimi resti della metafisica scolastica» (*ibidem*). Nel 1709, nella prolusione con cui i docenti inauguravano l'anno accademico a Napoli, Vico pronunciò un'accorata difesa dell'educazione umanistica, in cui celebrava la ricchezza della tradizione «retorica» italiana, «contro lo stile austero dei modernisti francesi, razionalisti e influenzati dalla scienza», [3] p. 139.

Vico fu anticartesiano e svalutò la matematica che non vide mai come un sistema di leggi che governano la realtà, bensì come un sistema di regole che non descrivono alcunché e nei cui termini è semplicemente utile procedere a generalizzazioni, analisi e previsioni riguardo al comportamento delle cose nello spazio. Egli fu anche il propugnatore, sulla scia di sant'Agostino, dell'idea che si possa conoscere pienamente solo ciò che si è fatto (*verum factum est*). Nel mondo della natura c'è qualcosa di opaco, di cui noi non possiamo sapere il *perché*, che è solo conoscibile da Dio (l'artefice, colui che l'ha *fatto*):

Gli uomini possono conoscere 'dall'interno' solamente ciò che hanno fatto essi stessi, e nient'altro. Quanto maggiore è, in un qualsivoglia oggetto di

conoscenza, la componente fatta dall'uomo, tanto più trasparente essa riuscirà all'occhio umano; quanto maggiore la parte della natura esterna, tanto più opaca e impenetrabile essa sarà per l'umano intelletto. Ciò che è fatto dall'uomo e ciò che è natura – ciò che è costruito e ciò che è dato – sono divisi da un abisso invalicabile. [3], p. 141.

Vico dirà che *la storia* è l'oggetto che l'uomo può conoscere meglio, per la buona ragione che è lui a farla.

Esiste dunque un senso in cui sappiamo di noi stessi più di quanto sappiamo del mondo esterno [...]. Esiste [...] un senso preciso in cui la nostra conoscenza del comportamento intenzionale – ossia dell'azione – è superiore, perlomeno qualitativamente, alla nostra conoscenza del movimento o della posizione dei corpi nello spazio – la sfera degli splendidi trionfi della scienza secentesca. Ciò che ci riesce opaco quando contempliamo il mondo esterno diventa, se non perfettamente trasparente, almeno molto meno oscuro quando contempliamo noi stessi. L'applicazione delle regole e delle leggi della fisica o delle altre scienze naturali al mondo della mente, della volontà e del sentimento costituisce dunque una forma perversa di autodanneggiamento, perché comportandoci in questo modo ci precludiamo senza motivo la conoscenza di molte cose che potremmo sapere. [3], pp. 142-43.

Rinunciando all'ideale di una scienza unificata, tipicamente propugnato dagli illuministi, Vico si fa fautore di una conoscenza che ha l'uomo come osservatore 'privilegiato'; una conoscenza «per consapevolezza diretta»; una conoscenza che si acquisisce con la *memoria*, non con l'analogia o l'inferenza di cause (Vico esalta una facoltà che chiama «fantasia», una sorta di comprensione immaginativa) e insieme anche con la capacità di immedesimazione, di «mettersi nei panni degli altri», [3] p. 158, partendo dal presupposto che non esiste una struttura immutabile dell'esperienza, [3] p. 159, che ogni cultura e ogni popolo segue delle regole, dei principi, dei valori che noi dobbiamo interpretare attraverso la loro lingua, i loro riti e i loro miti, prendendo sul serio le loro espressioni metaforiche, facendoci guidare dal loro linguaggio, anche il più immaginifico, nei meandri della loro visione del mondo e della loro forma di vita. La filologia e l'indagine empirica in generale devono essere asserviti allo scopo della *comprensione*, devono affinare la nostra capacità di entrare nelle 'altre menti' del passato.

Le conclusioni epistemologiche di tutto ciò sono (1) un radicale *relativismo*, (2) un altrettanto radicale *separatismo* (quello che alla fine dell'Ottocento prenderà la forma di una divisione incolmabile tra «scienze della natura» e «scienze dello spirito»), (3) un sotteso *strumentalismo* nel momento in cui si parla dei successi della scienza (Berlin nota opportunamente che «l'idea della crescita cumulativa del sapere, di un corpus unitario governato da criteri universali, talché ciò che una generazione di scienziati ha stabilito un'altra generazione non avrà bisogno di ripetere, è del tutto incompatibile con questo schema. Ciò segna la grande frattura tra la nozione di conoscenza positiva e quella di comprensione» [3] p. 155, e infine (4) un discredito dell'*analisi* e della 'conoscenza'

matematica, a dispetto di un propugnato ontologismo di tipo platonico e pitagorico.

Dopo Vico ci saranno, da una parte, Marx o Condorcet a mettere al centro la storia, ma nello spirito illuminista, più impersonale e insieme meta-storico, o di filosofia della storia, e alla fine più scientifico nell'intenzione; dall'altra, Croce, e prima di lui Coleridge o Carlyle, propugnatori di una storia di ciò in cui gli uomini credono e di cui vivono, una storia della vita dello spirito, contro le aberrazioni degli utilitaristi e dei positivisti.

Lo specifico e l'unico di contro all'iterativo e all'universale – scrive Berlin -, il concreto di contro all'astratto, il movimento perpetuo di contro alla quiete, l'interno di contro all'esterno, la qualità di contro alla quantità, ciò che è culturalmente condizionato di contro ai principii atemporali, la lotta mentale e l'autotrasformazione come una condizione permanente dell'uomo di contro alla possibilità (e desiderabilità) della pace, dell'ordine, di un'armonia finale e della soddisfazione di tutti i desideri umani razionali. [3], pp. 161-62.

In una parola, storia come *auto-conoscenza* contrapposta a storia come *scienza*; e dunque una storia mai pienamente organizzata, che, secondo il monito di Vico, si raggiunge solo a prezzo di un «terribile sforzo».

Berlin considera Vico un grande. Vico gli appare l'inventore di un nuovo campo della conoscenza che comprende l'antropologia sociale, gli studi storici comparati di filologia, linguistica, etnologia, giurisprudenza, letteratura, mitologia. Ma considera anche del tutto evidente l'avversione di Vico alla scienza naturale e la sua ignoranza dei maggiori progressi scientifici del suo tempo.

Ebbene: la filosofia di Vico, variamente ripresa e interpretata nel corso dei secoli, è divenuta il punto di riferimento nel momento in cui la filosofia italiana ha cercato una identità e insieme lo 'spirito tutelare' di una tradizione autoctona, da far nostra con orgoglio, da rivendicare per l'originalità e per una supremazia morale e ideale che la eleva al di sopra delle tradizioni filosofiche straniere. Per più di cento anni, incredibile a dirsi, l'occupazione principale della filosofia italiana è stata quella di chiosare alcuni testi di Vico e di trovare, addirittura anche con gli strumenti dell'archeologia, elementi che avvalorassero la tesi del primato – morale, culturale e cronologico – della filosofia italiana, che trovava in lui il massimo interprete.

Non sto a tediarvi con i miti di una cultura italiana, appartenuta forse ai pelasgi, forse agli etruschi, che viene prima di quella greca e ne è a fondamento (rimando chi fosse curioso di questo tema a *L'antica sapienza italica*, di Paolo Casini [6]). Vi dico solo quali sono gli aspetti apprezzati di questa radicata «sapienza» italica: che è *pitagorica* (anzi, Pitagora è 'italiano', e impara a Crotona quello che poi gli servirà per la sua filosofia), è *eclettica* (scriveva Vincenzo Cuoco, un filosofo fieramente vichiano, che nella filosofia italiana si hanno «l'unione e la coordinazione ragionata dei principii dell'Empirismo o Sensismo, del Razionalismo o Idealismo»), è *superiore* (è noto il motto di Benedetto Croce secondo cui «problemi nati altrove trovano la loro soluzione in Italia»), è profondamente morale e civica; è *politica*, nel senso che Vico mutuava da Cicerone;

soprattutto trova nei padri della Chiesa e nella religiosità cattolica il compimento e insieme la garanzia del suo primato. Non si può dimenticare che Vincenzo Gioberti, il maggiore filosofo italiano dell'Ottocento, caldeggiava una federazione dei vari Stati della penisola sotto la guida del Papa, e che comunque, anche se fallì il suo progetto, elaborò esemplarmente un pensiero in cui storia, politica, filosofia e religione erano intimamente connesse.

Le filosofie post-unitarie mantennero ferma la preoccupazione di trovare un'identità alla filosofia italiana. Più o meno tutti parlavano di «nazionalità» nella filosofia, e vedevano necessario ancorarla a una tradizione consolidata. Quando si smise di speculare sugli etruschi-pelasgi e su un mitologico Pitagora italiano, ci si preoccupò ugualmente di riconoscere una identità e di nuovo un primato alla filosofia italiana. Bertrando Spaventa, il più influente dei neoidealisti italiani prima di Croce, sosteneva che la filosofia moderna, iniziata in Italia e sviluppatasi poi negli altri paesi europei, ritorna nel nostro paese nel secolo XIX. Il problema che veniva ora affrontato, posto in precedenza da Vico, era quello di trovare «una nuova metafisica, che fosse il fondamento della nuova scienza, cioè della scienza dello spirito». Ovviamente era la filosofia «alemannica», quella hegeliana, ad assumere una centralità come referente immediato; ma l'antecedente «italiano» veniva ora ritrovato nel pensiero del Rinascimento.

E neppure i positivisti rinunciarono a questa genealogia. Essi erano sperimentalisti e difendevano un certo empirismo e un certo primato dei *fatti*. Ma lo stesso Roberto Ardigò, il più influente tra i filosofi positivisti italiani dell'Ottocento, quando parlava di senso e esperimento, richiamava Pomponazzi, Leonardo, Telesio, Bruno, Galileo, più che Mill o Comte: «Il positivismo di oggi – scriveva – è figlio di quello italiano del [Rinascimento]. E massimamente di quello di Galileo. Perché da lui veramente cominciano quelle scienze naturali, che coi loro progressi hanno dato l'esempio alla filosofia e l'hanno richiamata sulla via delle ricerche utili; ed è stato lui il primo scopritore della relatività delle idee» (da sottolineare il termine «utili» e l'accenno curioso e consenziente al «relativismo»).

È istruttivo e importante soffermarsi un attimo su cosa è stato il positivismo in Italia alla fine dell'Ottocento. Esso è stato soprattutto un movimento *ideologico* prima e più ancora che filosofico. Un'ideologia di stampo materialista, antispiritualista e anticlericale, con coloriture socialisteggianti; strumento di propaganda politica, sia dei liberali al potere che cullavano l'idea che fosse la scienza a governare gli stati, sia dei socialisti anticlericali e avversi alla metafisica spiritualista; e fu ideologicamente funzionale a gruppi sociali produttivi emergenti durante quella che è stata chiamata la «prima rivoluzione industriale» italiana. Esso è servito alla apertura verso la fisiologia tedesca, il cellulismo e il darwinismo, per esempio; è servito a una crescita a livello europeo della scienza biomedica italiana; ma assai poco alla fisica-matematica. E non è un caso che le discipline che beneficiano della nuova aria materialistica che si respira nell'Italia postunitaria siano la medicina, la biologia, la psicologia, la sociologia, la pedagogia – strana disciplina che trova in Italia un alimento e una importanza uniche

nel mondo occidentale – e assai poco la fisica.

Il positivismo italiano risulterà soprattutto un progetto di «incivilimento», portatore di un ingenuo progressismo e povero di elaborazioni teoriche. A parte poche eccezioni, la filosofia della scienza positivista in Italia è un pasticcio dove, accanto a qualche timido confronto con il neokantismo e il pragmatismo (Vailati) e a qualche riferimento – in genere poco ortodosso – a Mach, troviamo commistioni ambigue con la *Naturphilosophie* e con la scienza romantica. Spesso vi troviamo anche un *odium antiphilosophicum* che lo stesso psicologo-psichiatra positivista Morselli, direttore della *Rivista di filosofia scientifica*, avverte e depreca come una vera «camicia di forza della mentalità scientifica». Alla filosofia viene lasciato solo il compito di unificare, di non far disperdere e disgregare i saperi scientifici. Non c'è da stupirsi se nel breve giro di pochi anni riprende il sopravvento la tradizione filosofica italiana, quella che, con le parole di un altro spiritualista dell'epoca, «da Pitagora a S. Tomaso, e da questi al Vico e al Rosmini» aveva rifiutato il materialismo come un corpo estraneo (per i riferimenti e gli autori qui menzionati, cfr. [9]).

Dopo il positivismo e dopo quella che enfaticamente, quanto impropriamente, è stata definita «la bancarotta della scienza», viene in Italia un lungo periodo di dominio pressoché incontrastato (e favorito anche dal regime politico fascista) di filosofie idealiste ispirate a Hegel e al grande pensiero tedesco dell'Ottocento, fino a Dilthey. Croce sarà il filosofo con cui per più di mezzo secolo si dovranno fare i conti. È istruttivo sapere qual era la concezione crociana della scienza: le scienze sono considerate come un insieme di pseudoconcetti, empirici (quelli delle scienze naturali, rappresentativi, ma senza universalità) o astratti (quelli matematici, universali, ma vuoti di rappresentazioni) che non hanno carattere conoscitivo (non hanno cioè i caratteri del vero concetto: che sono l'espressività, l'universalità, la concretezza) ma hanno un carattere pratico, sono cioè strumenti, ausili per l'operare dell'uomo. Croce dice che gli «uomini di scienza [...] sono l'incarnazione della barbarie mentale, proveniente dalla sostituzione degli schemi ai concetti, dei mucchietti di notizie all'organismo filosofico-storico». La vera conoscenza costituisce il presupposto degli pseudoconcetti, si ha nella percezione individuale del reale, che fa riferimento al processo storico reale. Nel lungo dominio della tradizione idealistica italiana viene operata una divisione radicale tra scienza e filosofia. La scienza non ha nulla da dire alla filosofia, e del pari neanche la filosofia ha qualcosa da dire alla scienza. Sono due regimi diversi, che finiscono per essere contrapposti. Figuriamoci poi pensare all'idea di una «filosofia scientifica»!

Emblematico fu, nel 1911, l'acuirsi di una controversia tra il matematico Federigo Enriques e Benedetto Croce sul valore culturale della scienza e proprio sulla possibilità di una «filosofia scientifica» – controversia in cui non mancarono dei fraintendimenti di fondo sulla materia contesa (l'interpretazione che i due davano della filosofia di Poincaré, per esempio, era da ambo le parti scorretta, come ha fatto ben vedere il nostro Parrini [10]). Croce sconfisse Enriques sostenendo che solo le menti universali o profonde potevano davvero accedere alla cultura – ovvero, alla filosofia e alla storia – e

che, invece, gli «ingegni minuti» si dovevano accontentare d'interessarsi all'aritmetica o alla botanica. Fu Croce poi a dire che «le scienze naturali e le discipline matematiche, di buona grazia hanno ceduto alla filosofia il privilegio della verità, ed esse rassegnatamente, o addirittura sorridendo, confessano che i loro concetti sono concetti di comodo e di pratica utilità, che non hanno niente da vedere con la meditazione del vero». Come chiosa oggi spiritosamente Enrico Bellone, per gli scienziati c'è ben poco da 'sorridere'!

Con Giovanni Gentile – che oltre a essere il filosofo accademico più eminente è anche Ministro della Pubblica Istruzione durante il fascismo e lega il suo nome, nel '23, a una riforma della scuola di cui avvertiamo ancor oggi gli effetti – continua a pesare l'influenza del Rinascimento e continua a esser viva l'idea che, anche se hegelianamente la filosofia è universale e internazionale, in essa è riscontrabile sempre «un carattere nazionale». Uno degli effetti indelebili della sua riforma è l'appartenenza della filosofia alle Facoltà di Lettere, dunque la sua sanzione come disciplina umanistica; l'insegnamento della filosofia attraverso la *storia* della filosofia; l'abbinamento di storia e filosofia nell'insegnamento delle scuole medie superiori (la legge sanciva, ovviamente, anche la superiorità degli studi umanistici sulla ricerca scientifica).

E cosa accade dopo la seconda guerra mondiale, in epoca di reazione antispiritualistica e antimetafisica, di apertura alle filosofie straniere, e di relativa egemonia della cultura marxista in Italia? Ludovico Geymonat, la prima cattedra di filosofia della scienza nel nostro paese, è stato l'uomo che più di altri, con Giulio Preti, ha inteso svecchiare la cultura italiana per metterla al passo con la cultura scientifica e filosofico-scientifica europea, l'uomo che ha fatto conoscere in Italia l'empirismo logico. Egli è stato anche un marxista. E, guarda caso, ha finito per contrapporre la tradizione che passa attraverso Galileo e Cattaneo (il maggiore filosofo illuminista italiano) a quella più ortodossamente marxista che rimarcava la continuità Vico-Spaventa-Labriola-Croce-Gramsci, sostenendo la tesi di una mirabile e piena coincidenza fra la grande tradizione umanistica e storicistica della cultura italiana e la nostra grande tradizione scientifica. Ed è curioso e significativo vedere, infine, cosa scriveva del neoempirismo Francesco Barone, autore di un ampio lavoro sulla storia della filosofia scientifica del Novecento (e in fondo, un 'simpatizzante' della filosofia scientifica). Barone scriveva che «l'atteggiamento neopositivistico mutila l'organismo della cultura, impedisce la comprensione di molte sue manifestazioni, che non sono riducibili a scienza e mentre aspira all'avvento di un'epoca luminosa da cui scompaiono i fantasmi della tradizione, pare invece preludere all'avvento di un barbarico antiumanesimo», [1], p. 584. Ancora una volta la contrapposizione tra una cultura umanistica – la cultura dei valori, dell'impegno 'politico' e civile, dell'appartenenza storica – e una cultura scientifica che anche soltanto come 'atteggiamento', come *forma mentis*, è impossibilitata a una vera comprensione della realtà e del suo senso.

L'Italia ha conosciuto la Controriforma senza avere la Riforma. Per ragioni politico-sociali ha avuto una industrializzazione ritardata, con perduranti sacche di feudalesimo

e cultura contadina, cui è conseguita una secolarizzazione difficile, rallentata dalla presenza (ahinoi!) del Vaticano nella penisola. La filosofia italiana ha sofferto della lacerazione civile tra cattolici e laici (per lo più comunisti), sentendo l'urgenza di essere filosofia militante, «organica» a qualche classe sociale o a qualche Chiesa, e sentendo la pressione di dover elaborare *ideologie*. Essa ha avuto, forse per tutte queste ragioni, un rapporto disincantato con la *verità*, facendo spesso prevalere lo spirito 'gesuita' secondo cui vale più una bugia opportuna che una verità scomoda, e prediligendo ora il culto umanistico dell'*auctoritas* (l'etimologia latina è da *auctor*, autore, e significa che la verità si trova nei testi dei grandi autori del passato e non altrove) ora il perseguimento di un *consensus gentium* contingente e sostanzialmente agnostico. L'Italia non ha mai visto davvero vincente una cultura scientifica; e ha sempre sentito il peso di scelte lontane, quelle che l'hanno portata a costruirsi una tradizione inalienabile che dall'umanesimo, attraverso Vico, ha portato al neoidealismo e oggi al predominante spirito «postmoderno»; un postmoderno che, diversamente da altre culture europee (come la francese, per esempio), si è affermato senza aver mai visto una vera e propria affermazione precedente del «moderno».

Dunque, le filosofie che tenessero in conto la scienza o che vedessero, illuministicamente, nella scienza una sorta di «ideale regolativo» per la ricerca e il metodo, hanno dovuto sempre soccombere, in Italia, a filosofie via via egemoni tutte caratterizzate da una qualche forma di dispregio o di subordinazione del sapere scientifico; filosofie tutte profondamente *storicistiche* (dallo storicismo hegeliano, variamente declinato dai neoidealisti italiani e dai marxisti, alla «storicità» degli odierni proseliti di Heidegger e di Gadamer), fondamentalmente *anti-illuministiche* (proprio nel senso che abbiamo visto espresso nel pensiero di Vico) e *anti-naturalistiche* (ancora vichianamente convinte che il regno della storia e dell'umano imponga una conoscenza *sui generis* e certo non acquisibile con gli strumenti e i metodi delle scienze naturali). E quando la storia ci racconta di filosofie 'scientifiche' che, seppur subalterne, cercano di imporsi nella nostra cultura, è quasi esclusivamente una storia di *importazioni*, spesso tardive e corrotte dall'esigenza di sposarne i contenuti a istanze di diversa provenienza. Anche quando erano chiamate a giocare un ruolo di rottura con la tradizione, e forse proprio per questo, le filosofie scientifiche importate non potevano fare a meno di misurarsi con le conseguenze che potevano avere sulla metafisica, sui valori umani o anche sulla fede o sulla prassi. In genere, ad analisi rigorose e particolari, si sono preferite elucubrazioni astratte sulla scienza come forma dello spirito e sui suoi rapporti con la religione e con la filosofia.

Per questo, uno dei caratteri che la filosofia italiana che presta una privilegiata attenzione alla scienza condivide con il resto della filosofia, ma esasperandolo, è l'*eclettismo* (la citazione da Cuoco riportata sopra è anticipatrice di una tendenza che sarà prevalente nella filosofia italiana): i tanti e a volte estenuanti tentativi di conciliazione tra empirismo e pragmatismo, tra esistenzialismo e neopositivismo, tra fenomenologia, trascendentalismo e neoempirismo, tra materialismo dialettico e

nuova filosofia della scienza. Tutti intesi a sposare un'indagine logico-empirica, di per sé considerata insufficiente, con una visione globale della cultura, della vita, dell'uomo. È anche una storia di scarsa *professionalità*: con qualche eccezione, come per esempio quella di una eccellente scuola di logici italiani, rare sono, per esempio, le figure di filosofi della scienza con una formazione matematica e scientifica. Ma del resto è stata tutta la filosofia italiana a non tenere in gran conto la professionalità, giacché i suoi tre conclamati *eroi* – Vico, Croce e Gramsci – non erano filosofi di professione. Dobbiamo anche aggiungere che i rapporti tra filosofia e scienza non sono stati certo agevolati dalla parte scientifica; un po' per la scarsa attitudine degli scienziati italiani – a partire dai grandi, da Fermi a Marconi – a dibattere problemi epistemologici e fondazionali, un po' per una forma di revanscismo 'scientista' che, in questi ultimi anni, ha fatto sì che scienziati di chiara fama (ma con preparazione filosofica dilettaistica) pontificassero e sentenziassero su temi di gnoseologia, etica e filosofia della mente con scarso rispetto per la specificità dei problemi filosofici e con una deplorabile acritica assunzione di una forma rozza di naturalismo (tutto quello che c'è da spiegare lo spiega la scienza, il resto son chiacchiere).

3. Quello che insegna il caso della filosofia della scienza in Italia

A conferma di certe tendenze e di certi caratteri fondamentali della nostra cultura filosofica, vi è anche il modo in cui, sia pur tardivamente, si è imposta in Italia la filosofia della scienza. Le istanze *storicistiche*, insieme a quelle etico-politiche, hanno finito per prevalere nella maggior parte dei nostri filosofi della scienza, e sono avvertibili anche nelle 'fortune' delle correnti filosofico-scientifiche e epistemologiche importate.

Tra queste, hanno avuto una maggiore diffusione il popperismo (oltre a Popper, Lakatos, la cui filosofia, non a caso, è stata giudicata da un ironico filosofo inglese un'audace mistura di ingredienti mutuati da Kuhn, Popper e Quine conditi con un pizzico di Hegel e Marx in salsa ungherese); l'epistemologia storica francese, da Duhem a Bachelard a Foucault a Michel Serres (quest'ultimo oggi in gran voga perché propone un'antropologia *storica* delle scienze, secondo lui dettata dagli sviluppi delle scienze stesse, al posto di una epistemologia che è «chiosa esteriore», nel migliore dei casi «ridondante e inutile» delle teorie scientifiche); la filosofia della scienza 'post-kuhniana', proprio perché *storicista* e poco tecnica; tutte le teorie che promettano di dar conto delle fasi *rivoluzionarie* del pensiero e degli stati *complessi* (una strana fascinazione, forse dovuta a un quasi ossessivo bisogno di 'fare i conti' con la *dialettica* da parte di una cospicua fetta della filosofia italiana, hanno esercitato sui nostri epistemologi la teoria delle catastrofi, la teoria del caos, olismi vari, e infine le teorie del premio Nobel Ilya Prigogine, di cui si è salutata con grande favore anche la *nouvelle alliance* tra scienza e lettere: una forma di riduzionismo rovesciato, con al centro l'antropologia e l'etica, che si propone come una sorta di «reincantamento della natura»); tutte le filosofie che non liquidino il *soggetto* e che non siano troppo *empiristiche* (non c'è mai stato un *empirismo* italiano in epoca moderna – sull'empirismo ha sempre pesato il

tono liquidatorio del primo capitolo della *Fenomenologia dello spirito* di Hegel, e oggi pesa la sentenza di Derrida che, presa alla lettera, ci dice che l'empirismo non potrà mai aspirare a essere filosofia); tutti gli atteggiamenti fondamentalmente *strumentalisti* e *nominalisti* nei confronti della scienza, accompagnati da una tale maldisposizione verso tutte le posizioni che sapevano di *realismo*, che la nostra filosofia ha stentato a cogliere il senso *oggettivistico* di influenti versioni del *convenzionalismo* (come, per esempio, quello di Poincaré, frainteso da Croce e anche da Enriques), e di molti aspetti del kantismo. Da rilevare che anche i frequenti dibattiti sul *materialismo* nel secondo dopoguerra, soprattutto da parte dei marxisti italiani (con le rare eccezioni di un Geymonat, per esempio, o di un Timpanaro), sono stati pesantemente condizionati da una svalutazione della conoscenza e della razionalità scientifiche, com'era tipico della tradizione neoidealista e antipositivista che proseguiva in forme più o meno mascherate nel corso del Novecento; così come di impronta profondamente antinaturalistica sono state le 'aperture' (tardive) della nostra filosofia a discipline come la psicoanalisi e le scienze umane in genere.

Restano anche del tutto peculiari alla nostra cultura, e al suo carattere endemico, le modalità di incontro da parte della nostra filosofia con aree scientifiche e con problemi filosofico-scientifici tradizionalmente negletti. Se oggi è crescente l'attenzione per la filosofia della scienza, per la filosofia analitica e in genere per la filosofia angloamericana (tradizionalmente vicina alla scienza), la loro 'scoperta', prima di assumere aspetti in positivo, è passata curiosamente quasi sempre attraverso un rigetto: si scopre la filosofia della scienza, o almeno le si dedica un'attenzione maggiore rispetto al passato, quando una conclamata 'rivoluzione' ne decreta il superamento (e non a caso, come suggerivo sopra, in termini «storicistici»); si scopre la filosofia analitica perché Rorty proclama la sua fine e ne dissolve i resti in un calderone ermeneutico dove ritroviamo, accanto a Wittgenstein e Dewey, anche Heidegger e, guarda caso, Hegel; si pesca nell'arsenale della logica e della metodologia e si scoprono gli usi miracolosi dell'abduzione prima ancora di essersi preoccupati di sapere che cos'è l'induzione, ma certi che dell'induzione (dopo Popper e dopo un Peirce letto *ad hoc*) se ne può fare a meno; e naturalmente si affrontano i problemi, sempre più urgenti, della bioetica isolando frequentemente l'interesse *etico* (con tutto il peso delle ideologie che spesso comporta) da quello *cognitivo* (sembra che un'attenzione epistemologica alle problematiche dell'errore, della causalità, delle 'logiche' della scoperta e della giustificazione in medicina – un'attenzione in qualche caso anticipata dalla nostra importante tradizione medico-positivistica tra fine Ottocento e inizi Novecento – sia però più da parte di medici che non di filosofi di professione).

Mi rendo conto di aver presentato le cose della nostra cultura filosofica in maniera a volte tendenziosa, non priva di iperboli e provocazioni, sicuramente iniqua nei confronti dei tanti intellettuali (e dei pochi politici) che hanno lottato nelle istituzioni, nei concorsi universitari, con il loro insegnamento, per adeguare la didattica delle discipline filosofiche e scientifiche, e in generale una 'mentalità' scientifica, alle medie

dei paesi a sviluppo più avanzato. Vorrei anche fosse chiaro che non ho istituito, 'processando' come ho fatto la nostra tradizione culturale, una gerarchia di valori tra le filosofie, e che non è mia intenzione di scrivere l'indice di un «libro nero» della filosofia contemporanea. Se oggi, in Italia, restano 'quantitativamente' preponderanti filosofie di ispirazione ermeneutica o neoidealistica o storicistica, non vorrei aver dato l'impressione di irridere ad esse, di considerare con sussiego coloro che le frequentano, o di sostenere che un Vico o un Gadamer non abbiano niente da dire sulla *conoscenza* del mondo e di noi stessi.

Ho voluto solo additare i rischi impliciti (rischi, ovviamente, per una corretta e adeguata diffusione di una cultura scientifica e di una filosofia ad essa sensibile) che quelle filosofie, se sposate acriticamente, comportano. Perché per lo più alimentano una certa accezione soggettiva, retorica, eroica della filosofia; perché sono più 'serie' che 'rigorose' (come avrebbe riconosciuto Heidegger, ma intendendo che la serietà fosse il valore); perché sono sempre un po' a disagio nelle costrizioni della logica e dell'argomentazione corretta; perché troppo spesso hanno di mira un rinnovamento radicale dei dizionari e un sovvertimento di assiologie consolidate, incuranti, anzi compiaciute, se nella sovversione si travolgono anche la conoscenza scientifica e la logica stessa; perché in genere hanno della conoscenza filosofica una considerazione prioritaria che scredita, fino a negare, un valore di 'conoscenza' alla scienza; perché spesso rifiutano che la scienza possa essere un oggetto 'nobile' d'indagine filosofica, se non nella maniera *storica e culturale* che indicavo sopra, e perché soprattutto negano a priori che possa costituire per il pensare filosofico un parametro metodologico e un'ideale di comunicazione: Heidegger, dalla fine degli anni Venti del Novecento, è colui che più fermamente ha insegnato a combattere qualsiasi contaminazione tra scienza e filosofia, fino a dire, nell'*Einleitung in die Philosophie*, e a far risuonare nell'opera di tanti proseliti, che «il concetto di una filosofia scientifica è un non-concetto». Su questi temi, e con considerazioni generali che condivido in pieno, cfr. anche Peruzzi [11], e, indispensabilmente, Parrini [10].

Negli ultimi vent'anni e più si può constatare una tendenza a superare l'*impasse* provocata dal peso di una tradizione filosofica italiana che è stata troppo a lungo egemonica e troppo univoca (anche nelle sue 'rivoluzioni' interne, dallo spiritualismo al marxismo, dal neoidealismo al postmoderno) nella sua emarginazione della scienza e dei problemi della conoscenza in generale. L'auspicio è che questa tendenza, aiutata dai sempre più frequenti rapporti istituzionali tra le Università italiane e quelle straniere, si traduca presto in una forma di reale e non pregiudiziale confronto tra filosofia e scienze. Confronto, sia chiaro, tutto da impostare e da discutere, senza formule prescrittive che ne configurino previamente l'esito; ma in ogni caso un confronto cui la storia che ho sommariamente raccontato spero possa conferire un maggior grado di autoconsapevolezza.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Barone, F., *Il neopositivismo logico*, Laterza, Roma-Bari 1986.
- [2] Bellone, E., *La scienza negata*, Codice, Torino 2005.
- [3] Berlin, I., *Against the Current*, Edinburgh Univ. Press, Edinburgo 1955 (trad. it. Adelphi, Milano 2000)
- [4] Bernardini, C. e De Mauro, T., *Contare e raccontare*, Roma-Bari, Laterza 2003.
- [5] Borgna, P., *Immagini pubbliche della scienza*, Comunità, Torino 2001.
- [6] Casini, P., *L'antica sapienza italica*, Il Mulino, Bologna 1998.
- [7] De Mauro T., *La cultura degli italiani*, Laterza, Roma-Bari 2004.
- [8] Gallino, L., *La scomparsa dell'Italia industriale*, Einaudi, Torino 2003.
- [9] Micheli, G., Scienza e filosofia da Vico a oggi, in *Storia d'Italia. Annali 3*, a cura di Gianni Micheli, Einaudi, Torino 1980.
- [10] Parrini, P., *Filosofia e scienza nell'Italia del Novecento*, Guerini, Milano 2004.
- [11] Peruzzi, A., *Commiato dal Commiato*, <http://xoomer.virgilio.it/flamusa/fas01.htm>, 1998.

PER UNA FONDAZIONE ETICA DELLA BIOLOGIA:**RIFLESSIONI STORICO-FILOSOFICHE***

STEFANO MINIATI

Dipartimento di Filosofia, Università di Pisa

La scienza attuale, dopo uno sviluppo plurisecolare, a partire dalla «rivoluzione scientifica» del XVII secolo, è solidamente divenuta un evento cruciale della vita degli uomini. Non riguarda soltanto una ristretta cerchia di persone con ben determinate capacità di meditazione, di ricerca e di analisi: essa, almeno nella gran parte dei suoi risultati, se non nelle sue procedure – che rimangono estremamente specialistiche e in definitiva inaccessibili a chi sia profano della disciplina – è assurta a oggetto di pubblico interesse e di pubblica discussione e costituisce ormai un fattore decisivo della vita sul pianeta. Questo nuovo ruolo della scienza si è reso necessario principalmente a causa del suo stretto intreccio con la tecnica, ossia con la scienza applicata – intreccio che, in particolar modo nelle scienze biologiche, è divenuto pressoché inestricabile. Infatti, come si mostrerà, poiché la scienza *serve* all'uomo, si lega sia con l'idea di *progresso* sia con quella, correlata, di *utilità necessaria*.

Per spiegare questo legame e questa evoluzione del sapere scientifico, mi sembra opportuno fare alcune considerazioni storiche: la visione di scienza che oggi è dominante non è sempre esistita e forse si può ragionevolmente pensare a un suo differente sviluppo futuro che sappia anche guardare al proprio passato e farne tesoro. In particolare nel seguito cercherò di mostrare che agli esordi la scienza moderna presentava un atteggiamento verso il suo oggetto, ovvero la natura, di carattere notevolmente diverso da quello odierno. Di necessità tratterò qui soltanto alcune linee che considero essenziali per questa breve esposizione, senza alcuna pretesa di esaustività. Esse servono soltanto per mostrare che taluni grandi ed essenziali protagonisti della «rivoluzione scientifica» manifestavano verso il mondo naturale uno spirito di attenzione e prudenza che oggi sembra venuto meno; questo mutamento di posizioni non pare essere funzione solo dell'aumento di conoscenze avvenuto nel frattempo – aumento che avrebbe fatto svanire antichi timori – ma è probabile che inerisca alla cosa stessa, ovvero allo *status* epistemologico del sapere scientifico e in particolare del sapere biologico. Prenderò poi le mosse da questa descrizione per fare un breve quadro della scienza contemporanea, affrontando infine il quesito del suo sviluppo possibile ed auspicabile alla luce della considerazione storica e mostrando che il compito della scienza del futuro riguarda non soltanto gli scienziati, ma l'intera umanità.

1. La conoscibilità della natura ed il rapporto con Dio: alcune considerazioni storiche

Il pensiero, di matrice positivista, secondo cui non esiste alcun procedere innanzi dell'umanità (come civiltà, come evoluzione della specie uomo) senza l'apporto della scienza capace di dominare il mondo ovvero la natura,¹ era qualcosa, in questi termini, di assolutamente sconosciuto non solo al complesso del mondo antico, ma perfino a tutti gli «eroi» della scienza moderna, da Galileo a Newton.² Per essi la natura, in sé, era qualcosa sì di indagabile, scritta con simboli matematici e geometrici,³ ma in fondo misteriosa, che rimandava, in ultimo, alla perfezione del Creatore, di cui per molti aspetti mostrava la magnificenza.⁴

1.1. La filosofia meccanicistica di Cartesio

Secondo Martin Heidegger l'idea di una natura sezionabile all'infinito, indagabile microscopicamente è relativamente recente, e trova probabilmente le sue radici più profonde nel meccanicismo cartesiano, nella separazione tra *res cogitans* e *res extensa*, con la determinazione di quest'ultima come pura materia, esprimibile con concetti puramente quantitativi, mossa da leggi semplicemente meccaniche.⁵

È sicuramente vero che per Descartes la natura è ciò che di fatto si dà, è *toto coelo* differente (ontologicamente differente) dallo spirito: essa non ha in sé alcun fine, ma aspetta semplicemente che l'uomo gliene fornisca uno. Il rapporto tra essa e una componente 'immateriale' che pure sembrava doversi postulare dato il grado di complessità dell'ente – se non sotto forma di 'spirito' almeno sotto forma di 'forza' – fu del tutto trascurato da Descartes, il quale non poteva fornire alcun credito ad idee che non fossero «chiare e distinte», ovvero, da un punto di vista fisico-biologico, meccanicistiche. Egli conosceva soltanto «impulsi» trasmessi alla materia attraverso il contatto, per cui il suo unico problema era quello di stabilire l'origine della quantità di moto iniziale trasmessa al cosmo, e per questo rimandava alla saggezza del Creatore, che, avendo solo il ruolo di dare «il calcio iniziale al mondo», veniva relegato ai confini del mondo fisico.

E tuttavia proprio questa concezione univoca ed omogenea del mondo naturale era stata clamorosamente smentita da un lato dalla spiegazione del mondo fisico fornita da Newton nei *Philosophiae naturalis principia mathematica* del 1687, e dall'altro dal complesso delle nascenti scoperte biologiche alla fine del Seicento, che evidenziavano palesemente la complessità di un mondo naturale che proprio i metodi e gli strumenti della scienza (anche cartesiana) avevano aiutato a svelare, ma che poi non erano riusciti a spiegare adeguatamente.

1.2 Un'astronomia non meccanicistica

Nel primo caso il contributo di Newton fu decisivo per smantellare il sistema cartesiano dei «vortici», il quale pretendeva di spiegare la rivoluzione dei pianeti attraverso moti vorticosi dell'etere, che si pensava formato da materia sottile dotata di una quantità di moto (espresso come una grandezza direttamente proporzionale alla massa ed alla

velocità della particella) capace di trascinare con sé le sfere celesti. Quel che Newton suppose, a differenza di Descartes, fu la possibilità – al principio, certo, solamente matematica – di forze a distanza (che non necessariamente avevano bisogno di un etere) esprimibili tramite equazioni, «attrazioni», per dirla col termine newtoniano, capaci di dare ragione di moltissimi problemi della meccanica celeste, ed inoltre talmente esaustivi da chiarire le ragioni delle tre leggi kepleriane, che avevano dal loro autore ricevuto una forma puramente descrittiva (Keplero si era limitato a trascrivere in termini di proporzioni matematiche ciò che gli suggeriva l'osservazione, senza però poter fornire una motivazione pregnante).

Senza un preventivo riferimento ad una ben determinata visione del mondo filosofica di stampo monistico (meccanicistica, spiritualistica ecc.) Newton cercò, tramite l'uso di concettualizzazioni matematiche che infine divennero veri e propri *modelli fisici* di esplicazione della realtà, di formulare le leggi della meccanica celeste pervenendo alla legge di gravitazione universale, la quale tuttavia conteneva il principio, del tutto anti-cartesiano, dell'azione di forze centripete a distanza che, in un sistema complesso formato da più corpi (come il sistema solare) determinavano il moto di rivoluzione dei pianeti. La fecondità dei modelli fisici di Newton (che si servivano anche di nuovissimi procedimenti matematici da lui stesso coniatati, quali il calcolo delle «flussioni» – ovvero la derivazione – e il calcolo di aree sottese a curve – ovvero l'integrazione) sembrò per un certo verso confermare la visione cartesiana del mondo, in quanto riduceva la natura a pure quantità misurabili; e tuttavia per Newton la materia non era mai soltanto estensione, ma era soggetta a una serie di forze la cui esistenza e mantenimento legittimavano importanti intromissioni teologiche nel suo sistema⁶. Dallo «Scolio generale» dei *Principia*, aggiunto alla seconda edizione del 1713, possiamo renderci conto della visione newtoniana della scienza:

Elegantissima hæcce solis, planetarum & cometarum compages non nisi consilio & dominio entis intelligentis & potentis oriri potuit. Et si stellæ fixæ sint centra similium systematum, hæc omnia simili consilio constructa suberunt *Unius* dominio: præsertim cum lux fixarum sit ejusdem naturæ ac lux solis, & systemata omnia lucem in omnia invicem immittant. Et ne fixarum systemata per gravitatem suam in se mutuo cadant, hic eadem immensam ab invicem distantiam posuerit. Hic omnia regit non ut anima mundi, sed ut universorum dominus. Et propter dominium suum, dominus deus *pantokrator* dici solet.⁷

In questa parte dei *Principia* Newton si astiene dal fornire una spiegazione causale della sua legge di gravitazione universale al di fuori del riferimento a Dio, in quanto questo significherebbe rinunciare a quella «filosofia sperimentale» che presuppone la verificabilità *in sede di sintesi* di ipotesi matematiche formulate *in sede di analisi*.⁸ Una teoria ipotetica di tipo meccanicistico a proposito delle cause della gravitazione universale significherebbe introdurre ipotesi immaginarie, del tutto contrarie al procedimento scientifico:

Rationem vero harum gravitatis proprietatum ex phaenomenis nondum potui deducere, & hypotheses non fingo.⁹

Di seguito Newton precisa esattamente quali siano i criteri che ritiene adatti alla scienza fisica:

Quicquid enim ex phaenomenis non deducitur, *hypothesis* vocanda est; & hypotheses seu metaphysicæ, seu physicæ, seu qualitatum occultarum, seu mechanicæ, in *philosophia experimentalis* locum non habent. In hac philosophia propositiones deducuntur ex phaenomenis, & redduntur generales per inductionem.¹⁰

Il fatto che l'induzione rappresentasse per Newton un fattore così importante nella ricerca scientifica non porta soltanto alla considerazione che è necessario un continuo confronto con i fatti dell'esperienza, ma che soprattutto nella scienza si può dare una legge valida perché verificata senza che se ne possa dare una fondata (nel senso newtoniano di «filosofia sperimentale») motivazione; in questo quadro così netto il ricorso a Dio, unica causa ammessa, non può essere semplicemente apologetico, perché contravverrebbe del tutto all'imperativo di non «fingere» ipotesi, ma è invece funzionale alla spiegazione stessa ed è senz'altro sentito «scientifico» in confronto alla «finzione» di ipotesi meccanicistiche o finalistiche.

1.3 La nascita delle scienze della vita

Un caso ancora più emblematico, e che più da vicino tocca l'argomento del presente scritto, è rappresentato in questo senso dagli sviluppi degli studi sulla materia organica.¹¹ Nel caso delle nascenti scienze della vita, ciò che si poteva scorgere attraverso le lenti di un microscopio decretò la sconfitta della visione cartesiana del mondo. Con la perdita di credito del finalismo aristotelico e la vittoria, in linea di principio, del meccanicismo cartesiano, nascono, alla metà del Seicento, le nuove scienze della vita che, sulla scorta del generale avanzamento scientifico del XVII secolo, rompono in modo graduale ma deciso con l'antica tradizione medica derivante da Ippocrate e Galeno¹². Se tuttavia i capisaldi del cartesianesimo risultarono essenziali per disfarsi di un *corpus* di nozioni mediche divenuto ormai ingombrante perché in gran parte si trovava a collidere con le più recenti osservazioni ed acquisizioni nel campo dell'osservazione anatomica e microscopica, tuttavia esso rimaneva del tutto insufficiente per spiegare i fenomeni tanto della conservazione quanto della generazione della vita.¹³

I principi della materia e del movimento, dei moti convettivi causati dal calore, non riuscivano a dare conto, per la loro estrema semplicità, di una serie di evidenze quali la complessa struttura arterio-venosa del sistema circolatorio e la insondabile realtà della generazione dell'embrione a partire dai «semi» maschili e femminili. Il fatto che la messa da parte del finalismo e la riduzione a pura estensione della materia naturale lasciasse inspiegata la fisiologia del vivente rappresentò senza dubbio una ragione per cui le riflessioni teologiche acquistarono credito in quest'ambito, assurgendo spesso al ruolo di «saperi» suscettibili di spiegare la causa prima imponderabile di tutte le cause seconde che cadevano sotto l'osservazione.¹⁴

1.4 Una «teologia laica»

Nonostante si possano trovare nell'interpretazione heideggeriana di Descartes, e nella palese insufficienza delle spiegazioni meccanicistiche di quest'ultimo, molti validi elementi per motivare una così forte presenza di elementi teologici nella scienza, è indubbio che il metodo cartesiano stesso aveva fornito un enorme credito a quella che è stata a ragione definita «teologia laica»¹⁵, cioè il discorso su Dio svolto da non-teologi, in massima parte da scienziati, che non si accontentavano affatto di inserire le loro ricerche nella sfera della *theologia naturalis*. Essi non credevano soltanto che la ragione fosse in grado di discernere i riflessi divini presenti nel creato, ma che rappresentasse lo strumento valido per poter approntare un legittimo discorso sugli attributi di Dio.

Le *Meditazioni metafisiche* (le quali già nel titolo si appropriano di un genere tipicamente religioso, ovvero le *meditationes*, invece di inserirsi, com'era consueto per questo tipo di trattazioni, nella *summa*, nella *quaestio*, nella *disputatio*) presuppongono la tabula rasa di ogni conoscenza comunemente accettata (al limite di paragonare la vita quotidiana ad un semplice sogno, seguendo le influenze del celebre dramma in versi di Calderón De La Barca *La vita è sogno*¹⁶) tranne la più inestirpabile, ovvero l'esistenza di un Dio onnipotente (Dio come *Possest*, ovvero potenza-essenza secondo la definizione di Cusano). Nell'opera di Descartes questo fondamentale attributo di Dio diviene il perno della conoscenza esatta, il fulcro della possibilità di possedere «idee chiare e distinte» sul nostro essere nonché sull'esistenza e le proprietà degli oggetti esterni.

Il Dio di cui Descartes discute nella sua teologia laica è un Dio per la pura conoscenza, che è privo di qualsiasi attributo morale; non è nemmeno «buono», non è strettamente necessario che lo sia, basta che «possa tutto».¹⁷ Egli è «l'ente di cui non si può pensare niente di più potente» perché sarebbe una contraddizione nei termini delle «perfezioni» attribuite a Dio, sostanzialmente (anche se non formalmente) in accordo con la prova ontologica anselmiana, la quale proprio nel XVII secolo conosce una nuova strepitosa fortuna a tal punto che Kant, un secolo dopo, sentì la necessità di confutarla in modo definitivo.

E sebbene nella teoria fisica di Descartes la divinità venga pensata, da un punto di vista fisico, come ciò che è capace di fornire l'iniziale quantità di moto alla materia, pure non si può del tutto prescindere, al suo riguardo, dallo svolgere considerazioni morali, ovvero di teodicea. Anche in questo caso però l'obiettivo non è propriamente il male, o il peccato, ma la fallacia conoscitiva, perché occorre di necessità dimostrare che l'ente potentissimo non è capace di ingannare la nostra facoltà conoscitiva. Tale dimostrazione, svolta ancora a prescindere dalla rivelazione, è puramente dedotta dall'onnipotenza, perché per un essere onnipotente il voler ingannare rappresenterebbe un'imperfezione¹⁸. Così un altro attributo della divinità, sviluppato poi in tutte le sue conseguenze da Leibniz, diviene oggetto di questa teologia laica.

Peraltro, non ogni aspetto della razionalità cartesiana moderna era capace di costituire un ponte con le esigenze di una teologia laica. L'ipotesi materialista era ugualmente percorribile e poteva benissimo apprestarsi a costituire la nuova base

filosofica delle scienze della vita (col passaggio dalla teoria cartesiana della *bête machine* a quella dell'*homme machine*¹⁹), se Spinoza aveva potuto farne il fondamento di una filosofia della natura del tutto non teistica. Contro gli spinoziani però, che verranno costantemente associati ad atei e libertini, si rivolgono quelle teologie «scientifiche» che vogliono salvaguardare il dato spirituale del mondo (si pensi ad esempio alle opere di Grew, Ray, Pluche e Nieuwentyt²⁰).

Vi era poi tutta una serie di filosofie che, nel campo delle scienze della vita si possono definire vitaliste, le quali, facendo leva sugli elementi immateriali delle teorie newtoniana e leibniziana, ma depurandole dei motivi teologici, proponevano una visione non-teistica del mondo naturale. Per la dominante *ratio* seicentesca, tuttavia, queste visioni parevano reintrodurre, senza il dovuto sostegno sperimentale, quelle «forze occulte» e quel finalismo da cui con tanta fatica si era riusciti a distaccarsi in oltre un secolo di sviluppi intellettuali. Così all'interno delle scienze della vita il preformismo (generalmente teista) ebbe il sopravvento sull'epigenismo (generalmente vitalista) sino circa alla metà del XVIII secolo.²¹

In ogni modo, né il timore del puro materialismo, né la spinta a superare l'ilemorfismo di matrice aristotelica appaiono capaci da soli di spiegare questa apparizione in grande stile della teologia sulla scena della scienza, apparizione che per di più vide come protagonisti non i teologi ma gli stessi scienziati. Queste sarebbero in un certo senso ragioni negative, che però non darebbero sufficientemente conto di questo momento unico nella storia della cultura in cui scienza e teologia trovarono significativi e durevoli punti d'incontro. Il fatto notevole è che alla teologia laica di cui sopra corrispose la strutturazione del sapere teologico secondo i canoni della «razionalità universale».

È stato a ragione fatto osservare che, in particolar modo nel XVI-XVII secolo, non è corretto discutere di teologie puramente fideistiche, ovvero dogmatiche, che si contrapponevano «muro contro muro» nei due opposti campi della Riforma e della Controriforma²²; la teologia dei controversisti, al contrario, lasciando da parte la dogmatica, desiderava confrontarsi attraverso un uso spregiudicato della ragione, al punto da farvi rientrare perfino le matematiche.²³ In termini categoriali questo mutamento dell'epistemologia teologica significò il passaggio dalla trattazione teologica svolta a partire dall'*analogia entis* a quella svolta a partire dai concetti di identità e differenza;²⁴ da equivoca la speculazione teologica desiderava divenire univoca, creando in questo modo un ponte ideale verso il metodo della scienza.

Se il problema principale delle scienze tra Sei e Settecento era dunque quello di riuscire a costituirsi come *disciplina rigorosa* sulla base di un sistema teorico sufficientemente ampio ed articolato per poter dar conto di una serie di nuove evidenze nel campo dell'osservazione (telescopica, anatomica e molecolare accresciuta dalle potentissime capacità dei microscopi);²⁵ se la «filosofia meccanica» era la sola che in linea di principio (cioè nei suoi principi metodologici anti-finalistici) poteva servire a questo scopo, il dato interessante (che non può essere discusso qui) è che *alcuni grandi scienziati* (ovvero, per quel che particolarmente interessa qui, delle scienze della vita) *fino alla*

metà del Settecento ne adottarono in larga parte la versione teistica.

Nell'ambito dell'embriologia, l'uso della teologia che venne fatto da una parte cospicua di essi, ma non da tutti, portò alla dottrina della preesistenza e dell'incastro dei germi, e all'utilizzo delle scoperte microscopiche come via a Dio *a posteriori*. Quest'uso non sembra identico a quello che ne fecero i fisici ovvero gli astronomi. Per questi ultimi (vedi l'esempio di Galileo e Newton²⁶) si trattava anche di rintracciare nelle Scritture una valida spiegazione di fenomeni che avevano già trovato il potente conforto della teorizzazione matematica e della verifica sperimentale; ed in definitiva i loro sistemi si sarebbero sostenuti (cheché ne pensassero i loro autori) *etsi deus non datus esset*. Non vi era bisogno di Dio per spiegare *come* il mondo procede, vi era bisogno di Lui solo per illustrare il *principio* ed il *fine ultimo* di questo procedere.

Nelle scienze della vita tra Sei e Settecento, al contrario, il teismo diviene la principale spiegazione plausibile (ovvero rispondente appieno alle richieste del principio di ragion sufficiente) per i fenomeni della generazione e anche per l'esistenza di forme di vita mirabili nella loro estrema minutezza. Mentre la fisica si occupava, vichianamente, del *verum factum*, ossia studiava la natura attraverso modelli, studiava un'immagine della natura appositamente costruita dall'uomo per essere più intelligibile, misurabile, quantificabile, e in ciò manifestava la piena esplicabilità che avevano anche i prodotti umani, alle scienze della vita l'uso dei modelli era precluso, ed esse rimanevano in qualche modo disarmate di fronte all'enorme varietà che la natura presentava; si dovevano limitare ad osservare, cosce di non poter penetrare a fondo i fenomeni osservati, e forse di non poterli penetrare nemmeno in futuro.

In questo contesto la scelta teistica, assai più di quel che abbiamo visto trattando di Newton, era profondamente, epistemologicamente sentita come *rationalis*, in confronto alle artificiali «forze vegetative» o «spiriti procreativi» o «molecole organiche» che, dallo stesso Lazzaro Spallanzani, verranno bollate come mero prodotto dello «spirito di sistema». ²⁷ La ripugnanza per quest'ultimo non era altro che l'astio verso l'introduzione, sentita come arbitraria, di cause *ad hoc* e di un linguaggio non univoco (ovvero analogico), i quali non possedevano alcun sostegno scientifico, o che almeno erano percepiti come un brusco ritorno ad un metodo pre-scientifico.

È da dire poi che in ambito biologico il dato sperimentale non era affatto in grado di decidere tra visione teistica e vitalistica della natura, ovvero tra preformismo ed epigenesi. Non esistevano, per le scienze della vita all'epoca delle origini, *experimenta crucis*. Di questo i vari Malpighi, Leeuwenhoek, Bonnet, Garden, Plantade, Spallanzani erano senza dubbio maggiormente consci dei loro avversari epigenisti; in questa luce, la loro scelta preformista risulta radicale, *rationalis* e, si potrebbe azzardare, assai aderente allo spirito della rivoluzione scientifica, la quale non presuppone mai l'esperimento ed il suo risultato, ma lo postpone sempre come verifica di una data visione *matematica* del reale, intendendo questa parola nel senso dell'etimo greco di ciò che è conosciuto in anticipo, ovvero dell'ipotesi. Con l'uso di una *theologia rationabilis* essi hanno tentato di costruire una filosofia delle scienze della vita che non ricorresse all'antico vitalismo

e finalismo, ma a quella causa prima che di per sé rappresentava la ragione razionale assoluta: Dio.

Se focalizziamo l'attenzione sulle scienze della vita, lasciando da parte la questione delle scienze fisiche, possiamo senz'altro affermare che le parole del Vangelo di Matteo (6, 27), che sancivano come indisponibile alla conoscenza l'arcano della nascita e della conservazione dell'ente, erano ancora decisamente normative per la scienza della vita delle origini.²⁸ La totale mancanza di una filosofia della biologia (intesa come progetto coerente sulle scoperte biologiche), che analogamente alla filosofia della fisica traesse comunque innanzi (*etsi deus non datus esset*) le scoperte in modo deciso attraverso l'evidenza sperimentale e la capacità predittiva, contribuirà per molto tempo a legare alla teologia le scienze della vita e a mantenere un'aura sacrale sui suoi molteplici aspetti. Tuttavia, anche il dissolvimento di questa aura era in fondo soltanto una questione di tempo, di affinamento degli strumenti e d'intuizioni risolutive.

2. Considerazioni epistemologiche

Con la scoperta della struttura della cellula, delle leggi dell'ereditarietà e infine della composizione cromosomica e della struttura elicoidale del DNA alla metà del secolo scorso, l'ultimo mistero sulla natura e conservazione della vita è, in linea di principio, caduto. Le considerazioni teologiche o, se si vuole, riguardanti il divino nel mondo naturale, sono state del tutto estromesse dalla sfera della scienza. Nessun fine superiore regola più la genesi degli esseri viventi, ma solo la combinazione di un numero ristrettissimo di nucleotidi (fosfati e zuccheri combinati con le quattro basi azotate) che, come le note in musica, danno origine alle infinite melodie ed armonie di tutti i viventi. Si affaccia così, prepotentemente, la concezione di una natura pienamente illuminabile e, di conseguenza, manipolabile. Ma, se la natura della vita non è più un mistero, non lo sono più nemmeno quelli che potevano essere considerati i suoi deterioramenti: malformazioni, malattie ereditarie, degenerazioni organiche, tutte sussumibili nell'idea lineare degli sbagli o errori di natura che in linea di principio sono correggibili dalla tecnica umana. Ecco che, al posto di una visione reverente della natura biologica, si fa strada una filosofia della biologia che pone al centro l'idea di *progresso* e, più ancora di perfettibilità.

Da questo pensiero, tuttavia, discende necessariamente quello di una *utilità necessaria* della scienza. Se le imperfezioni sono eliminabili in linea di principio, esse non possono più venir accettate e sopportate, ma esigono di essere estirpate prima possibile. Così la scienza della vita è stata spinta da un moto interno a portarsi avanti a ritmi vertiginosi, per cui non è azzardato dire che negli ultimi trent'anni si sia scoperto molto più che in tutti i precedenti millenni della storia umana. È grazie a questa nuova filosofia della biologia, con l'eliminazione in linea teorica di ogni elemento sacrale dalla vita, che sono stati possibili risultati come l'individuazione delle cause di alcune malattie genetiche, la produzione sintetica di insulina, la parziale risoluzione della infertilità tanto maschile quanto femminile, la diagnosi prenatale.²⁹

Le due componenti del progresso e dell'utilità necessaria hanno tuttavia legato, come si è detto, la scienza al suo elemento tecnico, poietico, in modo indissolubile, capovolgendo il famoso asserto kantiano del *devo dunque posso in posso dunque devo*. L'azione si fa in se stessa morale, detta le condizioni di esistenza dei principi etici, e realizza così l'ideale faustiano della conoscenza: «In principio era l'azione!», e non il Logos e nemmeno «l'energia». Corrispondentemente un'etica relativa alle scienze della vita, come si vedrà in breve, trova il suo principio nel presente, nel caso da analizzare; essa, anche quando vuole configurarsi come etica delle intenzioni e dei principi, è costretta, se vuol essere efficace, a farsi casistica ed a normare *a posteriori*, è costretta a partire dall'atto e non dalla norma.

Questo punto ci aiuta a sintetizzare la situazione in cui la moderna scienza, e in particolare la biologia molecolare, si trova, permettendoci di evidenziarne tre peculiarità rispetto al passato.

1. L'obiettivo della ricerca è pratico e non teorico, ossia è mirato all'ottenimento di un risultato attraverso un fare e non un meditare. L'idea di Newton che, come vuole la tradizione, scopre il principio di gravitazione universale seduto sotto ad un albero è definitivamente tramontata. Nel campo della biologia molecolare sarebbe impensabile ottenere risultati importanti senza agire concretamente sulle forme di vita esistenti, senza manipolarle e senza, in alcuni casi, crearne di nuove. La scienza biologica deve creare il materiale dei propri esperimenti, deve dargli vita per capire in primo luogo come questa vita funzioni. Ciò è del tutto differente dalla preparazione degli esperimenti in fisica classica, in cui un materiale dato veniva sistemato in maniera conveniente per l'esperimento e si cercava di riprodurre, sotto talune condizioni misurabili, la realtà data per poterne comprendere il funzionamento. Il modello fisico-matematico, come centro del metodo sperimentale, diviene inservibile in biologia.³⁰
2. Questo legame col creare pratico sottopone la ricerca scientifica a una tale molteplicità di influenze che essa non può più essere definita come una pura ricerca della verità. In primo luogo, il fatto che la ricerca costi somme ingenti pone notevoli limiti alla sua libera esplicazione. In molti casi la ricerca è sottoposta alla pressione di finanziatori (pubblici o privati) che richiedono un risultato concreto, e dunque impongono determinate mètte. In secondo luogo la possibilità di raggiungere un certo risultato è molto più legata ai progressi della tecnica che non all'intuizione del singolo scienziato. Solo se potrò guardare più a fondo e con più precisione, solo se potrò manipolare più delicatamente le minute particelle di materia, saprò cosa posso chiedere alla natura. Il tradizionale metodo ipotetico-sperimentale viene così del tutto mutato. Non si parte più da un'ipotesi dettata dall'osservazione contemplativa della natura, che poi necessita di una verifica, bensì dall'osservazione di una natura che, nel momento in cui la si scruta, viene mutata e, se il mutamento

risponde all'esigenza pratica che ci si era posti al principio (non più un'ipotesi, dunque) ciò che è stato scoperto diviene legge naturale.

3. Questa ricerca scientifica, non più «disinteressata», spinge naturalmente avanti i biologi che, nel momento in cui vedono qualcosa di nuovo o ottengono una nuova forma di vita, non possono fermarsi a quel determinato stadio. Sono costretti ad andare avanti da ciò che Aristotele definiva la propensione umana alla conoscenza, ovvero da un punto di vista logico dall'impulso di soddisfare il principio di ragion sufficiente all'infinito, e da un punto di vista etico dal potere conseguito sulla natura (posso dunque devo). Non è poi da trascurare l'impulso del demiurgo, del Dio in miniatura, che invade lo scienziato: l'idea di essere il creatore di qualcosa che nessuno prima aveva immaginato. Le molle del prestigio, del compenso economico, del progresso nel benessere dell'umanità costituiscono, quindi, le forze coagenti che possono in linea di principio soffocare o mettere in secondo piano il puro disinteresse della ricerca del vero.³¹

Questa nuova situazione epistemologica della biologia pone nuovi e pressanti interrogativi. Innanzitutto, con l'entrare così prepotentemente nel mondo, coll'aver fini e metodi così spiccatamente pratici, la scienza trapassa dalla sfera del pensare a quella del fare e quindi si sottopone al giudizio dell'etica. Come disse Oppenheimer, protagonista degli esperimenti sull'atomica, dopo lo scoppio della bomba: «con questo la scienza ha conosciuto il male». Ma il legame della biologia con l'etica non consegue *ipso facto* dalla sua immersione nel mondo, ma precisamente dal fatto che questa immersione nel mondo ha modificato lo *status* epistemologico stesso della biologia, come risulta dai seguenti punti:

1. Quando in sede sperimentale il biologo molecolare produce qualcosa, non può conoscere *a priori* se gli effetti del prodotto saranno vantaggiosi o svantaggiosi, poiché ogni prodotto è sempre suscettibile di una molteplicità di utilizzazioni indipendentemente dalle sue determinazioni qualitative o quantitative. L'ingegneria genetica può essere fonte tanto di beneficio quanto di danno a prescindere dalla sua essenza; questa equivocità non rappresenta niente di nuovo, poiché ogni azione ha «il suo rovescio», ma rappresenta invece una novità per la scienza biologica (e la scienza in genere) che non può più considerarsi completamente *libera* (in una pura meditazione sull'ente).
2. Le 'benedizioni' della scienza, ossia tutte quelle scoperte che consentono al mondo occidentale il tenore di vita che attualmente ha, vincolano sempre più il singolo alla scienza stessa, in quanto non ne può più fare a meno. Questo dà alla scienza divenuta tecnica un enorme potere che in precedenza non possedeva, e le permette, in linea di principio, di stabilire essa stessa i fini e i bisogni che dovranno essere accettati da tutti coloro che utilizzano

passivamente i suoi prodotti.

3. La scienza ha raggiunto una dimensione globale, in quanto le sue scoperte possono teoricamente interessare l'intero globo. Ciò che viene sperimentato, scoperto, realizzato in un angolo del mondo potrebbe riguardare il resto del pianeta (in senso vantaggioso, il che porterebbe ad una sua promozione, o svantaggioso, il che porterebbe ad un suo contenimento, in quanto non è mai pensabile l'eliminazione di una conoscenza o scoperta acquisita).
4. La biologia considera come oggetto di ricerca anche l'uomo stesso. La classica dicotomia soggetto/oggetto sembra ormai svanita nella scienza odierna. Attraverso la possibilità della manipolazione genetica, la scienza pone in maniera concreta il problema classico, e finora solo teorico, di tutta la filosofia morale: cos'è l'uomo? Cosa può l'uomo, e cosa egli deve? Si affaccia sulla scena in modo concreto la questione dell'umanità, e la domanda su quale sia la sua essenza, e proprio la caratteristica fondamentale, ovvero il libero arbitrio dell'uomo riguardo il proprio destino terrestre – arbitrio capace di superare i meri impulsi e istinti legati alla sensorialità – assume lineamenti del tutto nuovi e radicali.
5. Questo d'altronde pone a sua volta il problema (che prima era riferibile ai singoli, o tutt'al più a gruppi ristretti): perché deve esistere l'umanità? O meglio, in riferimento alla biologia molecolare: perché deve esistere l'umanità come essa si configura adesso?

Precisamente questo *status questionis* della biologia attuale impone un riferimento all'etica (*ethos*). La scienza con i propri strumenti, vale a dire strumenti puramente tecnici, non è in grado di rispondere alla domanda sulla propria validità, cioè, non è in grado di fare meta-scienza. D'altronde le valutazioni non le competono: per secoli essa ha difeso la propria obiettività e la propria avalutatività.

Tuttavia la *koiné* scientifica vede con sospetto tale supposto, necessario riferimento all'*ethos*, in quanto questo facilmente potrebbe ledere il diritto alla libertà di ricerca. Per rispondere all'importante questione del valore della libertà scientifica bisogna preliminarmente comprendere cosa si intenda per «libertà del sapere scientifico». In un primo senso, formale, la scienza è libera nell'usare quei metodi e quelle procedure per cui essa possa ottenere il massimo rigore intellettuale. I limiti dello scienziato, quindi, sono solo quelli di essere un «buono scienziato», ossia lavorare tramite metodi sperimentali comunemente accettati e verificabili, non falsare i risultati della ricerca, comunicare il proprio lavoro agli altri scienziati. Nel secondo caso la scienza deve risultare disinteressata, cioè non sottostare ad influenze eterogenee che possano in qualche modo falsarla. Ora, però, da quanto detto in precedenza, la moderna biologia molecolare, per il suo essere entrata attivamente nel mondo, in nessuno dei due sensi sopra esposti può in senso morale ritenersi libera, cioè al di là del bene e del male.

Nel senso formale: infatti, in quanto la procedura sperimentale bio-molecolare manipola esseri viventi, pone due tipi di problema etico. Modificando organismi esistenti, ad esempio batteri, essa produce organismi geneticamente differenti da quelli presenti in natura; se tali organismi rimangono sotto controllo in laboratorio, e fintantoché sono facilmente controllabili (come l'*escherichia coli* modificato per la produzione dell'insulina umana) non pongono alcun problema. Quando però vengono immessi nell'ambiente per esplicare una specifica funzione, non potremo mai sapere come influenzeranno l'ecosistema al di là di ciò per cui sono stati specificamente creati. Modificando linee cellulari umane, la biologia molecolare oltrepassa il Rubicone che separa la secolare distinzione tra soggetto ed oggetto nella scienza, e pone in primo piano ulteriori problemi etico-filosofici. Un «buon scienziato» potrebbe così contribuire a causare danni irreversibili al nostro mondo.

Nel senso materiale, abbiamo visto che la scienza contemporanea, col suo strettissimo, costante legame con la tecnica, difficilmente può ritenersi libera da scopi eteronomi e molto spesso è costretta ad allacciare rapporti di sudditanza con la politica e l'economia, quando non ceda alla tentazione di imporre i propri fini al resto della comunità.

3. Una diversa visione della ricerca scientifica

In linea generale potremmo dire che è proprio il successo della scienza legata alla tecnica ciò che costituisce il maggiore interrogativo per l'etica. L'assetto del mondo occidentale moderno pone ben pochi ostacoli al successo tecnico; poche coppie sterili vorrebbero rinunciare, poniamo, ad avere dei figli, nessun talassemico vorrebbe continuare a convivere con la propria malattia; d'altronde non poche madri desidererebbero, se fosse possibile, avere un figlio fisicamente prestante e di intelligenza superiore. Allo stesso modo, forse pochi coltivatori si farebbero scrupolo di immettere nei campi organismi geneticamente modificati che migliorino la produzione (tanto sotto forma di animali che di piante OGM), e non si preoccuperebbero forse delle conseguenze che questo inserimento di organismi «nuovi» potrebbe avere su un ambiente non pronto ad accoglierli. Se e quando la scienza unita alla tecnica biomolecolare sarà in grado (e in parte già lo è) di raggiungere questi e altri obiettivi, nessuna considerazione etica servirà a dissuadere le persone dall'utilizzare i prodotti della ricerca e a promuoverne di più affinati.

Per questa ragione il ruolo essenziale della filosofia e dell'etica è quello di prevenire simili situazioni, indicando, tanto alle autorità (scientifiche e politiche) quanto alla persona che non è scienziato e non ha ruoli di comando, i rischi che si corrono percorrendo determinate strade.

La disciplina definita col nome di «bioetica» è nata con questo presupposto circa trent'anni fa negli Stati Uniti e oggi si è molto sviluppata, comprendendo in sé anche la morale medica e la deontologia. Essa, a differenza di queste ultime, possiede un carattere del tutto interdisciplinare, che sostiene la natura della *ratio* da essa impiegata,

la quale non esige asserzioni forti, bensì «miti»³²; non si può trattare di etica biologica rimanendo nel puro ambito di un settore disciplinare scientifico, ma bisogna volgersi dialogicamente alla filosofia, al diritto, alla psicologia, in quanto gli argomenti trattati (si pensi soltanto all'ambito procreativo) non sono circoscrivibili semplicemente all'ambito medico-biologico.

La necessità di questo tipo di approccio è tale che i parlamenti degli stati occidentali hanno nominato comitati di bioetica, che aiutano il legislatore a prendere decisioni difficili in merito al rapporto della scienza con la società civile. Tuttavia, questo appare ancora insufficiente per almeno due ordini di ragioni.

Il primo è che il parere di nessun comitato bioetico ha valore costrittivo rispetto al legislatore (tranne che, come in Italia, in ristrettissimi ambiti quali quello della sperimentazione farmacologica, che però ha una bassissima ricaduta sull'interesse generale); esso può servire a promuovere oppure a dissuadere, ma niente di più. Spesso la politica può prendere e prende decisioni che sono assolutamente svincolate dal parere della commissione, e seguono ragioni autonome. Inoltre, in seno alle stesse commissioni i valori da adottare possono essere discordanti, e molto dipende dalle premesse etiche da cui si decide di partire. Bioeticisti neoutilitaristi o neocontrattualisti raramente andranno d'accordo con bioeticisti personalisti.

Il secondo è che difficilmente gli scienziati si lasciano influenzare dai non-scienziati. La plurisecolare abitudine della scienza all'autonomia è però oggi tanto più rischiosa quanto più la scienza ha potere, e lo scienziato vuole adoperare «bene» questo potere. Il benessere di una categoria di persone, di una nazione e dell'umanità intera potrebbero essere ragioni moralmente buone – assai meno opponibili e contrastabili di altrettante ragioni moralmente cattive – per sviluppare prodotti scientifici che però potrebbero avere conseguenze secondarie incontrollabili. Per dirla di nuovo col *Faust* goethiano, ma parafrasandolo, la scienza potrebbe essere, e lo è stata anche nel recente passato, «una parte di quella forza che sempre vuole il bene e sempre genera il male». La pretesa di sapere essa sola cosa sia il bene, di cosa si abbia veramente bisogno, l'idea di poter una volta per tutte 'inventare' la felicità umana: questo è il rischio più grande che la scienza biomolecolare può correre. Si legga ad esempio la seguente proposizione:

Termini come 'sacralità' mi rammentano i diritti degli animali. Chi ha conferito un diritto ad un cane? Questa parola, diritto, sta diventando molto pericolosa. Abbiamo i diritti delle donne, i diritti dei bambini; si può andare avanti all'infinito. E poi ci sono i diritti delle salamandre e quelli delle rane. Stiamo arrivando all'assurdo. Mi piacerebbe smettere di parlare di diritti e di sacralità. Invece mi piacerebbe dire che gli uomini hanno delle necessità, e che dovremmo provare, in quanto specie sociale, a soddisfare i bisogni umani – come quello di mangiare o di ricevere un'educazione o di essere curati – e che questo è il modo in cui ci dovremmo comportare. Provare a dare a questi temi un significato più grande del dovuto, quasi mistico, è qualcosa che ci si può aspettare da Steven Spielberg o da altri personaggi del genere. Si tratta di aria fritta.³³

Il suo autore è James Watson, uno dei padri, assieme a Francis Crick, della scoperta del DNA, premio Nobel per la medicina. Se il suo disagio rispetto a quella che è stata definita «industria dei diritti» è comprensibile dato il suo carattere notoriamente impetuoso e gli eccessi cui anche quell'«industria» si è lasciata andare, il suo discorso appare quanto meno riduttivo e, da un punto di vista etico, pericoloso. Riduttivo, poiché si dovrebbe invece precisare che ciò che sta eccedendo è la tutela statale di troppe istanze di troppi soggetti singoli (creazione di troppi «diritti»), nel senso che è ingenuo pensare di fare qualche serio passo avanti nella scienza se le istanze di qualcuno non vengono almeno in parte disattese. La scienza è conoscenza, ovvero tentativo di dominio (teorico o pratico) di una parte del reale, dominio in cui i rapporti di forza tra gli enti non sono mai paritetici, e le richieste di tutti non possono venir assicurate. Ma il riduzionismo che sancisce l'inutilità dei diritti in quanto tali è pericoloso perché rischia di disfarsi, oltre che dell'accessorio, anche del necessario.

Credo che invece la 'sacralità' dell'uomo, e con ciò il suo diritto all'esistenza (e all'esistenza come noi la conosciamo), abbiano bisogno di una maggiore attenzione. Anche se di solito il termine 'sacro' riferito all'umanità è denotativo di una visione religiosa dell'etica, possiamo pensare di adoperare questa parola per improntare una considerazione più generale e in sé non religiosa sul ruolo dell'uomo nel mondo. Se il sacro è ciò che è degno di rispetto e di venerazione, possiamo affermare che la vita di un uomo è «sacra» in quanto tale (e non perché, poniamo, derivante da Dio)? Senza i progressi della scienza molto di quanto oggi è possibile e domani sarà auspicabile non si lascerebbe nemmeno immaginare. Ma proprio questa prodigiosa attività scientifica dice che l'essere che ne è artefice è composto da qualcosa di più che meri bisogni naturali o cognitivi; egli è *ens ratione praeditum*, secondo la definizione tradizionale. Quello che in lui classicamente si è chiamato «spirito» è ciò che lo differenzia dalla natura e che gli permette da un lato di stabilire un certo dominio su di essa (razionalità strumentale) e dall'altro di inserirla (ed inserirsi) in una costellazione morale (razionalità etica).

È vero che l'uomo, in quanto animale, è soggetto a soddisfare i propri bisogni materiali e sociali; l'uomo è anche, come, diceva Blaise Pascal, un essere fragilissimo, come un'esile canna, e come tale potrebbe essere distrutto da qualsiasi masso che lo schiacci. Però è una canna pensante, che riesce a comprendere la motivazione della caduta del masso e quella della morte propria. Questa duplice «coscienza» dell'uomo, la sua *ratio* è ciò su cui può fondarsi il concetto di 'sacralità' e quindi di speciale 'dignità' dell'uomo.

La consapevolezza che l'uomo ha non solo dei suoi bisogni, stati e fini, delle sue gioie e dolori, del peso delle sue decisioni, ma anche del suo impulso alla conoscenza della natura, è qualcosa di cui non si può non tener conto. Per questo troviamo, fin dagli esordi delle più diverse culture, il tentativo di definire questa particolare essenza dell'uomo e di distinguerla dal resto del cosmo. Non c'è alcuna ragione di pensare che questa alta auto-coscienza che l'uomo ha di sé sia più falsa, poniamo, delle percezioni che riceviamo dai sensi, delle operazioni del nostro intelletto o del fatto

di sentirci vivi. Possiamo ritrovarla in ogni cosmogonia, anche in quelle più antiche a noi note (documenti mesopotamici risalenti al V millennio a. C.) e sarebbe solo presunzione affastellare questa imponente e ininterrotta tradizione nell'unico fascio dell'errore e dell'ingenuità. Perciò quasi nessuna bioetica, pur con le rispettive diversità di impostazione, disconosce il valore speciale dell'essere umano. Sebbene, poi, non si possa negare il contributo che il cristianesimo (qui il Dio dei cristiani è divenuto uomo e si proclama sempre «figlio dell'uomo») ha fornito alla visione occidentale dell'essenza umana, non è necessaria una posizione fideistica per sostenerla.

È quanto possiamo apprendere da Kant, il quale se ne fa testimone nella *Conclusion* alla *Critica della ragion pratica*:

Due cose riempiono l'animo di ammirazione e di reverenza sempre nuove e crescenti, quanto più spesso e più a lungo il pensiero vi si ferma su: il cielo stellato sopra di me e la legge morale dentro di me. Queste due cose non ho da cercarle fuori dalla portata della mia vista, avvolte in oscurità, e nel trascendente; né devo, semplicemente, presumerle: le vedo davanti a me, e le connetto immediatamente con la coscienza della mia esistenza.³⁴

Il cielo stellato certamente genera ammirazione in chi lo guarda, e *sa* cosa sta guardando e *comprende* la grandezza di quello spettacolo: «queste due cose non ho da cercarle fuori dalla portata della mia vista» significa che sono sempre immediatamente presenti perché ambedue connesse «immediatamente con la coscienza della mia esistenza», ovvero del mio sapere di essere ente, del mio costituire una canna pensante *ratione praedita*. Questa 'sacralità', ovvero dignità dell'uomo è qualcosa che la scienza deve sempre tener presente.

Inoltre, soprattutto quando la scienza disseziona l'animale uomo, deve ricordarsi che non ha mai a che fare col singolo, ovvero questo o quell'uomo, ma con l'umanità nel suo insieme, in quanto l'umanità, per come la si è definita, è precisamente un concetto che è attribuibile solo ad un'esistenza che è sempre anche collettiva (come «storia dell'umanità», come «vita dell'umanità»). Ciò che diminuisce un uomo diminuisce la sua umanità: era quanto espresse, con limpida chiarezza, il poeta inglese John Donne nelle sue *Devotions*:

Nessun uomo è un'Isola, intero in se stesso. Ogni uomo è un pezzo del Continente, una parte della Terra. Se una Zolla viene portata dall'onda del Mare, l'Europa ne è diminuita, come se un Promontorio fosse stato al suo posto, o una Magione amica, o la tua stessa Casa. Ogni morte d'uomo mi diminuisce, perché io partecipo dell'umanità. E così non mandare mai a chiedere per chi suona la campana: Essa suona per te.³⁵

Insieme a questa considerazione sull'uomo, si impone la necessità di una nuova filosofia della biologia, che non consideri più come semplice oggetto di studio manipolabile a piacere la vita della natura. Si è visto che una simile visione non è nuova per la scienza e forse si potrebbe sostenere l'opportunità che essa se ne riappropri. Come per la considerazione ora fatta sul ruolo dell'uomo nel cosmo, anche qui non c'è bisogno di esigere una considerazione della natura di stampo teistico, com'era il

caso della scienza del XVII secolo; non è tuttavia trascurabile il fatto che un periodo essenziale del pensiero scientifico si è nutrito di una visione prudente e rispettosa del mistero naturale.

L'ammirazione ed il pudore verso il corso plurimillenario e, in fondo, ancora pieno di segreti, del mondo non dovrebbero mai lasciarsi sopraffare dall'enfasi momentanea di una scoperta o di un'innovazione – per quanto ciò possa risultare difficile. Di fronte a questo mistero è sempre meglio essere cauti che baldanzosi: *in dubio pars tutior eligenda est*, se si hanno dubbi, percorrere la via meno rischiosa. Infatti, nel caso delle possibili conseguenze di scelte errate in ambito biomolecolare potrebbe non valere in un futuro prossimo il detto: «L'uomo singolo sbaglia, ma l'umanità progredisce comunque». Di fronte al reale della natura è troppo semplicistico pensare che la verità sia semplicemente ciò che sta nel nostro pensiero, ovvero ritenere che il risultato della nostra riflessione razionale, attuata mediante processi logici e metodologici ineccepibili, sia per ciò stesso anche vero. La verità sembra essere qualcosa di molto più complesso della *adaequatio intellectus et rei*, in ciò più vicina alla greca *alêtheia* (dal verbo *lanthanô*, restar nascosto, sfuggire; quindi, con alfa privativo, portare allo scoperto), una verità che viene lentamente illuminata solo in una sua porzione, per cui il resto, che è la grande parte, rimane oscuro, non definito, non padroneggiabile.³⁶ In fondo, come si è visto, la scienza non si è sentita, nel suo grandioso cominciamento, affatto diminuita nel suo *status* dall'aver una concezione più reverente della realtà che andava studiando; le forme di quella visione del mondo non possono naturalmente più essere quelle odierne, ma in ogni caso possono a buon diritto dare qualche lume per il tempo presente.

Per assumere tale prospettiva non bastano però soltanto le buone intenzioni dei singoli scienziati, o anche i codici deontologici dei medici. L'ammettere i valori di beneficenza, non maleficenza e giustizia (che stanno alla base del giuramento di Ippocrate e di ogni moderna deontologia) non appare sufficiente per l'odierna medicina «multipotente». La questione è appunto in primo luogo quella di chiarire i significati dei valori sommi: il bene, il male, la giustizia; questo fonda lo sforzo della filosofia verso la biologia, e in particolare lo sforzo della bioetica. In secondo luogo si tratta di rendere partecipe l'intera opinione pubblica di questioni cruciali, che la interessano sempre più da vicino. In questo senso l'etica della biologia deve divenire costume (l'originario significato del termine greco *ethos*, che d'altronde ha un esatto corrispettivo nel *mos* latino da cui deriva la nostra 'morale'), patrimonio comune, di modo che i meccanismi, che anche la scienza stessa possiede, di autoregolamentazione siano responsabili di fronte al maggior numero possibile di attori. Questo farsi responsabili di ciò che l'umanità produce esige l'assunzione, ovvero la piena coscienza in noi dell'umanità, che come tale esige di venir conquistata con sforzo consapevole e con educazione; l'uomo deve *diventare* ciò che è.³⁷ Sosteneva Herder nelle *Lettere per la promozione dell'umanità* (1793-97):

Noi tutti siamo *uomini* in quanto portiamo in noi il genere umano ovvero apparteniamo al *genere umano* [...]. L'umanità è il *carattere della nostra specie* (*Geschlecht*); tuttavia esso è innato solo come disposizione e deve propriamente

venir formato. Non lo portiamo nel mondo già costituito, ma nel mondo deve rappresentare la mèta delle nostre tensioni, la totalità dei nostri compiti, il nostro *valore*. Non conosciamo alcuna *angelicità* insita nell'uomo, e se il demone che ci governa non è un demone umano, noi diveniamo allora importuni per gli uomini. Ciò che è *divino* nella nostra specie (*Geschlecht*) è dunque *l'educazione all'umanità*. Tutti gli uomini grandi e buoni, i legislatori, gli inventori, i filosofi, i poeti, gli artisti, ogni uomo nobile ha contribuito a questo, nella condizione in cui si è trovato, coll'educazione dei propri figli, l'osservanza dei propri doveri, con l'esempio, il lavoro, l'istituzione (*Institut*) e la dottrina. Umanità è il tesoro ed il provento di tutti gli sforzi umani, e allo stesso tempo è *l'arte della nostra specie* (*Geschlecht*). L'educazione ad essa è un'opera che dev'essere portata avanti senza sosta, altrimenti noi sprofondiamo di nuovo – sia che apparteniamo ai ceti più alti sia ai più bassi – in una rozza animalità, nella *brutalità*.³⁸

Qui la «rozza animalità» non è affatto lo stato di natura animale, ma l'animalità dell'uomo, che non è mai puro istinto, ma si trasforma sempre in «brutalità», ovvero animalità cosciente. L'etica diviene tale solo se è assunta nel volere comune, ovvero nel costume, e questa assunzione può solo risultare dall'esercizio virtuoso di ognuno all'umanità contro l'«animalità».

In conclusione, aggiungerei, questo 'rispondere' con coscienza di se stessi non può oggi più essere limitato al tempo e alle persone presenti, ma deve anche volgersi alle generazioni future. L'abitudine a pensare più avanti diviene fondamentale e potrebbe anche chiedere che la scienza, un giorno, di fronte alla propria volontà di scoprire l'uomo, si ponga un freno in qualche senso. Non è forse questa un'infrazione del principio filosofico iscritto sulla porta dell'oracolo di Delfi, che recitava: *gnôthi seauton* («conosci te stesso»)? Non credo. Infatti questo detto presupponeva anche la *sôphrosynê*, ossia la moderazione, quella saggezza che sapeva sempre valutare l'azione giusta nella situazione data. Cercare sempre una ragione di tutto *ad ogni costo*, in ossequio a un principio di ragion sufficiente portato all'estremo, è il contrario della moderazione. Al posto quindi di chiedersi all'infinito il *perché* delle cose, si potrebbe domandare un domani alla scienza di fermarsi ad un *poiché* oltre cui non è lecito per essa andare. Può ben essere che la scienza trovi da sola gli strumenti per meglio condursi, ma non è prudente in ogni caso adagiarsi su questa convinzione. Prudente è invece assumere tutti la nostra parte di responsabilità in un mondo che richiede sempre più la nostra partecipazione per proseguire in modo eticamente buono il proprio corso.

NOTE

* Poiché l'argomento di questo contributo riguarda il rapporto tra biologia e filosofia, è principalmente alla biologia che si rivolgono le seguenti considerazioni, sebbene talune di queste valgano anche per la scienza in generale. Quando perciò nel seguito si parlerà di scienza, si intenderà in primo luogo la biologia, e in particolare la biologia molecolare, senza che ogni volta si debba ripetere questo termine.

¹ Cfr. [11]. Di quest'opera fondamentale di Comte la parte che più ha esercitato un'influenza sul pensiero posteriore rimane senza dubbio la dottrina della scienza, espressa nel libro I, in cui si specifica che la predicibilità, ovvero il formulare leggi predittive che conducano al dominio della natura, è il vero scopo della scienza. In effetti questa visione comtiana non ha poi da parte sua compreso il genuino spirito scientifico in quanto, mettendo in primo piano l'aspetto normativo del sapere scientifico ne ha sottovalutato l'aspetto sperimentale e specialistico, che per questo autore rappresentava un connotato esiziale della scienza.

² Sull'idea di progresso si veda [1], ed in particolare i contributi di: A.C. Crombie, *Alcuni atteggiamenti nei confronti del progresso scientifico: Antichità, Medioevo, inizi dell'Era moderna*, pp. 15-36; P. Rossi, *Sulle origini dell'idea di progresso*, pp. 37-87; E. Agazzi, *Diverse accezioni del concetto di progresso applicato alla scienza*, pp. 89-103; J. Cohen, *Il progresso nella scienza*, pp. 105-120. Di Paolo Rossi va segnalato inoltre [49]. L'immagine di Bernardo di Chartres secondo cui noi moderni «siamo come nani sulle spalle di giganti, così che possiamo vedere più cose di loro e più lontane, non certo per l'altezza del nostro corpo, ma perché siamo sollevati e portati in alto dalla statura dei giganti», esprime l'idea antica dell'accumulo umano di conoscenze, ovvero della cultura umana, ma non ha niente a che vedere col dominio della natura. In questa forma l'idea si ritrova in tutti gli umanisti e nei rappresentanti della «rivoluzione scientifica» del Cinque-Seicento. Sulle molteplici varianti e i diversi usi di questa celebre metafora, ripresa anche da Newton, resta fondamentale [35].

³ Scrive Galileo ne *Il saggiaiore*: «forse [Signor Sarsi] stima che la filosofia sia un libro e una fantasia d'un uomo, come l'Iliade e l'Orlando furioso, libri ne' quali la meno importante cosa è che quello che vi è scritto sia vero. Signor Sarsi, la cosa non istà così. La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi agli occhi (io dico l'universo), ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua, e conoscer i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto», [19] pp. 631-632.

³ Così si esprime Salviati ancora nel *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*: «Or questi passaggi, che l'intelletto nostro fa con tempo e con moto di passo in passo, l'intelletto divino, a guisa di luce, trascorre in un istante, che è l'istesso che dire, gli ha sempre tutti presenti. Concludo per tanto, l'intendere nostro, e quanto al modo e quanto alla moltitudine delle cose intese, esser d'infinito intervallo superato dal divino; ma non però l'avvilisco tanto, ch'io lo reputi assolutamente nullo; anzi, quando io vo considerando quante e quanto maravigliose cose hanno intese investigate ed operate gli uomini, pur troppo chiaramente conosco io ed intendo, esser la mente umana opera di Dio, e delle più eccellenti. [18] pp. 133-137.

⁴ «Cartesio sa bene che l'ente non si manifesta innanzitutto nel suo essere autentico. 'Innanzitutto' è dato questo pezzo di cera, che ha un certo colore, un certo sapore, che è duro, freddo e

risonante. Ma tutto ciò e, in genere, ogni dato sensibile, è privo d'importanza ontologica. *Satis erit, si advertamus sensuum perceptiones non referri, nisi ad istam corporis humani cum mente coniunctionem, et nobis quidem ordinarie exhibere, quid ad illam externa corpora prodesse possint aut nocere.* I sensi non ci fanno conoscere l'ente nel suo essere, ma denunciano semplicemente l'utilità o la dannosità delle cose presenti nel mondo 'esterno' nei confronti dell'essere umano corporeo. *Nos non docent, qualia (corpora) in seipsis existant.* I sensi non ci informano sull'ente nel suo essere» [22] pp. 175-176.

⁵ È un fatto ormai assodato che il carattere esoterico (per non dire, agli occhi del cristianesimo, eretico) degli scritti non pubblicati di Newton esprime chiaramente il fatto che la sua opera dev'esser collocata «su un piano assai diverso da quello, irrimediabilmente obsoleto, delle interpretazioni di Newton come *scienziato positivo*» [48] p. 358. Su questo cfr. anche [33] e [34].

⁶ Cfr. [38] pp. 527-28 (tr. it. pp. 792-793). Lo «Scolio Generale» alla fine del libro III sulla filosofia naturale rappresenta anche esplicitamente una ulteriore confutazione del sistema cartesiano dei «vortici», ovvero della spiegazione meccanicistica della natura, confutazione che a queste date Newton vuole ribadire dopo la disputa tra Leibniz e i «continentali», che lo accusavano di distaccarsi dai principi comunemente accettati del meccanicismo. Su questo si vedano [11]; [43]; [20]; [32] pp. 135-169.

⁷ Per tutta la questione della «filosofia sperimentale» di Newton organizzata in un momento analitico ed in uno sintetico, cfr. [20] p. 188 e sgg.

⁸ [38] p. 530 (tr. it. p. 795). La famosa espressione compare, come il precedente passo, nello «Scolio generale».

⁹ *Ibidem* (tr. it. p. 796).

¹⁰ Il tema delle nascenti scienze della vita è ormai oggetto, sia in Italia che all'estero, di un'ampissima bibliografia. Per gli studi più importanti cfr. almeno: [45], [52], [26], [4].

¹¹ Cfr. W. Bernardi, *Il problema della generazione* in [47], vol. 2, pp. 591-622.

¹² Sulla insufficienza del meccanicismo nelle scienze della vita cfr. in particolare S. Poggi, *L'anima e l'anatomia. Struttura, funzioni e forza vitale nella fisiologia*, in [47], vol. 2 pp. 623-644.

¹³ Cfr. [3] p. xx. In particolare Bernardi riconosce una sorta di «resa della scienza alla teologia»; questa espressione dev'essere intesa a mio parere – come mi sembra emergere dal testo – non come un divenire della scienza una *ancilla theologiae*, ma invece, nella sua autonomia, un ricorrere della scienza alla teologia come un vero e proprio ausilio epistemologico, spesso ritenuto assai più scientifico delle varie «forze» introdotte dai filosofi.

¹⁴ Vedi soprattutto [17] pp. 4 e sgg.

¹⁵ Cfr. S. Landucci, *Introduzione* in [12] p. xx.

¹⁶ «*Dei domine intelligo substantiam quandam infinitam, independentem, summe intelligentem, summe potentem et a qua... omne est creatum*» [12]., pp. 72-74.

¹⁷ *Ivi*, pp. 87-89.

¹⁸ Si veda l'analisi dell'uso estremo della «filosofia meccanica» in [48] pp. 190-195.

¹⁹ Nieuwentyt in particolare aveva fatto della lotta a Spinoza ed agli spinoziani (ovvero gli atei e i

libertini) la sua bandiera. Scriveva: «Le presenti considerazioni sono state scritte per convincere gli atei della potenza, saggezza e bontà del loro Dio, del venerabile creatore e reggitore di tutte le cose; per convincere i miscredenti – i quali certo riconoscono Dio ma non l'autorità della Sacra Scrittura – dell'origine oltreumana di questa Scrittura; infine, per mostrare ad entrambi il retto uso della contemplazione del mondo (*Weltbetrachtung*)». Cfr. [42] p. 69. Nieuwentyt contrastava l'argomentare scientifico-matematico degli atei come privo di fondamento, fintanto che esso permaneva privo della premessa dell'esistenza di Dio: «Il metodo di cui la matematica si serve per dischiudere le verità (fintanto che essa tratta di puri concetti), viene applicato perciò in modo del tutto scorretto alle cose reali» Questo tipo di scienziati, tra cui rientrava anche Spinoza, non poteva pretendere alcuna scientificità, in quanto le teorie di questi ultimi erano frutto di capriccio e fantasia: «[Essi possono] perciò in base a questo concludere tanto poco sulle cose reali quanto un astronomo potrebbe spacciare la rappresentazione che egli ad arbitrio s'è fatta di un cielo, come illustrazione della reale struttura (*Bau*) che vediamo sopra di noi». *Ivi*, p. 69-70 (traduzione mia).

²⁰ W. Bernardi, in [4] p. 45, fa opportunamente notare come nelle scienze della vita del XVII e XVIII secolo «gli stessi protagonisti si troveranno spesso a giocare ruoli diversi da quelli che si erano scelti»: coloro che volevano essere «solo scienziati» sosterranno ragioni teologiche, e i «filosofi», che volevano estromettere la teologia dal loro discorso, si tramuteranno in «cercatori di fatti».

²¹ Era questa la nota opinione espressa da Richard Popkin in [44] pp. 58-87.

²² Cfr. [46] pp. 89: «Così, anche se senza dubbio sminuirono l'importanza della rivelazione, molti polemisti protestanti e cattolici allo stesso modo difesero la propria religione sostenendo che le rispettive ragioni potevano essere sostenute da argomenti razionali, mentre per le ragioni dell'avversario ciò non valeva». Sul rapporto tra teologia e matematiche si veda [30] pp. 205-228; cfr. anche [54] pp. 31-78, dove il secolo XVII è per la teologia definito come «età della ragione».

²³ Cfr. [17] pp. 27-37.

²⁴ 'Disciplina rigorosa' qui altro non significa che la dedizione della scienza al dato verificabile per il quale valeva il motto newtoniano «*hypotheses non fingo*»; sul significato di quest'ultima espressione cfr., oltre quello che si è detto sopra, [48] p. 325-327, ma anche quanto acutamente dice Heidegger in [23] p. 77.

²⁵ Cfr. [48] pp. 107-148 e pp. 317-360.

²⁶ Su Spallanzani e la sua polemica con gli epigenisti e in particolare Needham cfr. M. Stefani, *L'ostinazione del 'bon père'. La controversia Needham-Spallanzani*, in [2] pp. 323-340.

²⁷ «E chi di voi, pur affannandosi, può aumentare di un sol cubito la propria vita?» Il testo greco suona: *tis de ex humôn merimnôn dunatai prostheinai epi tèn hêlikian autou pêchun hena*. Nella complessità della frase evangelica si può riscontrare una incoerenza, che tuttavia pare racchiudere la complessità della vita in quanto tale, tanto per quanto riguarda i misteri della nascita e della morte, quanto della conservazione. La voce greca *hêlikia* raramente significa «statura», come vorrebbe la Vulgata (che traduce: «*quis autem vestrum cogitans potest adicere ad staturam suam cubitum unum*»), mentre spessissimo sta ad indicare 'vita'; d'altronde il cubito, corrispondente a circa mezzo metro, non potrebbe significare per una persona «il più piccolo incremento della propria altezza»; d'altronde però il cubito, che è misura rilevante,

potrebbe solo analogicamente venir riferito alla durata della vita. In questo modo la frase potrebbe alludere alla impossibilità generale dell'uomo di influire e sulla durata della propria vita e sulla conservazione e accrescimento della medesima (come si dice nel medesimo Matteo, 5, 36: «né giurerai sul tuo capo, perché non potrai far bianco o nero un sol capello»).

²⁸ Sugli sviluppi attuali della genetica cfr. almeno [6].

²⁹ Per una discussione generale sull'uso di diverse tipologie di modelli in scienza, e per il loro significato, cfr. [5], in particolare pp. 67-96, e [25]. Alcune considerazioni sull'uso dei modelli in biologia si trovano anche in [28] e [9] (ringrazio l'Autore per la disponibilità). Si veda anche [15] pp. 113-172.

³⁰ Su questi punti si può vedere [16], e, per una critica del principio di ragion sufficiente fatto valere all'infinito, [21].

³¹ Cfr. A. Autiero, *Introduzione* in [53] pp. 26-27; nello stesso volume vedi anche L. Battaglia, *La bioetica come filosofia del ragionevole*, p. 171. Sulla bioetica in sé e sulle sue diverse interpretazioni la letteratura è sterminata. Qui indico soltanto alcuni volumi che possono servire da riferimento generale: con una distinzione schematica ma qui funzionale, distingo tra 'personalisti' e 'funzionalisti'. Per i primi vedi [14]; [36]; [37]; [38]; [50] pp. 7-32; [31]; per i secondi, oltre al già citato [16], [27], [51], e inoltre quanto scrive Vittorio Possenti su *www.portaledibioetica.it*.

³² Citazione ripresa dalla trascrizione di una conferenza ristampata in [8] p. 85.

³³ [29] p. 387.

³⁴ [13] p. 61. Questo brano viene tra l'altro riportato come esergo da Hemingway in *Per chi suona la campana*, che trae da esso il proprio titolo.

³⁵ Sulla concezione greca di verità cfr. [21].

³⁶ È questo anche il titolo di [40]. Qui Nietzsche si pone, a tinte forti, il problema dell'educazione di se stessi, per imparare chi si è e «non scambiarsi per altro» (p. 11). Il suo problema è naturalmente del tutto personale, autobiografico, eppure nella citazione della frase di Pilato egli ci mostra la consapevolezza che l'educazione di se stessi è qualcosa che va sempre al di là di sé e rimanda all'umanità in generale come compito complessivo della specie; si cfr. ad esempio la difficoltà di un tale compito espressa in [41] p. 3: «Siamo ignoti a noi medesimi, noi uomini della conoscenza, noi stessi a noi stessi...»; allo scopo di conoscerci «siamo sempre in cammino, come animali alati per costituzione, come raccoglitori di miele per lo spirito». La citazione evangelica di Nietzsche concorderebbe in questo senso con le letture «psicologistiche» dei Vangeli, che vedono in Gesù un educatore degli uomini, che vorrebbe far sì che i suoi discepoli si «facciano» uomini (Gesù come «figlio dell'uomo»). Ma una interpretazione di questo tipo in chiave teologica, la offre anche Dietrich Bonhoeffer in *Etica*, nel capitolo «Funzione formativa dell'etica», in cui parla del diventare «uomini fino in fondo» conformandosi a Cristo. Cfr. [7] p.70. Il «diventare ci che si è» rappresenta in questo senso la vera essenza umana, contrapposta a quella del Dio che dice «Ego sum qui sum» (Ex., 3, 14).

³⁷ Cfr. [24], §27 (traduzione mia).

BIBLIOGRAFIA

- [1] Agazzi, E. (a cura di), *Il concetto di progresso nella scienza*, Feltrinelli, Milano 1976.
- [2] Bernardi W., Manzini P. (a cura di), *Il cerchio della vita*, Olschki, Firenze 1999.
- [3] Bernardi, W., *Filosofia e scienze della vita. La generazione animale da Cartesio a Spallanzani*, Loescher, Torino 1980.
- [4] Bernardi, W., *Le metafisiche dell'embrione. Scienze della vita e filosofia da Malpighi a Spallanzani (1672-1793)*, Olschki, Firenze 1986.
- [5] Black, M., *Modelli, archetipi, metafore*, Pratiche, Parma 1992.
- [6] Boncinelli, E., *I nostri geni: la natura biologica dell'uomo e le frontiere della ricerca*, Einaudi, Torino 1998.
- [7] Bonhoeffer, D., *Etica*, Bompiani, Milano 1969.
- [8] Campbell, J., Stock, G. (a cura di), *Engineering the human germline. An exploration of the Science and Ethics of Altering the Genes*, Oxford University Press, New York, 2001.
- [9] Celi, L., *Concetti, similarità e teoria: verso il modello ibrido*, Tesi di laurea (rel. Carlo Marletti), Università di Pisa, a.a. 2000/2001.
- [10] Cohen, I. B., *La rivoluzione newtoniana*, Feltrinelli, Milano 1982.
- [11] Comte, A., *Corso di filosofia positiva*, UTET, Torino 1967.
- [12] Descartes, R., *Meditazioni metafisiche*, Laterza, Roma-Bari 1997.
- [13] Donne, J., *Devozioni per occasioni d'emergenza* [a cura di P. Colaiacomo], Editori Riuniti, Roma 1992.
- [14] Engelhardt, H. T., *Manuale di bioetica*, Il Saggiatore, Milano 1999.
- [15] Feltovich P. J. (*et al.*), The nature of conceptual understanding in biomedicine: the deep structure of complex ideas and the development of misconceptions, *Cognitive Science in Medicine: Biomedical Modelling*, a cura di D. Evans e V. Patel, MIT Press, Cambridge MA 1989.
- [16] Fukuyama, F., *L'uomo oltre l'uomo: le conseguenze della rivoluzione biotecnologica*, Mondadori, Milano 2002.
- [17] Funkenstein, A., *Teologia e immaginazione scientifica dal Medioevo al Seicento*, Einaudi, Torino 1996.
- [18] Galilei, G., *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, in *Opere di Galileo Galilei*, a cura di F. Brunetti, vol. II (6), UTET, Torino 1980.
- [19] Galilei, G., *Il Saggiatore*, in *Opere di Galileo Galilei*, a cura di F. Brunetti, vol. I., UTET, Torino 1980.
- [20] Guicciardini N., Shank J. B., Shapiro A. E., Newton and Newtonianism, *Early Science and Medicine* (2004), 9 (3), special issue.
- [21] Heidegger, M., *Che cos'è la metafisica?*, Adelphi, Milano 2001.
- [22] Heidegger, M., *Essere e tempo*, a cura di P. Chiodi, UTET, Torino, 1978.
- [23] Heidegger, M., *L'epoca delle visioni del mondo*, in *Sentieri interrotti*, La Nuova Italia, Firenze 1999.

- [24] Herder, J. G., *Briefe zur Beforderung der Humanität*, Dritte Sammlung (1794), Deutscher Klassiker, Francoforte sul Meno 1991.
- [25] Hutten, E. H., The role of models in physics, *British Journal for the Philosophy of Science*, IV, 1953-54 (34).
- [26] Jacob, F., *La logica del vivente. Storia dell'ereditarietà*, Einaudi, Torino 1971.
- [27] Jonas, H., *Il principio responsabilità. Un'etica per la civiltà tecnologica*, Einaudi, Torino, 2002.
- [28] Jonas, H., *Tecnica, medicina ed etica: prassi del principio responsabilità*, Einaudi, Torino 1997.
- [29] Kant, I., *Critica della ragion pratica* (tr. di V. Mathieu), CDE, Milano 1995.
- [30] Lafont, G., *Storia teologica della Chiesa*, San Paolo, Cinisello Balsamo 1997.
- [31] Lecaldano, E., *Dizionario di bioetica*, Laterza, Roma-Bari 2002.
- [32] Maglo, K., *The Reception of Newton's Gravitational Theory by Huygens, Varignon, and Maupertuis: How Normal Science may be Revolutionary*, in *Perspectives on Science*, vol. 11, n. 2, Summer 2003.
- [33] Mamiani, M., *Introduzione a Newton*, Laterza, Roma-Bari 1990.
- [34] Manuel, F., *The religion of Isaac Newton*, Clarendon Press, Oxford 1974.
- [35] Merton, R. K., *Sulle spalle dei giganti: poscritto shandiano*, Il Mulino, Bologna, 1991.
- [36] Mori, M., *La bioetica: questioni morali e politiche per il futuro dell'uomo*, Bibliotechne, Milano 1991.
- [37] Mori, M., *La fecondazione artificiale. Una nuova forma di riproduzione umana*, Laterza, Roma-Bari 1995.
- [38] Mori, M. (a cura di) *Bioetica laica*, Baldini & Castoldi, Milano 1998.
- [39] Newton, I., *Naturalis Principia Mathematica, Editio tertia aucta & emendata*, Londini, apud Guil. & Joh. Innys, Regiae Societatis typographos, MDCCXXVI (tr. it. *Principi matematici di filosofia naturale*, UTET, Torino, 1965).
- [40] Nietzsche, F., *Ecce Homo. Come si diventa ciò che si è*, Adelphi, Milano, 1996 (53).
- [41] Nietzsche, F., *Genealogia della morale*, Adelphi, Milano, 1995 (54).
- [42] Nieuwentyt, R., *Rechter Gebrauch der Weltbetrachtung, Das Zeitalter der Aufklärung*, in a cura di W. Philipp, nella collana *Klassiker des Protestantismus*, a cura di C. M. Schröder, tomo VII, Schunemann, Brema 1965.
- [43] Osler, M. J. (a cura di.), *Rethinking the Scientific Revolution*, CUP, Cambridge, 2000.
- [44] Popkin, R., Scepticism and the Counter-Reformation in France, *Archiv für Reformationsgeschichte*, 51, 1 (1960).
- [45] Roger, J., *Le sciences de la vie dans la pensée française du XVIII^e siècle. La gènèration des animaux de Descartes à l'Encyclopedie*, Colin, Parigi 1963.
- [46] Rosa, S., Seventeenth-century catholic polemic and the rise of cultural rationalism: an example from the empire, *Journal of the History of Ideas*, 57, 1 (1996).

- [47] Rossi, P. (a cura di), *Storia della scienza moderna e contemporanea*, 6 voll., UTET, Torino 1988.
- [48] Rossi, P., *La nascita della scienza moderna in Europa*, Laterza, Roma-Bari 2004.
- [49] Rossi, P., *Naufrazi senza spettatore: l'idea di progresso*, Il Mulino, Bologna 1995.
- [50] Scarpelli, U., La bioetica. Alla ricerca dei principi, *Biblioteca della libertà* (1987), 99.
- [51] Sgreccia, E., *Manuale di bioetica*, 2 voll, Vita e Pensiero, Milano 2005.
- [52] Solinas, G., *Il microscopio e le metafisiche. Epigenesi e preesistenza da Cartesio a Kant*, Feltrinelli, Milano 1967.
- [53] Viafora, C. (a cura di), *Introduzione a Centri di bioetica in Italia*, Fondazione Lanza e Gregoriana Libreria Editrice, Padova 1993.
- [54] Vilanova, E., *Storia della teologia cristiana*, III, Borla, Roma 1995.

IL CERVELLO E L'ENIGMA DELLE LINGUE IMPOSSIBILI*

ANDREA MORO

Università Vita – Salute San Raffaele, Milano

1. Un fatto e una domanda

C'è un fatto che la linguistica contemporanea ha fatto emergere con chiarezza e che costituisce uno dei punti di rottura più vistosi rispetto alla tradizione: non tutte le grammatiche concepibili sono realizzate. Prima di questa scoperta, l'idea era che, una volta isolate le regole di una lingua, qualsiasi combinazione di queste regole, purchè coerente ed esauriente, potesse essere la base di una possibile lingua umana. Le ricerche a tutto campo partite in modo indipendente negli anni cinquanta del secolo scorso dai lavori di due linguisti americani, Joseph Greenberg e Noam Chomsky, hanno infranto questa ipotesi:¹ da una parte, si è capito che le regole esistenti tendono a raggrupparsi in insiemi tipici (ad esempio la stragrande maggioranza delle lingue nelle quali il complemento oggetto segue il verbo le preposizioni precedono il nome cui si riferiscono); dall'altra, intere famiglie di regole concepibili – sulle quali torneremo nel prossimo paragrafo – non sono realizzate in nessuna lingua.

Naturalmente, come sempre accade nella scienza, l'assenza di una classe di fenomeni concepibili in puri termini combinatori pone immediatamente una domanda: *perché* non tutte le grammatiche concepibili non sono realizzate? Una domanda di questo tipo impone anche una riflessione su quali strumenti siano più adatti ad offrire una risposta e, va detto chiaramente, non esiste a priori un argomento privilegiato sul quale basarsi. In questo articolo vorrei mostrare – prendendo come base due esperimenti cui ho preso parte - come la combinazione delle tecniche di neuroimmagini e della linguistica teorica stia dando contributi innovativi, anche dal punto di vista metodologico, verso la soluzione di questo enigma.

2. Possibile e impossibile in grammatica

Il linguaggio ed anche la grammatica sono oggetti naturali complessi, troppo complessi per essere trattati integralmente: al pari del mondo fisico, per procedere nella ricerca occorre circoscrivere il dominio d'indagine in modo tale da poter porre delle domande accessibili alla sperimentazione, vale a dire, fondamentalmente, delle domande semplici. Nel caso della linguistica un passo fondamentale è stato quello di concentrare l'attenzione sulla sintassi, cioè su quel componente della grammatica che stabilisce l'ordine delle parole nella frase e le dipendenze tra una parola ed un'altra. Ad esempio, per quanto riguarda l'ordine delle parole, la sintassi (uno dei componenti caratteristici della grammatica) ci dice che in italiano l'articolo precede il nome cui si riferisce come

in *la stella* mentre in lingue come il basco l'espressione equivalente avrebbe l'ordine inverso: *izarr-a*. Per quanto riguarda invece la dipendenza tra parole, possiamo avere un'idea del tipo di struttura coinvolta con questo semplice esempio. In italiano, il soggetto si accorda con il verbo in numero; dunque, diciamo *le ragazze corrono* e non *le ragazze corre*. Ma la sequenza *le ragazze corre* non è affatto *di per sé* agrammaticale. Per quanto sorprendente, è facile convincersi di questo fatto prendendo in esame una frase come *un ragazzo che ama le ragazze corre*: in questa frase, la sequenza *le ragazze corre* è grammaticale perché non vi è dipendenza di numero tra *le ragazze* e *corre*, bensì tra *un ragazzo* e *corre*, come se la sequenza *che ama le ragazze* non fosse 'visibile' per quanto riguarda il fenomeno dell'accordo di numero. Si dice tecnicamente che si tratta di una dipendenza sintattica «non locale» o «a distanza», volendo sottolineare che, malgrado le parole si presentino come una fila di elementi adiacenti, le relazioni che esse sottendono possono essere create indipendentemente dall'adiacenza e a distanze variabili. Anzi, l'ipotesi è che tutte le relazioni sintattiche più importanti siano relazioni indipendenti dall'adiacenza.²

Di questo genere di fenomeni si occupa la sintassi e nel corso degli ultimi cinquant'anni la sintassi ha assunto un ruolo centrale nella ricerca in linguistica, paragonabile a quello che ebbe la fonologia nell'Ottocento. L'importanza della sintassi, inoltre, è dovuta al fatto che solo il linguaggio degli esseri umani è dotato di questo componente capace di costruire relazioni a distanza. Per nessun'altra specie vivente infatti il linguaggio contiene un componente sintattico così sofisticato, nemmeno i primati, malgrado ipotesi contrarie continuino ad essere diffuse senza molto rispetto per risultati scientifici attestati.³

Concentrandosi sulla sintassi, è possibile cogliere in modo abbastanza semplice cosa si intenda per «grammatica impossibile». Facciamo un esempio: in italiano, una frase affermativa come *Pietro parla* può essere negata mettendo la parola *non* tra la prima e la seconda, cioè dicendo: *Pietro non parla*. Nessuno, tuttavia, penserebbe ad enunciare la regola dicendo che la negazione di una frase in italiano si fa mettendo la parola *non* dopo la prima parola della frase (o dopo qualsiasi altra posizione fissa). Infatti, dalla frase *colui che conosce Pietro parla* non posso derivare *colui non che conosce Pietro parla*, semmai *colui che conosce Pietro non parla*. Anche in questo caso si può generalizzare dicendo che in nessuna lingua nessuna regola può basarsi sul numero delle parole di una frase o su una posizione specifica nella sequenza lineare delle parole: per tutte le lingue valgono dipendenze a distanza che non dipendono affatto dal numero delle parole di una frase; questo principio universale si definisce tecnicamente «dipendenza dalla struttura».

Non c'è niente di intrinsecamente impossibile in regole di questo tipo – tant'è che per gioco o per necessità di utilizzare codici segreti – potremmo benissimo immaginare lingue artificiali con regole che si basano proprio sull'ordine delle parole; tuttavia, di fatto nessuna lingua umana contiene regole di questo tipo. Escludendo l'ipotesi banale che si tratti semplicemente di una trascuratezza nella descrizione dei dati disponibili o

di una mancanza accidentale,⁴ questo dato può di per sé diventare uno spunto nuovo per lo studio del linguaggio.

3. Né hardware né software

Partiamo con un luogo comune. Spesso si sente dire che il cervello è assimilabile all'hardware di un computer e le lingue al software. Nel cervello umano, che è sempre lo stesso, al variare degli individui, potrebbe dunque 'girare' qualunque tipo di software. In un certo senso questo è certamente vero: non esiste nessuna resistenza in un cervello ad accettare che al concetto di 'luna' corrisponda il suono trascritto come *luna* o *Mond*. Ma questo modello regge quando si parla di sintassi? Come abbiamo appena detto, una delle scoperte fondamentali della linguistica moderna è il fatto che non tutte le grammatiche concepibili sono effettivamente realizzate.⁵

Possiamo dunque chiederci se una grammatica impossibile può 'girare' nel cervello come qualsiasi altro tipo di grammatica. Intendiamoci: come si diceva poc'anzi, una persona può certamente, per gioco o per altri motivi, inventare grammatiche impossibili ed utilizzarle; la domanda che ci poniamo ora è se queste grammatiche sfruttano le attività neuronali che sono quelle *tipicamente* dedicate all'elaborazione del linguaggio o no. Fino agli anni '80 del secolo scorso, una domanda di questo tipo era certamente improponibile: l'unica certezza – basata fondamentalmente su dati di tipo clinico e neuroanatomico – era che il linguaggio viene elaborato nel cervello da sistemi dedicati, che crucialmente coinvolgono l'emisfero sinistro, in particolare la cosiddetta 'area di Broca' (scoperta sul finire dell'Ottocento da un medico francese).⁶

La svolta nella ricerca sulla struttura neurofunzionale del cervello è avvenuta con l'invenzione di macchine che sono in grado di esplorare alcuni aspetti funzionali del cervello, come ad esempio l'emodinamica cerebrale – cioè le variazioni di flusso ematico nel cervello, e di metterle in relazione ad attività specifiche. In termini semplici, tramite apparati che abbinano l'informatica con la radiologia (come ad esempio la tomografia ad emissione di positroni (PET) o la risonanza magnetica funzionale (fMR)), è ora possibile misurare in vivo le variazioni di flusso ematico in relazione a determinati compiti. La variazione di flusso viene interpretata come variazione di energia impiegata dal tessuto nervoso e quindi in definitiva come indice di attività neuronale. L'impiego di questi apparati sta conoscendo uno sviluppo straordinario e non è certo sorprendente che anche nello studio del linguaggio si stia assistendo ad un'esplosione di lavori in questo campo. Tuttavia, come sempre nella scienza, le macchine di per sé non dicono nulla se non si adotta un modello teorico sulla base del quale indagare i dati. In questo caso, la linguistica teorica ha fornito un modello possibile per indagare la relazione tra linguaggio e cervello. Vediamo ora, molto sinteticamente, due tappe in questo percorso, tenendo in mente che ci stiamo concentrando sulla sintassi.⁷

Il primo risultato è stato quello di verificare se alla nozione di sintassi corrispondesse effettivamente un'attività neuronale specifica: non è affatto detto, infatti, che a priori si possa ammettere che ciò che noi definiamo come «sintassi» corrisponda ad un'attività

specifica nel cervello. Potrebbe benissimo essere che il cervello funzioni in modo diverso da come i linguisti hanno descritto, indipendentemente dai dati neurologici, sulla sola base dell'osservazione delle regolarità delle lingue. Invece, il primo risultato sorprendente è che l'attività sintattica corrisponde proprio ad una precisa attività neuronale dedicata, almeno nel senso che è distinta da altre attività di tipo linguistico-grammaticale, come ad esempio la fonologia (il controllo dei suoni corretti di una lingua) o la semantica (l'apparato che computa i significati di una lingua). Per ottenere questi risultati, si è ricorsi ad uno stratagemma per 'ingannare' il cervello: quello degli «errori selettivi». Essendo infatti impossibile per definizione che un soggetto attivi *solo* il componente sintattico senza attivare anche gli altri, l'idea è stata quella di capovolgere la situazione costruendo degli errori di tipo sintattico e confrontandoli con errori di altri tipi. L'aspettativa era di vedere se il riconoscimento di ciascun tipo di errore attivasse sistemi neuronali specifici. Questo di fatto si è verificato, portando con ciò un forte dato a favore dell'ipotesi che la sintassi si basi su una rete dedicata: sarebbe estremamente difficile a questo punto ammettere il contrario, anche se, come del resto accade sempre nelle scienze sperimentali, non si può mai dire di aver ottenuto una *prova definitiva* di questa ipotesi.

Una volta identificata la rete dedicata (che coinvolge l'emisfero sinistro, ed in particolare l'area di Broca ed il nucleo caudato), è stato possibile affrontare in modo diretto la questione delle grammatiche impossibili. Anche in questo caso, la linguistica teorica, in particolare la teoria della sintassi, ha svolto un ruolo fondamentale. Il punto di partenza è stato proprio il principio di dipendenza dalla struttura, cioè – lo ripeto per comodità – il fatto che in nessuna lingua nessuna regola può basarsi sul numero delle parole di una frase o su una posizione specifica nella sequenza lineare delle parole. Partendo da questa base teorica non è stato difficile progettare a tavolino regole impossibili. Una di queste era proprio quella della negazione descritta poco fa. Ad un gruppo di soggetti monolingui sono state impartite alcune lezioni di una lingua straniera mettendo nelle regole della nuova lingua anche delle regole impossibili. Nella fattispecie si è fatto un controllo «doppio», nel senso che dopo aver insegnato ad un gruppo di soggetti germanofoni un “frammento” della lingua italiana è stata poi insegnata loro anche un frammento della lingua giapponese (sempre includendo anche regole impossibili) per escludere che due gli effetti osservati potessero essere ‘sporcati’ dal fatto che il tedesco e l'italiano appartengano alla stessa famiglia, quella delle lingue indoeuropee. Il risultato è stato che i soggetti riuscivano sì ad apprendere anche le regole impossibili ma l'attività neuronale correlata all'apprendimento di tali regole non era quella tipica del linguaggio.

Dunque, il modello che si basa sull'analogia con il computer non può essere accettato, almeno messo in questi termini: il cervello infatti nel complesso appare in grado di gestire grammatiche impossibili, ma se si guarda la sede naturale dove i processi linguistici vengono trattati, allora le cose cambiano. In altri termini, il cervello “si rifiuta” di trattare regole grammaticali che non dipendono dalla struttura utilizzando lo stesso

sistema neuronale dedicato che serve per le regole naturali: smista automaticamente i dati facendoli trattare da altri sistemi. Se proprio vogliamo mantenere la metafora del computer, dovremmo forse dire che le lingue umane sono quell'unico software che l'hardware costituito dal nostro cervello riesce ad esprimere. Il che è come dire che la metafora non tiene affatto.⁸

4. Vedere l'infrarosso e le regole della grammatica

Ammettiamo di aver 'dimostrato' che la distinzione tra regole possibili ed impossibili basata sulla dipendenza della struttura abbia effettivamente un correlato neurofunzionale; se questo è vero, la domanda forse più importante che ci si può porre ora è *perché* le cose stiano così. Perché l'apparato che sottintende in modo naturale al trattamento dei dati linguistici non accetta tutte le grammatiche concepibili? Esistono almeno tre tipi possibili di risposte.

La prima è che sia un caso: che, cioè, non ci sia alcuna spiegazione funzionale per questo stato di cose. Che l'uomo sia costruito in questo modo o in un altro sarebbe, dal punto di vista dell'impatto con l'ambiente, del tutto equivalente. Questa risposta, ovviamente, sarebbe la meno interessante. Un secondo tipo di risposta, meno banale, è invece che i tipi di regole esistenti abbiano una qualche funzione: ad esempio, riducano l'ambiguità delle informazioni trasmesse o ne facilitino la comprensione. In questo caso, una regola come quella della negazione potrebbe ad esempio facilitare la comprensione dell'effetto della negazione stessa sulla frase: se essa può stare solo in alcune posizioni, allora non si deve ad ogni parola aspettare che quella stessa parola possa essere negata. Questa è ovviamente un'ipotesi ragionevole. Tuttavia sembra contrastare con un altro fatto – per altro non accettato da tutti i linguisti – secondo il quale non c'è niente di funzionale alla comunicazione nella struttura del linguaggio. Tale struttura è *compatibile* con la comunicazione ma non è *progettata* a tal fine, così come (quasi) tutti i tratti biologicamente selezionati, secondo quel fenomeno chiamato «transadattamento» da Stephen Jay Gould. È noto, ad esempio, che le ali di alcuni insetti si siano evolute a partire da un formato così ridotto da non poter servire come mezzo di locomozione ma solo come scambiatori di calore.⁹ Vedere adesso nelle ali di questi insetti un *progetto* funzionale alla locomozione sarebbe come minimo un anacronismo. Lo stesso potrebbe essere del linguaggio. Non si sta dicendo naturalmente che il linguaggio non serva per comunicare; semplicemente si vuole sottolineare che *malgrado i difetti* è utile per comunicare e che, certamente, non è progettato per la miglior comunicazione possibile (sempre ammesso che un tale concetto sia definibile).¹⁰

Esiste tuttavia anche un terzo tipo di risposta possibile, anch'essa funzionale ma non rispetto alla comunicazione, rispetto ad un altro fenomeno non meno importante e delicato nell'equilibrio della specie: l'apprendimento del linguaggio. A partire da dati clinici e da studi sui bambini, si sa infatti che il linguaggio deve essere appreso entro i limiti imposti dalla programmazione biologica dello sviluppo dell'organismo. Al pari di altre funzioni, cognitive e non, una certa lingua, per poter essere appresa

spontaneamente, deve essere parte degli stimoli non oltre la pubertà come limite massimo di sviluppo, ed in generale entro i primi cinque o sei anni di vita di un individuo: poi l'individuo mantiene certo la possibilità di apprendere altre lingue (Catone, lo dicevano i Latini, apprese il greco nella sua vecchiaia) ma lo fa sfruttando altre capacità del cervello e con sforzo, con impegno e studio, non certo spontaneamente come per i bambini. Ma che c'entra tutto questo con il fatto che non tutte le lingue concepibili siano realizzate? Un'ipotesi potrebbe essere proprio che la necessità di apprendere una lingua entro il periodo limitato dalla programmazione biologica sia ciò che viene favorito dall'assenza di intere classi di grammatiche. In altri termini, non c'è nulla nelle regole possibili che le renda migliori da quelle impossibili: ciò che conta è solo il fatto di avere come possibili solo alcune tra le regole concepibili, fornendo con ciò un vantaggio nell'apprendimento. Lo stato attuale delle cose sarebbe dunque un punto di equilibrio tra due forze contrarie: l'esigenza di strutture sufficientemente ricche da veicolare informazione e la semplicità di apprendimento spontaneo nei limiti imposti dalla programmazione biologica. Ciò che importa dunque è il fatto di avere solo alcune regole possibili. Ma non è inconcepibile immaginare un mondo possibile dove ad essere realizzate fossero proprio solo le regole che *non* dipendono dalla struttura: il vantaggio per l'apprendimento potrebbe essere uguale.

Per meglio capire la situazione possiamo prendere come esempio uno scenario di verso: quello della visione. L'occhio umano, si sa, è sensibile solo ad una gamma ridotta delle frequenze delle radiazioni elettromagnetiche. Ciò che noi chiamiamo 'luce' (composta da vari colori) non è altro che lo spettro di onde comprese tra i 380 e i 780 nanometri, cioè tra il violetto e il rosso, passando per azzurro, verde, gialloverde (intorno ai 550 nanometri, dove la sensibilità dell'occhio umano è massima), giallo e arancio. Al di sotto dei 380 nm si ha la luce ultravioletta e al di sopra dei 780 nm quella infrarossa. Perché vediamo solo questa gamma di onde? Naturalmente, una risposta strutturale sta nella conformazione citologica e neurologica dell'occhio umano e del sistema neurologico che elabora i dati, ma ovviamente la domanda può essere portata ad un livello diverso e chiedersi non *come* succede che vediamo questa gamma ma *perché* vediamo questa e non un'altra: la situazione sarebbe parallela a quella del linguaggio. Infatti, possiamo benissimo immaginarci un mondo dove l'occhio umano possa vedere anche la luce infrarossa. Avrebbe vantaggi la specie umana da ciò? Certamente sì, perché ad esempio vedrebbe 'al buio' gli oggetti e gli organismi che emanano calore, eviterebbe di scottarsi percependo la temperatura come un colore ... Perché dunque l'evoluzione non ha selezionato mutanti adatti a percepire quelle frequenze?

Ci possono essere motivi fisici e strutturali insormontabili – non lo discuto neppure – ma semplicemente non è vero che ci sono motivi intrinseci che rendono implausibile pensare ad un essere umano che veda anche gli infarossi. Anzi, in linea di principio – come abbiamo detto – sembrerebbero esserci vantaggi in un mutante di questo tipo: il fatto è che quello attuale è un equilibrio possibile, date le condizioni generali. Ed anche in questo caso non sarebbe implausibile nemmeno ammettere che se l'occhio vedesse

una gamma molto più vasta di onde elettromagnetiche, il cervello sarebbe 'caricato' troppo sia nel momento dell'apprendimento della struttura spaziale del mondo che nella vita adulta. Non possiamo dunque escludere che uno dei fattori che contano per questo stato di equilibrio sia la semplicità di apprendimento e il minor carico di informazione.

Naturalmente, il paragone tra linguaggio e visione si ferma qui e rimane solo un paragone: ma se l'ipotesi che tra tutte le grammatiche concepibili quelle realizzate non sono che un'opzione tra tante possibili, forse questo potrebbe portarci a capire meglio la struttura e la natura stessa del linguaggio.

NOTE

* Il contenuto di questo articolo è una sintesi estrema di alcuni temi affrontati ne *I confini di Babele. Il cervello e il mistero delle lingue impossibili* (Longanesi, Milano, 2006): a questo rimando per una trattazione dettagliata ed una bibliografia completa. Il testo è qui ripubblicato per gentile concessione della rivista *Kos* (Europa Scienze Umane Editrice) su cui è apparso con il titolo “L’enigma delle lingue impossibili” nel fascicolo 239-240 del 2005, pp. 46-52.

¹ Si veda ad esempio [5] e [1]. Per una valutazione critica ed la storia dello sviluppo di questi temi si veda invece [4].

² Per una discussione critica di quest’ipotesi si veda [2] e la discussione in [9].

³ Mi riferisco per esempio, ai lavori ormai classici di Laura Petitto, come [13].

⁴ Ovviamente, sempre nelle scienze sperimentali ci si può chiedere se si sono osservati bene tutti i dati giusti. Newton forse avrebbe dovuto controllare tutte le mele. Ma fidandosi del proprio intuito e del senso di ragionevolezza, la ricerca procede ipotizzando di essere di fronte ad una generalizzazione corretta. Se poi qualche mela cadrà verso l’alto, la teoria verterà cestinata.

⁵ Un’altra scoperta, in un certo senso complementare, è che tutte le sintassi di tutte le lingue umane seguono esattamente lo stesso impianto strutturale: le differenze sono riconducibili a pochi punti di variazione, chiamati tecnicamente «parametri». Essendo il sistema molto complesso, non ci si stupisce che poche differenze abbiano un effetto macroscopico così vistoso, esattamente come oggi non ci si stupisce di ammettere che differenze di ordine (e quantità) *delle stesse basi azotate* lungo la catena del DNA possano condurre ad organismi così diversi come un maiale e una farfalla. Per un’illustrazione di questo modello, detto a «principi e parametri» si veda [2] e, per una versione divulgativa [3].

⁶ Si veda a questo proposito il lavoro fondamentale di Eric Lenneberg [7].

⁷ I due esperimenti qui descritti corrispondono ai seguenti due articoli: [10] e [11]. Per una rassegna critica di alcuni lavori e per un commento al secondo lavoro si vedano rispettivamente: [6] e [8].

⁸ Una delle principali sfide della linguistica moderna è proprio quella di capire in quale modo la struttura fisica del cervello (ed in generale dell’organismo) possa influenzare la struttura della grammatica. Per questi temi si veda [3] e [9].

⁹ Si veda a questo proposito, tra gli altri, [14].

¹⁰ L’efficacia della comunicazione può essere solo valutata in modo relativo, come ammette la cosiddetta teoria della comunicazione che fa capo ai lavori di Shannon (a partire almeno da [12]).

BIBLIOGRAFIA

- [1] Chomsky, N., *Lectures on Government and Binding*, Foris, Dordrecht 1981.
- [2] Chomsky, N., *The minimalist program*, MIT Press, Cambridge (Mass.) 1995.
- [3] Chomsky, N., *On Nature and Language*, Cambridge University Press, Cambridge 2002.
- [4] Graffi, G., *200 Years of Syntax. A critical survey*, John Benjamins, Amsterdam 2001.
- [5] Greenberg, J. H., a cura di, *Universals of Language*, MIT Press, Cambridge (Mass.) 1963.
- [6] Kaan, E., Swaab, T. Y., The brain circuitry of syntactic comprehension, *Trends in Cognitive Sciences*, 6 (2002), pp. 350-356.
- [7] Lenneberg E., *Biological Foundations of Language*, John Wiley & Sons, New York 1967; trad. it. *I fondamenti biologici del linguaggio*, Boringhieri, Torino 1982.
- [8] Marcus, G., Vouloumanos, A., Sag, I. A., Does Broca's play by the rules, *Nature neuroscience*, 6 (2003), pp. 651-652.
- [9] Moro, A., *Dynamic Antisymmetry*, Linguistic Inquiry Monograph Series 38, MIT Press, Cambridge (Mass.) 2000.
- [10] Moro, A., Tettamanti, M., Perani, D., Donati, C., Cappa, S. C., Fazio, F., Syntax and the brain: disentangling grammar by selective anomalies, *NeuroImage*, 13 (2001), pp. 110-118.
- [11] Musso, M., Moro, A., Glauche, V., Rijntjes, M., Reichenbach, J., Büchel, C., Weiller, C., Broca's area and the language instinct, *Nature neuroscience* 6 (2003), pp. 774-781.
- [12] Shannon, C. E. A mathematical theory of communication, *Bell System Technical Journal*, 27 (1948) pp. 379-423 e 623-656.
- [13] Terrace, H. S., Petitto, L. A., Sanders, R. J., Bever, T. G. Can an Ape Create a Sentence?, *Science*, 206 (1979), pp. 891-902.
- [14] Wesson, R., *Beyond Natural Selection*, MIT Press, Cambridge (Mass.) 1991.

LA ROBOTICA*

CARLO ALBERTO AVIZZANO

Scuola Superiore di Studi Universitari Sant'Anna, Pisa

Introduzione

'Robot' è una parola coniata dallo drammaturgo ceco Karel Capek per indicare il lavoro non volontario. La parola è stata introdotta nella sua opera teatrale "R.U.R. (Rossum's Universal Robots)" messa in scena nel Gennaio 1921. Tuttavia, a differenza del concetto moderno, i robot di Capek erano dei servitori creati mediante procedimenti chimico/biologici e non erano meccanici. L'etimologia della parola 'Robot' è comunque da ricondursi al ceco *robota* che significa *schiavo*.



Oggi, con il termine 'Robotica' ci si riferisce allo studio e all'uso dei robot intesi come dispositivi elettromeccanici il cui comportamento viene controllato da opportuni comandi impartiti dall'uomo. Il termine 'Robot', nella sua accezione moderna, è stato utilizzato per la prima volta dallo scienziato e scrittore Isaac Asimov. Detto termine venne utilizzato nella pubblicazione *Runaround*, una storia pubblicata nel 1942, in cui Asimov riportò per la prima volta le ormai famose Leggi della Robotica. La storia fu poi ripresa nel successivo romanzo *Io, Robot*, dove fu introdotta l'idea del cervello positronico.

1. Le leggi della robotica

Le leggi della robotica sono successivamente state rielaborate e codificate dallo stesso scrittore, quindi pubblicate in un testo *Handbook of Robotics*. Le leggi, inizialmente

tre, sono poi state completate in quattro con l'aggiunta di una legge 0, aggiunta in seguito. Dette leggi codificano le norme etico/comportamentali che un qualsiasi robot deve rispettare. L'organizzazione delle leggi, piuttosto che identificare compiti specifici che un robot deve assolvere, si limita a definire il ruolo che questi strumenti possono assumere all'interno della società, vincolandone la propria autonomia di comportamento, rispettivamente alla sicurezza dell'uomo e dell'umanità, quindi alla sua manifestazione di volontà¹:

0. Un robot non deve provocare danno all'umanità sia tramite la sua azione che tramite un comportamento passivo [*Questa legge è stata aggiunta in seguito.*]
1. Un robot non deve ferire esseri umani o tramite la sua non azione consentire un danno agli stessi.
2. Un robot deve obbedire agli ordini degli esseri umani eccetto quando questi siano in contrasto con la prima legge.
3. Un robot deve agire per proteggere la sua stessa esistenza fintanto che tali azioni non siano in contrasto con le prime due leggi.

2. Definizione di robot

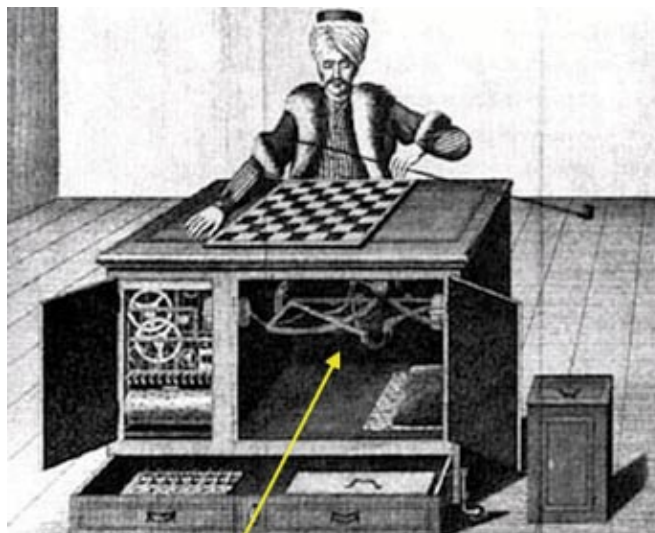
Un Robot è «un manipolatore riprogrammabile e multifunzionale progettato per spostare materiali, componenti, attrezzi o dispositivi specializzati attraverso vari movimenti programmati per la realizzazione di vari compiti» (Robot Institute of America, 1979). Il dizionario Garzanti invece riporta il termine 'Robot' come una «macchina automatica capace di svolgere, con opportuni comandi, alcune funzioni o attività proprie dell'uomo; automa meccanico».

In entrambi i casi ci si rende conto che la definizione di robot che possiamo trovare sulle fonti ufficiali, non risulta al passo con i tempi. In molti casi, mentre la visione di Isaac Asimov era oltremodo futuristica, queste definizioni si limitano ad un concetto di sistema robotico, limitato agli aspetti di automazione industriale tipici degli anni settanta. Gli sviluppi concorrenti delle tecnologie robotiche avuti nel corso degli anni ottanta/novanta hanno tuttavia rivoluzionato il concetto di robot, trasformandolo da strumento di servizio in ambienti industriali di tipo strutturato, in sistema di utilità e collaboratore dell'uomo nel suo stesso ambiente. Come vedremo, intelligenza artificiale, optoelettronica, microelettronica e mecatronica hanno concorrentemente contribuito ad eseguire questa trasformazione.

Ad oggi potremo definire 'Robot' un sistema elettromeccanico riprogrammabile, dotato di capacità di percezione e di un'intelligenza propria, predisposto per compiere un ampio numero di compiti diversi. I Robot si differenziano per applicazione, struttura ed attuazione in diverse categorie: da robot mobili a manipolatori industriali, da robot chirurgici a sistemi di addestramento.

3. Cenni storici

L'idea di realizzare dei sistemi meccanici autonomi ed intelligenti è abbastanza antica. Esempi di automatismi meccanici possono essere ricondotti all'antichità: la clessidra ad acqua ad esempio fu creata nel 250 a.c. da un fisico greco Ctesibius di Alessandria.



Il giocatore di scacchi, Wolfgang De Kempelen, 1769

1769

Wolfgang De Kempelen, un inventore Ungherese al servizio della imperatrice Maria Teresa di Vienna, sviluppò il giocatore di scacchi, un meccanismo apparentemente in grado di giocare automaticamente a scacchi, ma in realtà animato tramite un sistema di leveraggi interni, da un giocatore umano nascosto all'interno del congegno. A Kempelen si possono ricondurre numerosi contributi in termini della ricerca in robotica compresa la macchina parlante. Famosa è la sua pubblicazione al riguardo: *Mechanismus der menschlichen Sprache nebst Beschreibung einer sprechenden Maschine* (1791).

1921

Lo scrittore cecoslovacco Karel Capek introduce per la prima volta la parola Robot nel R.U.R. – Rossum's Universal Robots. La parola viene dal cecoslovacco 'robota', che significa lavoratore.

1938.

Il primo meccanismo programmabile per dipingere viene progettato da Willard Pollard e Harold Roselund (DeVilbiss Company).

1942.

Isaac Asimov pubblica *Runaround*, in cui definisce le tre leggi fondamentali della robotica.

1946.

Nasce l'elaborazione elettronica: George Devol brevetta un dispositivo di replicazione per il controllo di macchine che utilizza la registrazione magnetica; J. Presper Eckert

e John Mauchly costruiscono l' ENIAC all' università della Pennsylvania: il primo calcolatore elettronico.

Già nei primi anni '40, Grey realizza la sua "Machina speculatrix", un veicolo su ruote in grado di implementare un comportamento simile a quelli degli esseri viventi. Il veicolo, era infatti in grado di inseguire sorgenti luminose (Walter, W. Grey, "An Imitation of Life," Scientific American, May 1950, p42-45).

1948.

Norbert Wiener pubblica un libro (*Cybernetics or Control and Communication in the Animal*) che descrive i concetti di comunicazione e controllo in sistemi elettronici, meccanici e biologici. La Robotica 'vera', ovvero quella realizzata con sistemi e teorie scientifiche come noi oggi siamo abituati a vederla, nasce qualche anno più tardi.

1951.

In Francia presso la CEA (Commissione dell'Energia Atomica), Raymond Goertz progetta il primo sistema robotico teleroperato. Si tratta di un prototipo di pantografo meccanico, dotato di controlli e di pinze per realizzare la manipolazione a distanza sostanze radioattive. Uno spesso vetro, posizionato tra operatore e materiale contaminante, provvede a isolare l'uomo, mentre il meccanismo, sfruttando opportune proprietà cinematiche, riproduce fedelmente i movimenti del soggetto nell'ambiente ostile. Qualche anno più tardi sarà lo stesso Goertz a ripresentare il concetto di teleoperazione basato su un'architettura di controllo elettromeccanica e non più soltanto elettrica. È il primo passo verso l'automazione industriale, l'uomo mette le intenzioni e la macchina le esegue a distanza.

1954.

George Devol progetta il primo robot programmabile e conia il termine 'Automazione Universale' (che poi sarà usato per la compagnia UNIMATION) la prima compagnia di robotica al mondo.

1959.

Marvin Minsky e John McCarthy fondano il laboratorio di intelligenza artificiale al Massachusetts Institute of Technology (MIT). L'Istituto Tecnologico del Massachusetts, svolgerà successivamente un ruolo fondamentale sia come 'fabbrica di cervelli' nel campo della robotica, che come soggetto promotore di attività di ricerca e industriali.

1960.

La Unimation viene acquisita dalla Condec Corporation e inizia la produzione dell' Unimate Robot Systems. Quindi nel 1962 la General Motors acquista il primo robot industriale dalla Unimation per le sue linee di produzione.

1963.

John McCarthy fuoriuscito dal MIT, fonda il laboratorio di intelligenza artificiale alla Stanford University. Nel 1964 anche il Giappone fonda i suoi primi laboratori basati sulla teleoperazione elettrica.

1965.

La teoria delle trasformazioni omogenee rivoluziona la cinematica dei robot fornendo dei modelli analitici esatti per la pianificazione dei movimenti ed il calcolo delle leggi di controllo. Da questo punto in poi, le novità in campo scientifico e industriale si susseguono rapidamente. Solo per citarne alcune: nel 1967 il Giappone importa il suo primo robot (il Versatran) prodotto dalla AMF; nel 1968 La Kawasaki acquista la licenza di un progetto per robot idraulici ed inizia la sua prima produzione in Giappone.

1970.

Victor Scheinman (alla Stanford University) progetta lo Standard Arm²; viene progettato a Waseda il primo Humanoid Robot; è di questo periodo anche l'invenzione e l'introduzione commerciale dei primi microcomputer.

1973.

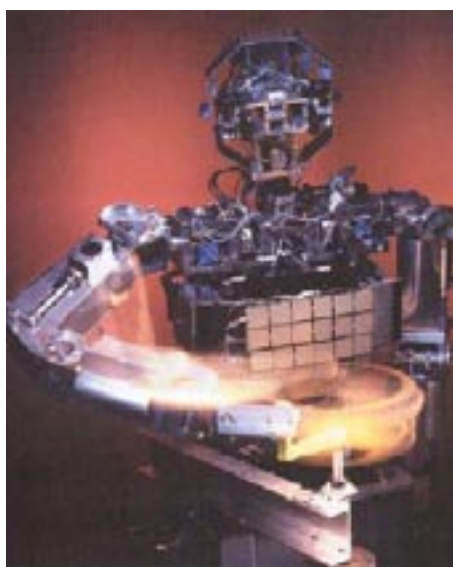
La Cincinnati Milacron commercia il T3, il primo robot industriale controllato da un minicomputer.

1976.

Braccia robotiche sono usate sulle missioni spaziali Viking 1 e 2.

4. La robotica umanoide

Sin dall'inizio della coniazione del vocabolo, il termine robot è stato strettamente associato a caratteristiche di sistemi elettromeccanici di tipo antropomorfi. La stessa rappresentazione del R.U.R. raffigurava un manichino dalla forma umana. Durante gli ultimi 50 anni, narrativa e cinematografia hanno prevalentemente immaginato la figura del robot come un essere meccanico dalle sembianze umane.



L'idea di ricostruire un robot dalle forme umane, è oggi solo una delle linee di ricerca della robotica moderna, la robotica umanoide, ma ciononostante costituisce tuttoggi una delle sfide più ambiziose sia per le complessità di percezione e meccaniche

insite, sia per la difficoltà di ricreare il coordinamento motorio che per l'intelligenza propria dell'azione di esseri umani.

I primi esperimenti di progettazione di robot dalle forme umane risalgono alle ricerche della Waseda university dei primi anni '70. Nonostante un trentennio abbondante di ricerca nel settore, tuttavia la realizzazione di un sistema che si avvicini alle prestazioni umane è ancora lontana. I due risultati più di successo nel settore sono il robot umanoide realizzato dalla Honda e presentato nel 1998 e il Sony Dreaming Robot, oggi alla sua 4 versione. Entrambi hanno capacità di locomozione e equilibrio, e sono in grado di eseguire dei compiti elementari in accordo a traiettorie e movimenti preimpostati.



5. Linee di sviluppo della robotica

La robotica prende piede nella società negli anni '70 come supporto alla produzione industriale. In quel periodo, l'ambiente in cui opera il robot e l'ambiente in cui opera l'uomo sono completamente separati al fine di garantire i margini di sicurezza agli operatori necessari. I primi robot inoltre operavano in ambienti completamente strutturati, ovvero dove le posizioni di tutti gli elementi con cui il robot doveva interagire erano note a priori. Successivi sviluppi della robotica, come la visione artificiale, hanno poi consentito di ridurre i vincoli imposti nell'ambiente.

Successivamente la robustezza e i fattori di sicurezza per gli operatori collegati all'impiego dei robot hanno indotto i ricercatori a progettare nuovi sistemi, detti di teleoperazione, in cui i robot siano capaci di trasportare in ambienti remoti e/o ostili le capacità di azione e destrezza di un operatore umano. L'avvento della teleoperazione ha introdotto nel paradigma di azione dei robot una profonda trasformazione dal momento in cui l'operatore doveva operare nello stesso spazio fisico del robot con cui interagisce.

Negli anni '90, gli ambienti virtuali hanno ulteriormente ridotto questa distanza tra operatore e robot, immaginando e realizzando una serie di dispositivi robotici (dette 'interfacce afferenti') tramite i quali l'operatore risulta in grado di interagire con l'ambiente virtuale e percepirne stimoli fisici. L'uso di questi dispositivi (aptici, tattili, termici) richiede che l'operatore indossi fisicamente una componente o tutto il meccanismo, in grado di trasmettere percezioni tramite aree di contatto. Gli ambienti

virtuali arricchiscono quindi la capacità di condividere l'ambiente tra sistema robotico e uomo, con la capacità di condividere le esperienze.



Un ulteriore sviluppo di questi sistemi viene dall'intelligenza artificiale, ad oggi infatti, un'ampia serie di sistemi robotici (quali gli ausili tecnologici, i robot reattivi, i cobot), consentono di condividere con l'operatore non solo l'interazione in termini di esperienza, ma anche in termini di intenzione.

È possibile suddividere le aree di ricerca ed applicazione della robotica in quattro grandi categorie:

- I robot industriali, i primi in ordine di applicazione, hanno oggi un vastissimo impiego in tutti i settori della produzione. Essi infatti consentono di ridurre costi e tempi di produzione e di poter modulare i costi in base ai volumi di produzione necessari. In aggiunta miglioramenti qualitativi dei prodotti, e la maggior sicurezza per il personale danno forti motivazioni a questo tipo di produzione. Nel campo della robotica industriale esistono manipolatori per decine di applicazioni differenti, solo per citarne alcune: verniciatura, assemblaggio, pulizia, ispezione, saldatura, montaggio, movimentazione, taglio, controllo qualità, rilevamento,... ed il numero di applicazioni sembra destinato ad aumentare con il tempo e l'autonomia raggiunta da questi dispositivi.



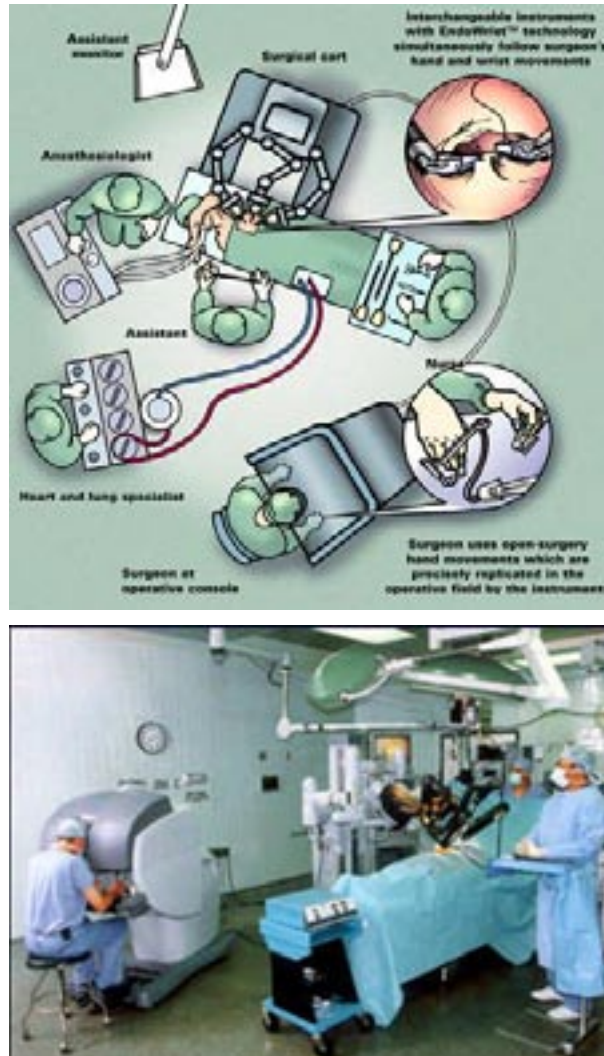


- I robot sociali, individuano una nuova applicazione della robotica destinata ad essere nel futuro uno strumento di interazione sociale. Eliminata la barriera della sicurezza, tramite una serie accurata di norme e di certificazioni, i robot possono entrare a far parte, come già i computer hanno fatto 20 anni fa, della vita sociale. Rispetto ai computer questi ultimi sembrano avere maggiori potenzialità espressive nel fatto che possono integrare le capacità multimodali con movimento e gestualità ai primi negati. Ad oggi lo sviluppo dei robot sociali è ancora limitato, si va da alcuni esempi commerciali a risultati perlopiù sperimentali.
- Robot per il gioco (il Sony Aibò, Mitsubishi Wakamaru, i Lego Mindstorm), per il cinema (l'animatronica) e l'assistenza agli anziani (domotica), sono ormai diffusi.
- Di più recente ricerca invece sono i robot per l'interazione artistica, lo sport e la musica.

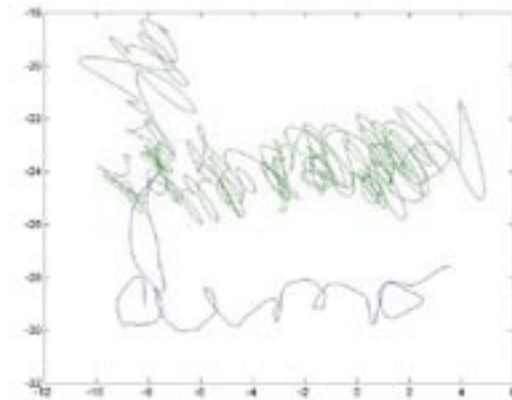
In ambito medico, l'impiego della robotica sta rivoluzionando sia la pratica chirurgica (Computer Aided Surgery) che quella di clinica (fisioterapia, assistenza tecnologica). Nel corso degli ultimi sette anni, diversi sistemi robotici sono stati progettati e commercializzati per completare gli apparati di chirurgia mini-invasiva, con strumentazione robotica in grado di rendere naturale ed intuitivo il processo di intervento.

Il sistema Da Vinci (Intuitive Surgical) ad esempio unisce un sistema di 'cardioscopia' ad un sistema di teleoperazione. Il sistema consente a un chirurgo seduto in una postazione prossima al paziente di operare tramite le dita come se le sue mani fossero realmente delle pinze all'interno del corpo del paziente. Un complesso sistema robotico provvede a raccogliere i movimenti delle dita del chirurgo e a trasmettere ad un sistema robotico di chirurgia mini-invasiva che l'*équipe* avrà collocato all'interno del corpo del paziente. Un sistema di camere stereoscopico consentirà inoltre al chirurgo di vedere direttamente all'interno del corpo del paziente come se le sue dita fossero ivi presenti. Il sistema produce notevoli effetti positivi con un conseguente risparmio sociale ed

economico: riduce tempi di recupero, riduce complicazioni dovute a infezioni post-operatorie, limita lo stress fisico. Tuttavia richiede una squadra medica altamente specializzata.



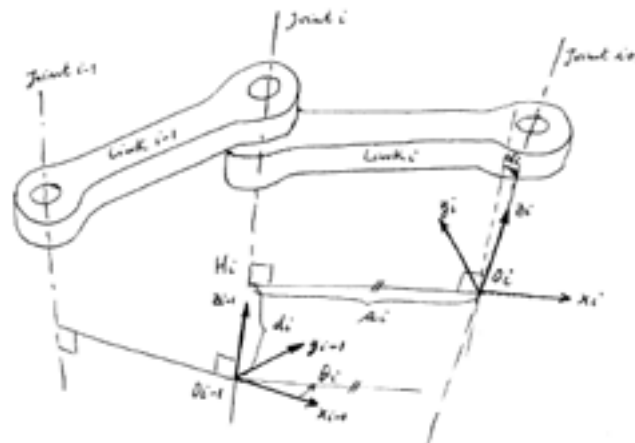
In ambito terapeutico esistono ad oggi diversi sistemi di riabilitazione neuro-motoria basati su interfacce robotiche controllate al computer. Questi sistemi possono essere applicati in diversi ambiti a seconda della patologia clinica. Ad esempio, smorzatori attivi del tremore possono essere impiegati in caso di sclerosi multipla o Parkinson; sistemi di registrazione ed ausilio motorio possono essere impiegati per esercizi post-traumatici o per particolari patologie che danneggiano le capacità motorie.



Per robot operativi, si intendono tutti quei robot con una specifica applicazione nell'esecuzione di un task. Questi robot solitamente presentano un elevato grado di autonomia e sono impiegati in condizioni critiche e/o pericolose. Alcuni robot operativi sono impiegati per il trasporto di materiali, il pattugliamento, la simulazione, l'aumentazione della capacità fisico-percettive (*body-extender*), lo sminamento, la coltivazione, veicoli autonomi (aerei, marini, terrestri).

6. Componenti di un robot

La realizzazione ed il funzionamento vengono ottenuti tramite l'integrazione di una serie di componenti diverse così definite: parti meccaniche, sistema di trasmissione, sistema di attuazione, elettronica di controllo e rilevazione, sistema di calcolo e controllo, software comportamentale.



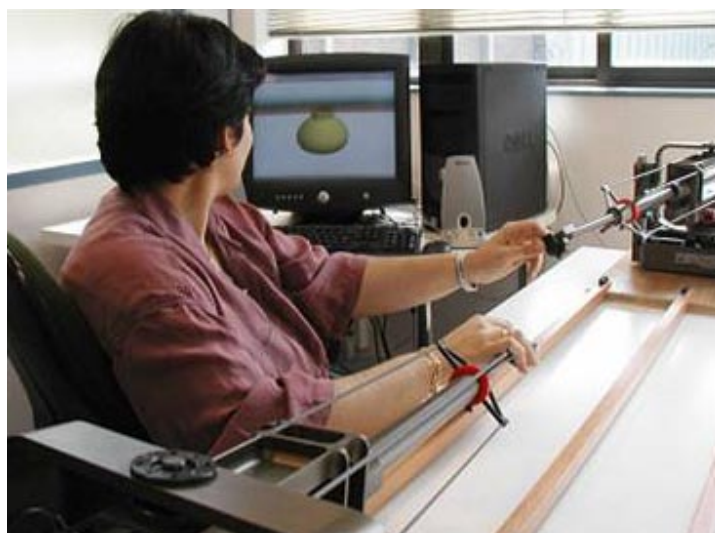
- Le componenti meccaniche individuano le parti strutturali del manipolatore. Le parti strutturali vengono a loro volta suddivise in due categorie: i *link* ed i giunti. I primi costituiscono il corpo del manipolatore, i secondi le articolazioni mobili. Due sono i tipi di giunti base (rotativo e lineare) anche se sono d'uso giunti più complessi: *screw*, giunti sferici... Alla progettazione della meccanica di un manipolatore contribuiscono specifiche prestazionali ed operative determinate dalla specifica applicazione cui il manipolatore è destinato. A seconda della combinazione di giunti e di *link*, un manipolatore potrà appartenere a diverse categorie: seriale, seriale diramato, parallelo, ibrido.
- La trasmissione si occupa di trasmettere l'energia prodotta da un sistema di attuazione alle articolazioni del robot. Esistono diverse tecnologie tramite le quali tale trasmissione può essere determinata: diretta (il motore è sull'asse del giunto), a cinghia, a cavi ...
- L'attuazione invece è la sorgente di energia che fornisce movimento al robot. Gli attuatori si distinguono in due classi: lineari e rotativi. I primi possono agire in senso alternato lungo una linea di movimento, i secondi ruotare attorno un asse. Inoltre l'attuazione si distingue sia per classificazione fisica del mezzo di trasmissione dell'energia (elettrica, idraulica, pneumatica) che per specifico principio di trasduzione (piezoelettrica, a induzione)
- L'elettronica di un robot è forse la componente con maggiori varianti possibili. Essa si distingue in due parti: la componente di acquisizione e quella di attuazione. La prima serve a raccogliere informazioni ambientali (quali la posizione del robot, forze di contatto, accelerazioni, visione, temperatura,...) la seconda a trasformare le indicazioni del sistema di controllo in segnali elettrici idonei a pilotare i motori. I sistemi di attuazione (*driver*) sfruttano una relazione diretta tra una variabile elettrica controllabile e l'azione meccanica da esercitare. Nel caso dei motori elettrici generalmente si controlla la relazione

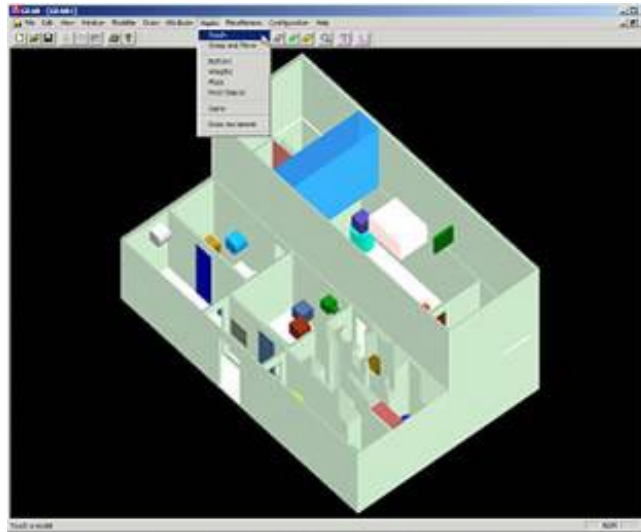
tra la tensione-corrente presentata al motore e la coppia/velocità di esercizio.

- Il controllo di un robot si occupa di coordinare i segnali elettronici rilevati dal sistema di percezione per produrre segnali di movimento da trasdurre in opportuni comandi elettrici per i motori. Sebbene originariamente siano stati creati anche meccanismi di controllo meccanici, due categorie di controlli sono attualmente in uso: controlli elettronici e controlli digitali. La tendenza, sia per questioni di costo che di affidabilità è comunque nel digitalizzare tutti i controlli.
- Il software comportamentale definisce infine il compito e le relazioni del robot con l'ambiente circostante. Diverse famiglie di software comportamentali sono disponibili e si differenziano prevalentemente in base al campo di applicazione. Alcuni esempi includono: inseguimento di traiettorie preimpostate (automazione industriale) ovvero fornite in tempo reale (teleguida, teleoperazione), rilevazione di parametri (controllo qualità, ispezione), analisi semantica dei dati rilevati (sorveglianza, navigazione autonoma), inseguimento di fattori di merito (ausili tecnologici, extender,...). Inoltre il software comportamentale include un'ampia famiglia di soluzioni analitiche/numeriche per risolvere specifici problemi di movimentazione: cinematica diretta, cinematica inversa, pianificazione di traiettorie.

7. Alcuni esempi

Il sistema GRAB è un ausilio tecnologico per non vedenti. Il soggetto può inserire l'indice e il pollice in due ditali controllati da dispositivi elettromeccanici e diventa in grado di percepire, mediante il tatto, forme ed informazioni collegate all'ambiente virtuale. Tramite comandi vocali altre informazioni possono essere scambiate con il sistema. Applicazioni tipiche riguardano giochi, esplorazione di mappe di città, l'uso di grafici e la matematica.





Il Museo Delle Forme Pure (www.pureform.org) è un sistema in cui un dispositivo robotico viene integrato con un ambiente virtuale. Un Museo, composto di sale e statue, esatte copie digitali dei relativi originali, viene materializzato alla vista del visitatore e alla percezione delle sue mani. Una vera e propria esperienza artistica virtuale che, grazie alla possibilità di toccare le opere, offerta dalla tecnologia aptica, si apre a nuove esperienze e nuove utenze come quella dei non vedenti.



La scrivania aptica è un sistema per integrare le classiche interfacce grafiche al calcolatore con strumenti di interazione robotica. L'uso della robotica e della percezione fisica in questo caso può essere veicolo di trasmissione di informazione utile per la messa a punto di software formativi in grado di insegnare particolari abilità motorie al suo utilizzatore (scrivere, disegnare, etc.).



Il Body Extender è un particolare dispositivo robotico antropomorfo in grado di essere indossato dal suo manovratore. Il sistema robotico prevede strutture in grado di assistere il movimento delle gambe e delle braccia dell'operatore nella manovra di grossi carichi (in termini di peso) e di 'alleggerirli' fisicamente tramite un sistema di controllo in tempo reale.



NOTE

* Il presente contributo è la trascrizione della lezione introduttiva alle tecnologie robotiche tenutasi a Pontedera (Pisa) il 19 ottobre 2005, presso l'Istituto Fermi. Obiettivo della lezione è stato quello di presentare agli studenti una panoramica delle tecnologie robotiche, dei loro impieghi e dei *trend* di ricerca.

¹ Le leggi di Asimov, pur avendo costituito un caposaldo della narrativa e della cinematografia robotica, sono solo marginalmente state applicate nel corso della ricerca e dello sviluppo di tecnologie robotiche. Ad esempio, le tecnologie militari, e la robotica associata, hanno da sempre concepito il robot come uno strumento di aggressione in chiara violazione delle norme etiche comportamentali fissate da Asimov. In campo medico, robot automatici e/o semiautomatici possono recare offesa ai pazienti al fine di portare a termine l'operazione secondo le volontà di un chirurgo. In campo formativo, dei robot possono opporsi alla volontà dei discenti al fine di mostrare forme e gesti di un comportamento corretto. Pertanto è sbagliato pensare che tali leggi debbano sempre e comunque essere un punto di riferimento per lo sviluppo di sistemi robotici.

² La cinematica di questo robot rimane oggi la più usata per robot industriali.

ROBOT COME PSICOLOGIA

DOMENICO PARISI

Istituto di Scienze e Tecnologie della Cognizione, Consiglio Nazionale delle Ricerche

Che cosa è un robot? Un robot è qualcosa che abbiamo costruito noi e che somiglia fisicamente a un organismo vivente, a un animale o a un essere umano, e si comporta come un organismo vivente. Perché costruiamo robot? Costruiamo robot perché i robot sono divertenti e piacciono alla gente e perché possono avere applicazioni pratiche, e perciò hanno un valore economico.

Ma i robot qui non ci interessano perché colpiscono la nostra immaginazione o per le loro applicazioni pratiche ma per un'altra ragione. I robot ci interessano in quanto sono un nuovo modo di fare psicologia, sono una nuova psicologia. Come tutte le scienze, la psicologia cerca di conoscere e di capire i fenomeni della realtà mediante l'osservazione empirica e la formulazione di teorie. I fenomeni che interessano gli psicologi sono il comportamento degli organismi, le loro capacità e, per quegli organismi che ce l'hanno, come gli esseri umani, la loro vita psichica. Gli psicologi osservano come si comportano gli organismi usando una grande varietà di metodi: l'osservazione diretta del comportamento spontaneo, ad esempio dei bambini o degli animali, gli esperimenti di laboratorio, l'uso di test e di questionari, i colloqui clinici. E propongono teorie e modelli che ipotizzano entità, meccanismi e processi che stanno dietro ai fenomeni e li spiegano. Questo è quello che la psicologia fa da circa centocinquanta anni. I robot sono un nuovo modo di fare psicologia. Se io sono uno psicologo e mi interessa un certo comportamento, una certa capacità, un certo aspetto della vita psichica, quello che debbo fare è costruire un robot che si comporta in quel modo, che ha quella capacità, che dimostra di possedere quell'aspetto della vita psichica. Il mio successo si misura dalla mia capacità di costruire un tale robot. Se riesco a costruire un robot che si comporta come l'organismo che mi interessa studiare e capire, allora posso pensare che i principi che ho seguito nel costruire il robot siano gli stessi che governano il comportamento dell'organismo, e quindi posso dire di aver capito l'organismo.

La novità dei robot riguarda specificamente le teorie e i modelli della psicologia. Ho già detto che la psicologia, come ogni scienza, lavora con due strumenti: l'osservazione empirica dei fenomeni e la formulazione di teorie. Una buona scienza usa tutti e due questi strumenti, e anzi cerca di stabilire un dialogo costante e serrato tra osservazioni empiriche e teorie. Le osservazioni empiriche suggeriscono teorie e spiegazioni; le teorie generano predizioni che debbono trovare un riscontro nelle osservazioni empiriche. La psicologia che lavora costruendo robot ha bisogno delle osservazioni empiriche come la psicologia tradizionale. Una volta costruito il robot, debbo verificare che si comporti

come l'organismo reale, e si ci sono differenze, debbo modificare il robot fino a fare scomparire le differenze. Quindi l'osservazione empirica degli organismi reali rimane una necessità imprescindibile anche per lo psicologo che costruisce robot: altrimenti, con che cosa confronta il robot? La novità riguarda l'altro aspetto della scienza, le teorie e i modelli. Qui non facciamo una distinzione netta tra le teorie e i modelli – anche se le teorie tendono ad essere formulazioni più generali e i modelli applicazioni delle teorie a fenomeni specifici – e parliamo per brevità di teorie intendendo sia teorie che modelli. Tradizionalmente in psicologia le teorie sono espresse a parole o, in qualche caso raro, con i simboli e le formule della matematica. Le parole che compaiono nelle teorie degli psicologi sono sensazione, percezione, attenzione, memoria, rappresentazione, scopo, intenzione, decisione, comunicazione, cooperazione, competizione, ecc. Se si fa psicologia costruendo robot, le teorie sono espresse con il robot, sono incorporate nel robot, sono i principi in base ai quali il robot viene costruito e funziona. Si tratta di una traduzione operativa delle teorie, di una loro espressione, per così dire, meccanica. Un robot è fatto di un corpo e di un 'sistema di controllo' del suo comportamento, analogo a quello che negli organismi reali è il sistema nervoso. La teoria con la quale voglio spiegare un certo comportamento o una certa capacità o un certo aspetto della vita psichica, è espressa nel corpo del robot e nel suo sistema di controllo. Il tradizionale vocabolario teorico della psicologia, le tradizionali teorie formulate verbalmente dalla psicologia, scompaiono. Le teorie sono i robot. Questa è la novità dei robot come psicologia.

Perché questo è un fondamentale passo avanti per la psicologia? In psicologia ci sono teorie e modelli ma ci sono spesso anche dati empirici, osservazioni e risultati di esperimenti, che sono semplicemente dati empirici, senza una teoria o un modello che li spieghi. Molti psicologi fanno esperimenti e basta, senza preoccuparsi di dire quale teoria o quale modello fa delle previsioni empiriche che potrebbero essere confermate o smentite dai risultati dei loro esperimenti. Se uno fa psicologia costruendo robot, questo modo di procedere soltanto empirico non è più possibile. Costruire un robot obbliga a formulare una teoria o un modello dato che i principi in base al quale il robot è costruito sono una teoria o un modello. Questo è un importante passo avanti per la psicologia perché, come abbiamo detto, le buone scienze sono le scienze che hanno sia dati empirici che teorie, e non soltanto dati empirici.

Ma c'è un'altra ragione perché fare psicologia costruendo robot fa fare un passo avanti alla psicologia. In psicologia le teorie, quando ci sono, sono quasi sempre espresse a parole o, al massimo, con schemi grafici e riferimenti un po' metaforici a come funziona un computer, e perciò tendono ad essere vaghe, ambigue, insufficientemente dettagliate, potenzialmente incomplete, e soprattutto non è chiaro quali sono le previsioni empiriche che si possono derivare da esse. Per cui spesso quello di cui si discute, spesso in modo inconcludente e senza mai arrivare a conclusioni certe e definitive, è quale è il significato dei termini usati, se una previsione che qualcuno vuol far derivare da una teoria ne deriva effettivamente, se una teoria è convincente o no in base a delle pure

argomentazioni. Esprimere una teoria costruendo un robot cambia tutto questo. Se una teoria deve essere espressa sotto forma di un robot che intendiamo effettivamente costruire, la teoria non può essere vaga, ambigua, con insufficienti dettagli, mancante di parti, perché, se è così, il robot non può essere costruito o, anche se riusciamo a costruirlo, non funziona come ci aspettiamo che funzioni.

Un altro vantaggio di formulare le teorie incorporandole nei robot è che i comportamenti del robot costituiscono le previsioni empiriche derivanti dalla teoria usata per costruire il robot. Perciò formulare una teoria costruendo un robot fa sì che la teoria generi necessariamente, incontrovertibilmente, un grande numero di previsioni empiriche: tutti i comportamenti del robot. Questo è un altro importante vantaggio per la scienza. Le teorie matematiche, quelle che si presentano sotto forma di equazioni, sono così efficaci nella scienza (vedi la fisica) perché i loro concetti sono necessariamente precisi e non ambigui in quanto sono espressi mediante numeri e altri simboli matematici, e poi perché da un'equazione si possono derivare un grande numero di previsioni empiriche in modo puramente meccanico, e quindi incontrovertibile. Ad esempio, dalla equazione che descrive come si muovono i corpi, si possono derivare un numero praticamente infinito di specifiche previsioni empiriche su come si muoverà un certo specifico corpo in certe specifiche condizioni. Il problema è che in psicologia raramente le teorie possono avere forma matematica. I robot sono una soluzione per questo problema. I robot sono un modo per formulare le teorie psicologiche con lo stesso rigore e la stessa capacità di generare previsioni delle teorie matematiche, ma con il vantaggio che ogni comportamento, ogni abilità, ogni aspetto della vita psichica può essere riprodotto in un robot. I robot sono strumenti per pensare. Qualcuno ha detto: *Cerca le parole e troverai i pensieri*. Oggi si può dire: *Costruisci un robot e troverai i pensieri*. Costruire un robot, o anche soltanto cercare di costruirlo, obbliga a rendere esplicita, precisa, quantificabile, ogni idea e ogni ipotesi o modello di spiegazione. Il robot è un giudice severo. Se l'idea o il modello sono intrinsecamente vaghi o non funzionano, il robot non può essere costruito o, anche se viene costruito, non funziona come dovrebbe. La sfida rivolta allo psicologo è: sai costruire un robot che funzioni sulla base della tua teoria o sulla base del tuo modello?

E poi c'è un terzo vantaggio di formulare teorie costruendo robot. La psicologia è una disciplina molto frammentata, con settori di ricerca molto diversi tra loro e a diversi stadi di avanzamento. La psicologia sperimentale usa un metodo di ricerca, gli esperimenti di laboratorio, notoriamente molto solido, e riesce a stabilire un minimo di interazione sistematica tra modelli e dati empirici, ma gli altri settori della psicologia usano metodi empirici molto più problematici e hanno teorie e modelli solo vagamente collegati con i fatti empirici. E la psicologia è frammentata anche dal punto di vista teorico, con teorie diverse per i diversi aspetti del comportamento e modelli particolari per ogni particolare fenomeno. I robot sono un'unica metodologia per tutta la psicologia. Ogni aspetto del comportamento e della mente può e deve essere affrontato costruendo robot: la capacità cognitive, le motivazioni e le emozioni, le immagini

mentali, i ricordi, i pensieri, i sogni, i comportamenti sociali e comunicativi, i disturbi del comportamento sia del tipo neurologico che psichiatrico e psicologico. Una volta costruito un robot, al robot si può chiedere di farci vedere quali sono le sue capacità, quali sono le sue motivazioni e le sue emozioni, se ha e in che cosa consistono le sue immagini mentali, i suoi ricordi, i suoi pensieri e i suoi sogni, come si comporta con gli altri robot, in quali diverse forme e per quali diverse cause il suo comportamento e la sua vita psichica possono risultare disturbati. Perciò i robot costituiscono un potente fattore di unificazione della psicologia: obbligano a studiare ogni aspetto del comportamento e della vita psichica usando una stessa piattaforma metodologica.

Ma i robot non sono soltanto una innovazione metodologica. I robot spingono la psicologia in una specifica direzione, e cioè verso un maggiore integrazione con la biologia. Tutti gli psicologi sono d'accordo che gli esseri umani sono entità biologiche, sono il risultato di una lunga storia di evoluzione biologica, e che il comportamento è un prodotto del sistema nervoso. Ma poi in pratica le divisioni disciplinari – ma anche le riserve ideologiche e culturali – tengono la psicologia separata dalla biologia, dalla biologia evuzionistica e dalla genetica, dalle neuroscienze, dalla anatomia e dalla fisiologia, dalla biologia cellulare e molecolare. I robot come metodologia per fare psicologia cambiano questo stato di cose. Un robot è qualcosa di fisico, ed è qualcosa di soltanto fisico. Il robot ha un corpo con una data forma, date dimensioni, un dato corredo e una data disposizione degli organi sensoriali e di quelli motori. E la morfologia del corpo del robot condiziona il suo comportamento. Ma la fisicità del robot non riguarda soltanto la sua forma esterna. Il comportamento del robot è controllato da un sistema che, nei robot che qui ci interessano, riproduce la struttura fisica e il modo di funzionare fisico del sistema nervoso: una rete neurale (artificiale). Una rete neurale è un insieme di unità (neuroni) collegate tra loro da connessioni (sinapsi tra neuroni). Le connessioni possono essere eccitatorie o inibitorie (tipi diversi di molecole chiamate neurotrasmettitori prodotte dal neurone pre-sinaptico e che vanno ad influenzare il livello di attivazione del neurone post-sinaptico) e possono avere *pesi* quantitativi diversi (numero di recettori molecolari posti sulla membrana esterna del neurone post-sinaptico) che si modificano con l'esperienza (apprendimento). In ogni determinato momento ogni unità della rete ha un certo livello di attivazione (ritmo di sparo di impulsi nervosi da parte del neurone) che, nel caso delle unità di input (neuroni sensoriali), dipende da eventi esterni al sistema nervoso, e nel caso delle unità di output (neuroni motori) e delle unità interne che collegano le unità di input a quelle di output (neuroni interni), dipende dalla somma delle eccitazioni e inibizioni che giungono a ciascuna unità dalle altre unità con cui è collegata. La rete neurale, basicamente, funziona nel seguente modo: per cause fisiche o chimiche esterne al sistema nervoso si determina un pattern di attivazione nelle unità di input della rete, questo pattern di attivazione viene trasformato dalle connessioni sinaptiche in una serie di altri pattern di attivazione nei diversi strati di unità interne, fino a che si determina un pattern di attivazione nelle unità di output. Il pattern di attivazione delle unità di output causa un determinato

movimento di una qualche parte del corpo del robot.

Quali sono le implicazioni del fatto che il sistema di controllo dei robot è una rete neurale? Le implicazioni sono che le teorie della psicologia, tutte le teorie della psicologia, debbono essere formulate in termini strettamente neurali, cioè in termini che fanno riferimento unicamente a come è fatto e come funziona il sistema nervoso. Il vocabolario teorico della psicologia cessa di essere il tradizionale vocabolario fatto di parole come sensazione, percezione, attenzione, memoria, inconscio, ecc. Possiamo costruire una teoria o un modello di quello che chiamiamo sensazione, percezione, attenzione, memoria, inconscio, ecc., ma la nostra teoria o il nostro modello debbono fare riferimento soltanto a quello che c'è nel sistema nervoso: neuroni, sinapsi tra neuroni, forza delle sinapsi, natura eccitatoria o inibitoria delle sinapsi, ritmo di sparo di impulsi nervosi da parte dei neuroni, cambiamenti nei pesi sinaptici tra neuroni, ecc. Una teoria psicologica non può più fare riferimento a entità o a processi psicologici ma deve fare riferimento soltanto a entità e processi neurali.

Ma il collegamento che i robot stabiliscono tra la psicologia e la biologia non si limita alla morfologia esterna del corpo e al sistema nervoso. Il corpo di un organismo non ha soltanto una morfologia esterna. Il corpo di un organismo contiene al suo interno una serie di organi e di sistemi al di là del sistema nervoso, e in particolare i muscoli che inviano input sensoriali al sistema nervoso e i sistemi endocrino e quello immunitario con il quale il sistema nervoso è in costante interazione. Le interazioni tra il sistema nervoso e questo ambiente interno sono critiche per spiegare soprattutto gli aspetti motivazionali e emotivi del comportamento. La robotica fino ad oggi è stata soprattutto una robotica esterna, cioè una robotica della morfologia esterna del corpo e delle interazioni del sistema di controllo del robot con l'ambiente esterno al robot. La robotica come psicologia invece deve essere anche una robotica interna, che doti il corpo del robot di specifici organi e sistemi interni e che faccia interagire il sistema di controllo del robot con questi organi e sistemi interni. Questo richiede una più ampia integrazione della psicologia con la biologia in quanto, mentre le reti neurali fanno riferimento fondamentalmente alla biologia cellulare, dato che le unità di una rete neurale corrispondono alle cellule nervose, le interazioni del sistema nervoso con il resto del corpo sono interazioni soprattutto di carattere molecolare, e quindi chiedono alla robotica di fare i conti con la biologia molecolare.

I robot non solo hanno un corpo ma il loro corpo interagisce fisicamente con l'ambiente esterno, ricevendo input sensoriali causati da eventi e processi fisici e chimici presenti nell'ambiente esterno e producendo movimenti che causano modifiche nell'ambiente esterno (ad esempio manipolazioni dell'ambiente esterno o produzione di suoni) o modifiche nelle relazioni tra il corpo del robot e l'ambiente esterno (quando il robot si sposta nello spazio o muove la testa o gli occhi). Perciò una psicologia robotica è necessariamente una psicologia ecologica, cioè una psicologia che spiega il comportamento non solo in termini di quello che sta dentro al corpo dell'organismo, e in particolare il suo sistema nervoso, ma anche in funzione del particolare ambiente

in cui l'organismo si trova a vivere e con cui si trova a interagire. L'ambiente in cui vivono e con cui interagiscono i robot deve corrispondere all'ambiente in cui vive una particolare specie di organismi, quella che ci interessa studiare. Ad esempio, nel caso degli esseri umani l'ambiente contiene oggetti fisici, altri animali, altri esseri umani, gli artefatti tecnologici prodotti dagli esseri umani.

Il punto di vista ecologico intrinseco all'uso dei robot come metodo di ricerca in psicologia rappresenta un altro vantaggio per la psicologia. Il metodo di ricerca più potente che la psicologia ha a disposizione sono gli esperimenti di laboratorio, ma gli esperimenti di laboratorio hanno il difetto che isolano il comportamento dalle normali condizioni in cui il comportamento viene manifestato. Questo, quando si fanno esperimenti, è una necessità perché solo in questo modo lo sperimentatore può avere il completo controllo del fenomeno e può decidere come variare le condizioni per poter osservare gli effetti delle variazioni create da lui o da lei. Il carattere non ecologico del metodo sperimentale non ha conseguenze negative nelle scienze della natura, cioè in fisica, in chimica e in buona parte della biologia, perché nelle scienze della natura i fenomeni possono essere isolati dal contesto in cui avvengono senza cambiarne le caratteristiche essenziali. In psicologia le cose non stanno così. In psicologia i fenomeni dipendono dal contesto in cui avvengono, i comportamenti sono una risposta a specifiche condizioni ambientali, e eliminando l'ambiente si rischia di eliminare i fenomeni. Un 'soggetto' sperimentale, quando entra in laboratorio deve smettere di agire in modo autonomo, deciso da lui, come agiscono normalmente gli esseri umani, e deve semplicemente rispondere alle istruzioni dello sperimentatore. Con i robot le cose sono diverse perché un robot può e deve agire in modo autonomo nel suo ambiente.

Un ultimo vantaggio della robotica per la psicologia è che la robotica ha un approccio intrinsecamente 'genetico' alla spiegazione dei fenomeni, dove genetico qui vuol dire ritenere di aver capito un fenomeno quando si è ricostruita la sua genesi, cioè la sua origine e il modo in cui è diventato quello che è. Il comportamento dei robot non può essere programmato. Come abbiamo visto, il comportamento dei robot è controllato da una rete neurale e una rete neurale non può essere programmata. Una rete neurale si comporta in un certo modo, producendo un certo output in risposta a un certo input, come conseguenza dei *pesi* quantitativi delle sue connessioni sinaptiche. Ma è impossibile per il ricercatore sapere quale specifico insieme di *pesi* sinaptici produrrà un certo comportamento in una rete neurale. La sola strada per il ricercatore è fare come fa la natura. In natura nessuno progetta e costruisce gli organismi o il loro sistema nervoso. Gli organismi e il loro sistema nervoso si sviluppano da soli nel tempo, con l'evoluzione biologica una generazione dopo l'altra, e con l'apprendimento nel corso della vita del singolo individuo. Per questo la robotica che serve alla psicologia è una robotica evolutivista, dove popolazioni di robot, uno diverso dall'altro, si riproducono selettivamente e con l'aggiunta costante di nuove varianti individuali, e una robotica basata sullo sviluppo e sull'apprendimento del singolo robot nel corso della sua vita. Nel caso degli esseri umani la robotica evolutivista crea le pre-condizioni, codificate

nel genotipo della specie, che permettono alla robotica dell'apprendimento di sfruttare l'esperienza per sviluppare i comportamenti e le capacità cognitive, comunicative, tecnologiche e sociali, tipiche della specie umana.

La psicologia fatta costruendo robot è ancora, largamente, una prospettiva per il futuro, anche se la ricerca comincia a muovere i primi passi. Ci sono molti ostacoli da superare, e concluderò questo scritto dicendo quali sono questi ostacoli.

I robot oggi vengono costruiti soprattutto per scopi pratici e per fini economici, ed è solo per questo che chi costruisce robot riesce ad avere le risorse economiche necessarie per costruirli. Fino a che non si riconoscerà chiaramente che i robot possono essere un importante strumento di semplice conoscenza del comportamento degli organismi reali, non ci sarà una psicologia robotica.

Anche coloro che costruiscono robot avendo interessi puramente conoscitivi, troppo presi dalla complessa attività di costruzione dei robot, finiscono per non dedicare abbastanza tempo a confrontare i comportamenti e le capacità dei robot con quello che la psicologia sa e continua a scoprire sui comportamenti e le capacità degli organismi reali – mentre, come abbiamo visto, questo confronto è essenziale se i robot debbono essere strumenti di una scienza.

Vi sono poi molti aspetti del comportamento e delle capacità, specialmente degli esseri umani, che non avendo interesse sul piano pratico tendono ad essere ignorati dalla robotica. Un esempio è la robotica interna di cui abbiamo già parlato. La robotica interna consiste nel dotare il corpo del robot di organi e sistemi interni simili a quelli degli organismi reali, e questo è essenziale se si vogliono capire le motivazioni e le emozioni degli organismi. Dai robot aventi scopi pratici ci aspettiamo soprattutto capacità e prestazioni, non motivazioni e emozioni, e anzi le motivazioni e le emozioni ci sembrano degli ostacoli ai nostri obiettivi pratici.

Un altro esempio è la robotica mentale, cioè la costruzione di robot che non si limitano a rispondere agli stimoli esterni con comportamenti rivolti verso l'esterno ma hanno immagini mentali, ricordi, pensieri, sogni, capacità di attenzione e di consapevolezza, e hanno una vita mentale e non solo una vita esterna. Se i nostri scopi sono pratici, perché dovremmo costruire robot dotati di una vita mentale? Invece la robotica mentale è uno degli sviluppi più importanti della robotica come psicologia. La robotica mentale spiega perché gli eventi mentali sono privati mentre l'ambiente esterno e i comportamenti sono pubblici: gli eventi mentali sono effetti di cause interne al corpo che, per ragioni puramente fisiche, possono produrre effetti nel sistema nervoso di un singolo individuo, mentre i comportamenti e gli oggetti esterni producono effetti nei sistemi nervosi di più individui. La robotica mentale mira a costruire robot capaci di auto-generare le loro esperienze e di rispondere a queste esperienze auto-generate, invece di aspettare che l'ambiente esterno crei in loro delle esperienze.

Un altro esempio ancora è la robotica patologica. Esiste tutta una casistica di disturbi del comportamento, delle capacità, della vita psichica, classificati da un lato come neurologici e dall'altro come psichiatrici e psicologici. Mentre la psicologia, in

quanto scienza biologica, sa che la conoscenza degli stati non funzionali dei sistemi biologici è essenziale per capire i loro stati funzionali e normali, la robotica con obiettivi puramente ingegneristici e pratici tende ad ignorare i disturbi del comportamento dato che in essi non vede altro che ostacoli alle prestazioni dei robot e riduzioni della loro efficienza.

E infine c'è la robotica sociale. Oggi comincia ad esserci una robotica collettiva, cioè la costruzione di insiemi di robot che si coordinano e collaborano tra loro per svolgere compiti che nessun singolo robot sarebbe in grado di svolgere da solo. Ma la robotica collettiva ha ancora fondamentalmente scopi pratici e per questo studia e riproduce nei robot la socialità molto semplice degli insetti, non quella più complicata degli esseri umani. Gli esseri umani hanno una socialità in cui non esiste soltanto cooperazione, come accade fondamentalmente nelle formiche e nelle api, ma esistono anche contrasti e competizione, e se lo scopo pratico è la collaborazione tra robot che mi interessa, non gli innumerevoli problemi che notoriamente emergono dai contrasti e dalla competizione tra gli esseri umani.

Un ultimo ostacolo è che gli psicologi, cioè coloro che per mestiere cercano di conoscere e di capire il comportamento degli organismi, non solo si debbono convincere che i robot sono per loro una interessante metodologia di ricerca ma debbono impadronirsi degli strumenti tecnici necessari per costruire robot – tutte e due cose non facili.

Come si vede i problemi non mancano a sviluppare una nuova scienza del comportamento basata sulla metodologia della costruzione di robot. Eppure i vantaggi di adottare una tale metodologia che abbiamo discusso in questo lavoro fanno ritenere che questa sarà la direzione che prenderà la scienza del comportamento del futuro.

SCIENZA E MUSICA: PERCHÉ PIACE LA MUSICA CHE PIACE

ANDREA FROVA

Dipartimento di Fisica, Università di Roma 'La Sapienza'

1. Premessa: musicisti e pubblico

Prima di addentrarmi in un discorso che da alcuni professionisti della musica potrebbe essere giudicato alquanto *retro*, desidero chiarire bene da quale punto di osservazione esso viene svolto. Cominciamo con il distinguere bene le due categorie dei creatori di musica, cui sfortunatamente non posso dire di appartenere, e dei fruitori di musica, coloro che si limitano ad ascoltarla, avendo raggiunto diversi stadi di acquisizione dei suoi infiniti valori. Le analisi dei vari responsi cerebrali all'esposizione al suono musicale che oggi ci consentono le tecniche fisiche applicate dai neuroscienziati – ecografia, tomografia positronica, analisi circuitale, eccetera – mostrano chiaramente che i cervelli che hanno a che fare con la musica si possono suddividere in una gamma di tipologie. Schematizzando al massimo, si può stilare la seguente graduatoria.

- I. cervelli vergini, come sono per definizione i neonati e gli animali;
- II. cervelli naïf, ossia musicalmente incolti, o poco meno, ben esemplificati da coloro che ascoltano, apprezzandoli, i festival della canzonetta;
- III. cervelli normali, quali sono quelli del pubblico medio che con interesse e piacere genuino frequenta i concerti di musica classica e mette insieme una buona discoteca di musica 'seria' (attenzione, insisto sulla parola 'genuino', giacché esistono anche abbonati alle stagioni di musica classica che sono mossi da altri fini – presenzialismo, esibizionismo culturale);
- IV. cervelli sui generis, quali sono gli snob nelle loro diverse sfumature, talune menti 'bizzarre' che amano andar contro corrente o figurare all'avanguardia (tra loro diversi critici musicali);
- V. cervelli super, ossia musicisti di professione, conoscitori specifici di generi poco usati, ed una parte degli addetti ai lavori.

A proposito di cervelli del genere IV, il grande medico Augusto Murri scrisse: «C'è una quantità di gente la quale gode nel credere l'incredibile, anzi si sente felice solo quando non riesce a capire nulla di quello che crede». A proposito invece dei cervelli 'normali', genere III, credo si possa darne la seguente definizione: sono quelli che si aspettano che la musica debba potersi apprezzare in sé e per sé, un requisito che Stravinskij riteneva indispensabile per la validità di una composizione. Bene, io appartengo a questo gruppo

di fruitori della musica: come uomo di scienza, credo di potermi escludere dal genere IV, né posseggo, ahimè, i crismi per far parte della categoria V. È esclusivamente in veste di ascoltatore 'normale', quindi, che mi accingo a proporre un'analisi delle cause che hanno reso certe musiche, in particolare un importante filone della prima metà del secolo scorso, così male accette alla quasi totalità dei frequentatori 'normali' della musica 'seria', quella parte che non sa mentire a se stessa su ciò che sente.

2. I criteri dell'armonia dei Greci

L'armonia classica affonda le sue radici nelle scoperte fatte dai Greci antichi circa gli effetti di *consonanza* e *dissonanza* di due o più note suonate assieme. Più che di scoperte, si trattava di riscoperte, in quanto molte migliaia di anni prima i Cinesi avevano già costruito flauti (tuttora suonabili) con fori tonali predisposti in maniera da soddisfare agli stessi criteri. Brevemente ricorderò che i pitagorici avevano rilevato che due note si possono dire tanto più consonanti quanto più le frequenze dei loro toni fondamentali stanno fra loro in rapporti di piccoli numeri interi. Gli intervalli consonanti sono, precisamente, 2:1 per l'ottava, 3:2 per la quinta perfetta, 4:3 per la quarta, 5:3 per la sesta maggiore, 5:4 per la terza maggiore, 6:5 per la terza minore. Trionfalmente, Pitagora disse: «Il segreto dell'armonia sta nel magico potere dei numeri», dando la stura alla leggenda metropolitana che si possa fare buona musica partendo da algoritmi matematici, vezzo cabalistico che ha segnato la musica per secoli e ha dato il suo non piccolo contributo anche alle forzature innovative del Novecento.

Le scale musicali da secoli in uso sono costruite sulla miglior consonanza possibile degli intervalli, ciò che comporta che ogni nota della scala sia armonicamente correlata alla tonica, ossia al primo grado della scala (ad esempio, il *sol* è la terza armonica del *do* dell'ottava sottostante, il *mi* è la quinta armonica del *do* due ottave sotto, e così via).

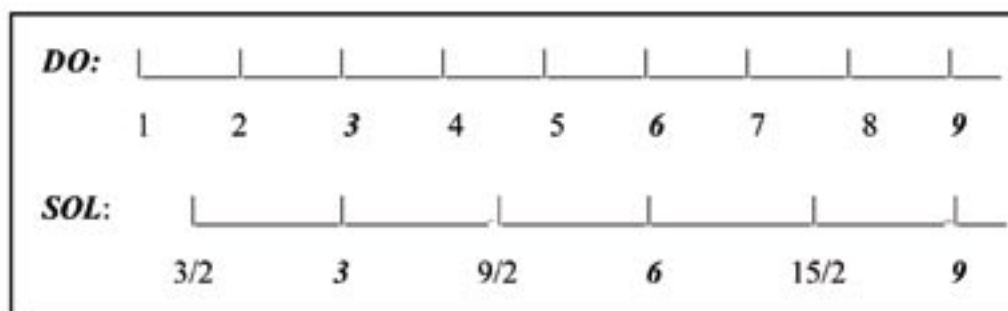
3. Scetticismo di Keplero

Il primo rifiuto della numerologia pitagorica si ha nel '600 con l'interpretazione geometrico-mistica della consonanza suggerita da Keplero: «La causa dell'armonia non sono i numeri in quanto tali, astratti dalla materia (*numeri numerantes*), i quali non hanno una forza dimostrativa in sé e per sé, bensì i numeri in quanto descrittivi di oggetti reali, le figure geometriche tracciate dal moto dei corpi celesti (*numeri numerati*, derivanti cioè dalle misurazioni)». Keplero fa corrispondere ai numeri pitagorici da 2 a 6 i poligoni inscritti in un cerchio – il diametro, un triangolo equilatero, un quadrato, un pentagono, un esagono. La concezione di Keplero è naturalmente altrettanto campata in aria di quella di Pitagora, cioè non fa alcun riferimento alle proprietà fisiche del suono o fisio-psicologiche dell'ascoltatore, ma è un fatto importante che una convinzione nata dall'autorità di Pitagora e rimasta saldamente radicata per duemila anni venga posta in discussione con riferimento a fattori reali. La cabala defunge, o almeno dovrebbe.

4. Meccanicismo seicentesco

Nel Seicento nasce, ad opera di grandi fisici come Benedetti, Galilei, Mersenne, la prima spiegazione di carattere meccanico della consonanza. Celebre è la descrizione galileiana della dissonanza in termini del fastidio che verrebbe generato nell'orecchio ogni volta che il timpano viene sollecitato da più suoni simultanei aventi frequenze tra loro mal commensurabili, tali cioè da stare in rapporti di numeri grandi. La consonanza verrebbe invece da una almeno parziale sincronia dei due suoni: nel caso della quinta *do-sol*, ad esempio, rapporto 3:2, ogni tre vibrazioni del *sol* le due note si troverebbero a stimolare il timpano in modo concorde.

È da questa concezione che deriva subito, grazie ai contributi di vari studiosi (tra cui Cartesio, Huygens, d'Alembert), la teoria delle *coincidenze degli armonici*, che si rivela tanto più solida nel tempo quanto più avanzano le conoscenze nell'ambito dei meccanismi di elaborazione del suono a livello cerebrale. Ogni suono reale è costituito da più 'parziali' con frequenze multiple di quella del tono fondamentale (*armonici* di una nota). La teoria afferma che più armonici due note hanno in comune, più esse consuonano. Un solo esempio, quello della quinta perfetta, basta a chiarire il legame tra il modello galileiano e la teoria delle coincidenze; prendendo 1 per la frequenza del *do* e quindi $3/2$ per quella del *sol*:



si vede che gli armonici 3° , 6° , 9° , ecc. del *do* (segnati in *italico grassetto*) coincidono con il 2° , 4° , 6° , ecc. del *sol*. È palese che più il rapporto tra le frequenze fondamentali è dato da numeri piccoli (interi), più precoci e numerosi sono gli armonici condivisi. Nel quadro rientra anche la visione di Rameau, che attribuisce l'armonia alla generazione per differenza del *basso fondamentale* (nella fattispecie il *do* di frequenza $1/2$, un'ottava sotto). È immediato verificare che nel caso di intervalli dissonanti – semitono, tono, tritono, settima maggiore – gli armonici in comune sono praticamente assenti o si trovano a ordini elevati, e viceversa si notano frequenti occasioni in cui essi originano battimenti.

5. Helmholtz e la psiche

Nell'Ottocento Hermann von Helmholtz fa il primo fondamentale passo nella direzione di conciliare estetica musicale e scienza a livello della psiche. Egli porta i battimenti al centro dell'attenzione, imputando loro la causa del fastidio generato da un insieme di suoni dissonanti. In effetti, oggi sappiamo che quando due note differiscono di

poco in frequenza – si dice ‘cadono all’interno della *banda critica*’ – esse non vengono elaborate da fibre nervose e reti neurali distinte, circostanza che induce nel cervello condizioni di ambiguità. Per Helmholtz sarebbe proprio l’assenza di battimenti a generare l’effetto di consonanza tra due note. Va sottolineato che, per quanto detto, la teoria delle coincidenze e l’ipotesi di Helmholtz si implicano vicendevolmente: niente di nuovo, quindi, salvo la considerazione del ruolo della psiche, ignorato dai meccanicisti. Oggi l’analisi del comportamento del sistema neurale cervello fatta dai neuroscienziati conferma che i treni di impulsi neurali generati da insiemi di suoni consonanti sono più semplici da elaborare, confermando che, come aveva ventilato Helmholtz, la *preferenza per l’armonia classica ha origine biologica*.

6. La ricetta dell’armonia tonale classica

Gli elementi portanti dell’armonia classica, essenzialmente basata sulla tonalità o su forme alternative più arcaiche, come i modi greci, sono:

1. Melodia: temi e sviluppi che rappresentano forme modellate e arricchite della prosodia del parlato
2. Armonia: prevalente utilizzo della consonanza e impiego della dissonanza come elemento di contrasto e di messa in risalto (in sostanza un chiaroscuro in musica)
3. Espressione: manifestazione di umori, stati d’animo, emozioni
4. Tempo: metro e ritmo, che fanno leva sugli stimoli motori. La dimensione tempo, che non ha un ruolo altrettanto decisivo in nessun’altra forma di espressione artistica, è essenziale nel garantire continuità e contestualità del discorso, nonché riconoscibilità del soggetto musicale, e conferisce grande rilevanza alle componenti di memoria e di aspettativa.

Tutti e quattro gli ingredienti menzionati concorrono nel far sì che i treni di impulsi neurali che circolano nelle reti cerebrali presentino elementi di spicco ripetitivi. I segnali che il cervello deve elaborare, insomma, hanno un marcato carattere di ‘conteggiabilità’ (merita ricordare la frase di Leibniz: «Musica è un esercizio matematico della mente che conta senza sapere di contare»). Un esempio significativo è mostrato dalla figura 1, dove vengono poste a confronto la triade di tonica regolare e quella in cui il fattore d’ottava è stato aumentato a 2,3, operazione che sovverte tutti i criteri costitutivi dell’armonia di un accordo, in primis l’effetto di *fusione* delle frequenze componenti il suono complesso, così da dare l’idea di un insieme unico e omogeneo (in proposito, c’è una significativa esperienza fatta all’IRCAM di Parigi, in collaborazione con Pierre Boulez, dai musicisti elettronici John Pierce e Max Mathews, [1] – si vedano anche [2] e [3]–). Si tratta di curve calcolate dell’energia acustica percepita istante per istante dall’apparato uditivo che, come confermano recenti esperimenti di neuroscienze, determina il profilo temporale dei segnali nervosi che si dipartono dalla coclea.

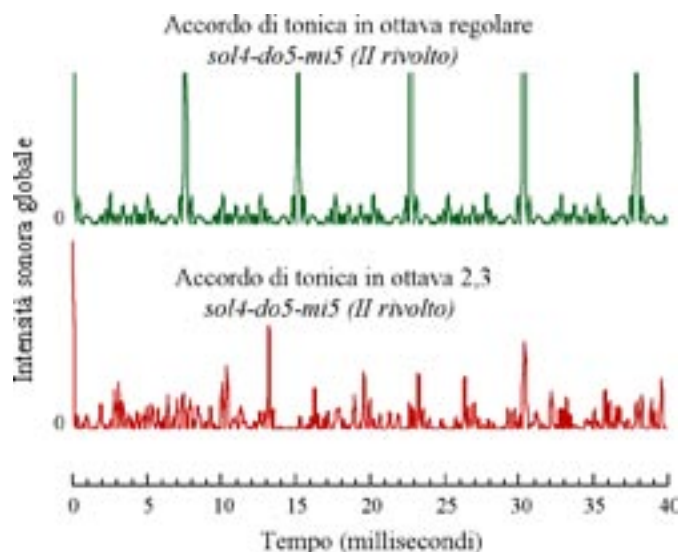


Figura 1. Il caratteristico profilo 'conteggiabile' di un intervallo consonante a confronto con lo stesso intervallo reso inarmonico grazie a un fattore di ottava aumentato a 2.3.

7. Successiva evoluzione

Rispetto al Seicento bachiano, nel periodo *classico-romantico* si vede accresciuto l'uso delle modulazioni di tonalità e della dissonanza. La gerarchia tonale delle note garantisce quella variabilità che è necessaria a formulare un contesto e un'espressione. Il ruolo della scansione temporale rimane un fatto essenziale, anche se i treni di impulsi neurali presentano una minor regolarità che nel caso di musica prevalentemente innestata sulla consonanza, creando al cervello 'naïf' delle difficoltà: in nessuna parte del mondo le ninne-nanne sono basate su intervalli meno che consonanti.

Nel periodo *postromantico-decadentistico* si afferma il cromatismo, ossia l'estensione all'intera scala di dodici note, con attenuazione del carattere tonale. Già presente in antichi madrigalisti, come Gesualdo da Venosa, il cromatismo diviene luogo comune in Wagner, Liszt, Debussy. Compare anche la politonalità e si ha un notevole recupero delle modalità greche (e.g. in Debussy, Shostakovich, Respighi, Sibelius, Bartok, Hindemith). I treni di impulsi neurali divengono sempre più complessi e più difficili da elaborare, ma un debito acculturamento dota il cervello 'normale' di potenzialità gradualmente più avanzate.

Nel *Novecento* il processo evolutivo tende a saturare, cosicché si presenta evidente la necessità di rottura con i vincoli del passato. Si hanno due vie principali:

1. Innovazione che si innesta sul patrimonio dei valori esistenti (Stravinskij, Bartok, Hindemith, Prokofieff, Janacek, Shostakovich, De Falla, ecc.). In questo caso, i treni di impulsi neurali divengono di ancor meno immediata elaborabilità, ma rimangono sempre usufruibili da cervelli che non siano 'naïf', anzi, per il fatto di proporsi in modo meno prevedibile e di accentuare i contrasti musicali, a un cervello abbastanza 'imparato' possono risultare addirittura privilegiabili.

2. Innovazione fondata sul rigetto globale delle basi dell'armonia classica – armonia, melodia, ritmo – con adozione di regole alternative che non hanno rispondenza biologica nel sistema percettivo. Capostipite di questo genere è Arnold Schoenberg con la sua scuola viennese, ma strascichi di vario genere si estendono per l'intero secolo: musica seriale, aleatoria, concreta, algoritmica). In queste scelte si antepone il nuovo al bello o tutt'al più, prendendo a prestito la frase da Roman Vlad, il nuovo al vero. I treni di impulsi neurali divengono del tutto casualizzati, senza elementi di spicco, né conteggiabilità temporale, tipo quelli prodotti dal rumore o da musica eseguita nell'ambito dell'estremale ottava espansa di Pierce e Boulez (vista in figura 1). Ciò che si rivela più deleterio è la perdita della scansione temporale, ossia del ruolo portante del tempo, in assenza del quale si ha un affastellarsi di messaggi privi di contesto e di consequenzialità, un oscuro intreccio che il cervello fatica a cogliere e a districare.

Io ho una definizione per questo tipo di prodotto sonoro: *musica adiabatica*, ossia musica che non trasmette, non comunica. Il musicista Ligeti parla di *musica di massima entropia*, quindi totalmente disordinata e casuale, e osserva che non basta un'organizzazione numerica o grammaticale per garantire a un prodotto validità artistica. Conseguenza di ciò è che la fruibilità della musica adiabatica è strettamente limitata agli operatori del settore e a un pubblico atipico, ristretto ai cervelli 'super' o 'sui generis'. Si tratta allora di un prodotto avente carattere precipuo di sperimentazione – circostanza che può andare a suo merito – ma che a 100 anni di distanza si è dimostrato privo di validi sviluppi.

8. Gli 'spari' neurali

Rimane da approfondire l'aspetto dei profili temporali dei segnali nervosi – o 'spari' neurali – che dalla coclea si avviano al cervello per essere decifrati. Ci sono due modi di calcolare tali profili, uno è quello, già proposto, di riferirsi all'energia acustica complessiva (avendo previamente portato le parziali del suono ad avere un'unica fase, come fa l'orecchio), l'altro è quello di calcolare opportune funzioni di autocorrelazione della forma dell'onda acustica che si presenta all'organo dell'udito, [4]: i risultati sono essenzialmente eguali. Ma ciò che conta è che essi combaciano con quelli osservati per inserimento di sonde elettriche nel cervello dei gatti, [5], [6].

È opportuno rilevare che: primo, le singole note di uno strumento musicale hanno andamenti simili al caso di accordi consonanti (sono cioè 'autoconsonanti'); secondo, tutte le vocali della voce umana hanno anch'esse tale comportamento, come illustrato in figura 2; terzo, non esistono suoni in natura che diano andamenti privi di elementi di spicco nel treno neurale salvo i rumori casuali, gli schianti, la percussione di oggetti non musicali.

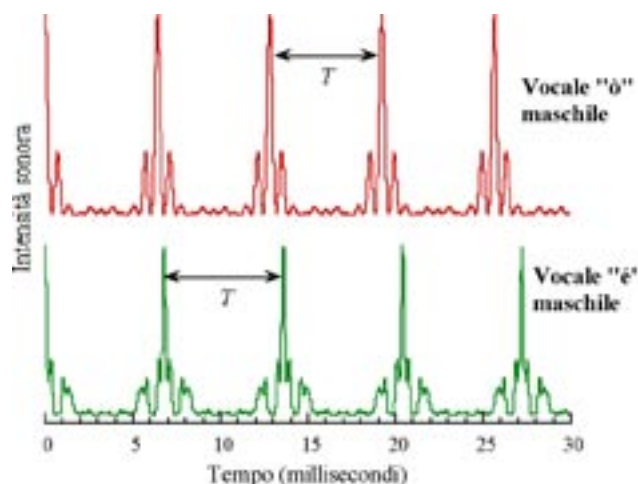


Figura 2. I profili temporali degli 'spari' neurali nelle vocali rivelano la loro autoconsonanza. T è il periodo dell'onda.

In figura 3 sono riportati gli andamenti degli 'spari' neurali per diversi intervalli musicali, da più consonante a più dissonante. Il calcolo è basato sull'andamento dell'energia acustica ricevuta, ogni nota essendo costruita su dieci armonici di ampiezza decrescente in modo proporzionale al

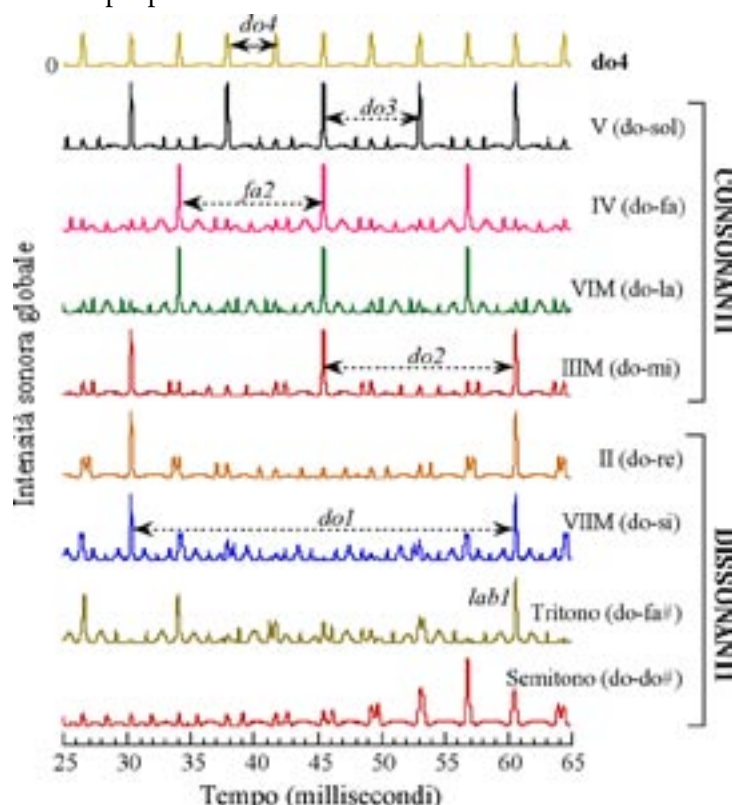


Figura 3. Profili temporali degli 'spari' neurali per una nota di do e per intervalli che vanno da molto consonante a molto dissonante.

rispettivo numero d'ordine. In alto è mostrato per confronto il profilo autoconsonante della nota *do*. I profili indicano che quanto più ci si allontana dalla consonanza, tanto

meno si hanno picchi che si stagliano sul fondo e presentano marcata periodicità. Il cervello interpreta il suono con minor immediatezza, faticando a riconoscerne gli elementi fisiognomici. In figura 4 alcuni di detti profili calcolati sono posti a confronto con i risultati degli studi neuroscientifici sui gatti. La corrispondenza è quasi sorprendente.

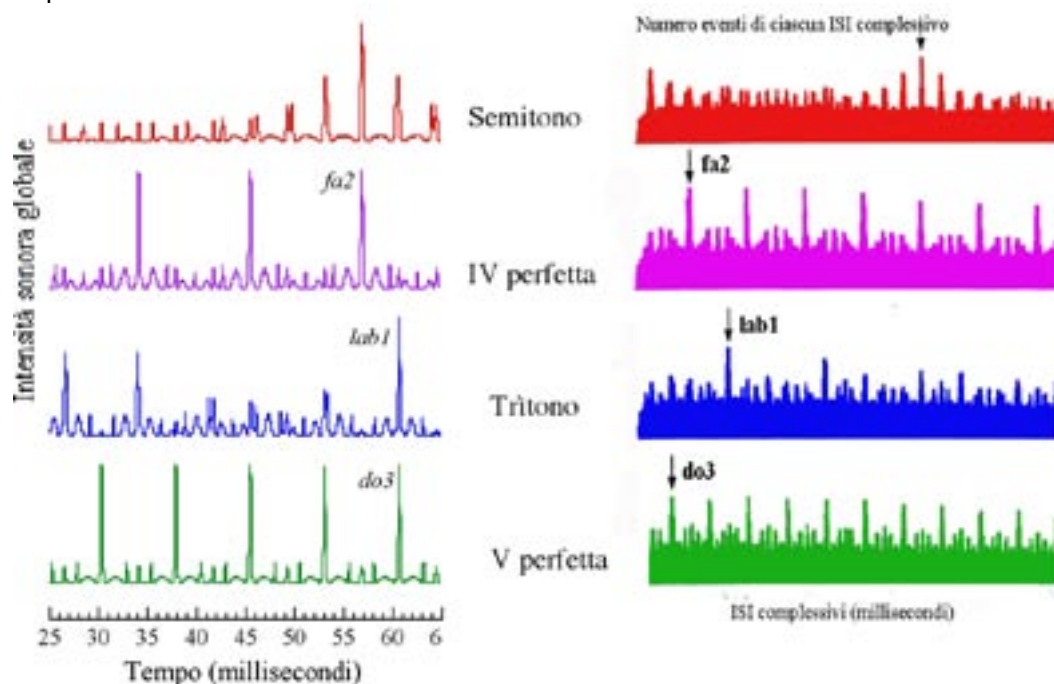


Figura 4. Confronto tra il profilo degli 'spari' neurali calcolati e misurati in fibre nervose di gatto (per il significato della sigla ISI si rimanda al citato lavoro di Tramo e coll.).

9. Conclusioni

Le regole dell'armonia classica non sono una convenzione sopravvissuta attraverso i millenni, bensì il riconoscimento di caratteristiche percettive di base comuni agli uomini di tutti i tempi e paesi, nonché agli animali. La preferenza per l'armonia classica ha dunque origine biologica.

Una composizione musicale che, pur nell'ambito della più ampia innovatività, non faccia proprio tale presupposto, è di norma poco accessibile al cervello 'normale' del fruitore medio di musica 'seria'. Se ha dei meriti, essi sono più quelli della sperimentazione e dell'esplorazione di possibili vie di sviluppo per la musica futura, cosicché rimane apprezzabile e utilizzabile soltanto da una cerchia ristretta di specialisti e frequentatori del settore, in certo senso come per un fisico i risvolti di un esperimento scientifico, o i significati di un teorema per un matematico.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Mathews M.V. e Pierce J.R., *Journal of the Acoustical Society of America* 68, p. 1252, 1980.
- [2] Frova A., *Fisica nella Musica*, Zanichelli Editore, Bologna 1999.
- [3] Pierce J.R., *La fisica del suono*, Zanichelli Editore, Bologna 1988;
- [4] Meddis R.M. e Hewitt M.J., *Journal of the Acoustical Society of America*. 89, 2866-2882, 1991.
- [5] Tramo M.J. et al., Neurobiological Foundations for the Theory of Harmony in Western Music, *Annals of N.Y. Academy of Sciences* 2001, p. 92.
- [6] Peretz I. e Zatorre R.J., a cura di, *The cognitive neuroscience of music*, Oxford University Press, Oxford 2003. (Questo libro contiene una vasta raccolta di articoli scritti da neuroscienziati che fanno il punto su tutti gli aspetti di interesse nei meccanismi di elaborazione della musica ad opera del cervello.)



**SCIENZA
E SOCIETÀ**

USO RAZIONALE ED EFFICIENTE DELL'ENERGIA

RICCARDO BASOSI

Dipartimento di Chimica, Università di Siena

La struttura del secondo principio della Termodinamica collega un corpo di conoscenze molto importanti e relative alla spontaneità e all'irreversibilità dei fenomeni naturali, al grado di ordine e di disordine dell'universo e al significato della probabilità e dell'informazione. L'affermazione chiave del secondo principio è quella che i fenomeni spontanei che costituiscono gli eventi reali del mondo in cui viviamo portano sempre a stati che sono meno ordinati e più probabili e che contengono meno informazione rispetto agli stati da cui hanno preso l'avvio. Questo significa che ogni processo irreversibile spontaneo diminuisce l'ordine dell'universo e lo porta verso uno stato più probabile che contiene meno informazione di prima: qualunque cosa accade nel mondo porta nella direzione di questo baratro. Il secondo principio dice che anche processi naturali di questo tipo possono essere invertiti mediante applicazione di energia, ma ciò può essere fatto solo a spese di un ulteriore decadimento dell'ordine complessivo del mondo e cioè con un aumento dell'Entropia.

Questi elementi risultano particolarmente significativi nelle attività di produzione di Energia che sono sempre accompagnate da un aumento dell'Entropia e conseguente riduzione della Complessità Ambientale.



Figura 1. Effetti sull'ambiente delle piogge acide provocate dall'impianto di una centrale a carbone.

La crisi dei tre sistemi *ambiente, sistema produttivo e sistema economico* non sembra risolvibile intervenendo su di loro separatamente. La possibile soluzione coinvolge complesse interazioni tra i tre sistemi in cui si sviluppa l'attività umana, vedi [4], [5] e [7]. Infatti il sistema economico vive sui beni forniti dal sistema produttivo che si fonda sulle risorse dell'ecosistema. Se tutto funzionasse secondo un ideale razionale il sistema economico dovrebbe adattarsi alle necessità dell'ecosistema, ma nella realtà essendo il sistema economico basato sulla massimizzazione del profitto tenderà ad imporre

al sistema produttivo una organizzazione che di fatto porta a scaricare diseconomie sull'ambiente e quindi a degradare l'ecosistema. In questo sistema complesso il legame tra i tre sottosistemi fondamentali è espresso dall'Energia. Essa, irradiata dal sole, governa i grandi cicli ecologici, estratta dai combustibili fossili muove i processi produttivi, infine il suo uso è alla base della efficienza e della produttività economica.



Figura 2. Schema delle connessioni tra i sistemi economico, produttivo ed ecosistemi.

Lo strumento per penetrare i segreti dell'Energia è offerto dalla Termodinamica, la scienza che ne studia i flussi e le trasformazioni, vedi [6], [8].

1. Termodinamica e unidirezionalità del tempo

Il primo Principio della Termodinamica dice che l'Energia dell'universo è costante. Il secondo Principio dice che l'Entropia dell'Universo aumenta sempre. Insieme ci dicono che la scala termodinamica della qualità dell'Energia è una scala molto facile da discendere e molto difficile da risalire. Infatti se pur è vero che l'Energia è un concetto astratto che si esplica in forme molto diverse, tali forme non sono equivalenti e possiedono qualità pratiche ed anche economiche molto diverse. Tali qualità più o meno nobili sono ben espresse da una scala di valori di Temperatura.

La Termodinamica è molto diversa dalle altre discipline fisico/sperimentali. In primo luogo perché la maggior parte delle leggi della fisica è stata stabilita allo scopo di spiegare processi che accadono spontaneamente in natura (per es. una mela che cade sulla testa di Newton suggerisce l'esistenza della legge di gravitazione universale, il pendolo di Galileo ecc.). Le leggi della Termodinamica sono nate in modo opposto essendo basate sul fatto sperimentale che qualcosa concepito dagli esseri umani non può accadere in natura e che un concetto eminentemente umano come il moto perpetuo non può essere realizzato effettivamente. Come dice il grande Feynman, la Termodinamica razionalizza l'insuccesso umano: è quindi più umana delle altre scienze ed è più facile da usare che da capire. L'altra questione che rende la Termodinamica diversa dalle altre scienze è il fatto che in essa è implicita la distinzione tra passato e futuro. Questo aspetto, che sembra molto distante da qualsiasi quotidiana pratica energetica, è invece intimamente connesso con essa. Consideriamo per esempio una brocca che cade da una certa altezza

e si rompe. Al momento della rottura succede qualcosa di importanza cosmica: la cessione al pavimento e ai pezzi rotti di una infinitesima quantità di calore che non è più recuperabile. È proprio questa infinitesima quantità di calore che impedisce che il fenomeno della brocca che cade sia reversibile. Infatti se proiettiamo il film della brocca che cade all'incontrario, e vediamo i pezzetti della brocca rimettersi insieme da soli e poi la brocca saltare di nuovo sul tavolo da cui è caduta, si ride. Ridendo esprimiamo la coscienza generale che quel fatto reso possibile dal trucco cinematografico nella vita reale non succede mai. Nella vita reale le brocche cadono e si rompono. Non capita mai che si ricompongano da sole e saltino sui tavoli. Se facciamo la stessa esperienza con una palla da biliardo che batte contro una sponda, e proiettiamo il film prima in un modo e poi al contrario non sapremo mai quando/dove dobbiamo ridere.

Tutto ciò ci dice che la meccanica è simmetrica rispetto al tempo mentre la Termodinamica no. Essa contiene implicitamente la percezione universale dello scorrere del tempo in un'unica direzione.

Immaginiamo un tavolo da biliardo diviso in due parti da una barriera mobile e supponiamo che da una parte vi sia un certo numero di palle rosse e dall'altra un egual numero di palle bianche. Supponiamo inoltre che il piano sia del tutto privo di attrito in modo che le palle possano muoversi, saltellare, urtarsi ed andare qua e là proprio come le molecole d'acqua. All'interno di ciascun gruppo di palle, il moto è del tutto casuale, ma ciascuna parte del tavolo è dotata di un certo ordine, dato che le palle rosse restano da una parte della barriera e quelle bianche dall'altra. Rimuoviamo ora la barriera. Se l'agitazione delle palle continua, le palle rosse e quelle bianche gradualmente si mescoleranno fino a che entrambi i tipi saranno, in media, ugualmente distribuiti su tutta l'estensione del tavolo. Il mescolamento, la scomparsa dell'ordinata separazione delle palle è un processo inevitabile, spontaneo ed unidirezionale. Filmando l'intero processo e proiettando la pellicola al contrario si potrebbe infatti assistere al fenomeno paradossale in cui un raggruppamento casuale di palle rosse e bianche gradualmente si riordina fino a separarsi in due gruppi, uno di sole palle rosse ed uno di sole palle bianche. Questo esperimento ideale dimostra come il processo reale sia spontaneo ed irreversibile, è una delle molte dimostrazioni dell'unidirezionalità del tempo e di un evento naturale il quale crea di per sé disordine *se avviene all'interno di un sistema che sia inizialmente ordinato*.

Si sono finora usati i termini di *ordine* e *disordine* secondo il loro normale uso nel linguaggio comune; poiché il concetto che regola la definizione termodinamica di ordine avrà un ruolo cruciale nel valore pratico delle leggi energetiche, a questo punto è utile stabilire cosa significa ordine nel senso più restrittivo. In ciascuno dei casi precedenti il disordine è rappresentato da una situazione in cui l'apparenza esterna dell'oggetto è consistente con un gran numero di possibili disposizioni interne diverse, mentre l'ordine aumenta quando l'apparenza esterna ne permette un numero minore. Così, vari mucchi di legname possono avere lo stesso aspetto esteriore pur avendo al loro interno le singole tavole disposte in migliaia di modi diversi. Però, se le stesse

tavole di legno devono avere l'apparenza esteriore di una capanna, il numero delle possibili disposizioni interne è molto ridotto. In altri termini, la struttura complessiva di una capanna consente un numero di disposizioni interne delle tavole minore di quello consentito dalla struttura di un mucchio di legna.

Così, in senso termodinamico, l'ordine è una misura del livello al quale le proprietà complessive di un sistema fisico determinano la selezione di una particolare disposizione interna delle parti costituenti.

L'ordine esprime la relazione tra le proprietà dell'interno e le proprietà delle sue parti; ordine significa che il totale non è una semplice somma delle proprietà delle parti ma che è fortemente influenzato dalle relazioni fra di esse, in particolare dal modo in cui queste relazioni sono limitate o costrette. Il totale, l'intero costituisce quindi un *sistema* il cui comportamento è notevolmente influenzato dalla sua struttura interna. Come si è detto prima, i processi spontanei ed irreversibili sono gli eventi che materializzano il trascorrere unidirezionale del tempo e il sistema che ne partecipa termina con un grado di ordine inferiore a quello che aveva all'inizio. È l'esistenza di un ordine precedente che ci fornisce un modo per valutare il passare del tempo.

Sono queste le basi del secondo principio della termodinamica che, assieme al primo principio, regola il rendimento di un processo energetico. Il secondo principio afferma un solo fatto, ma di importanza cosmica: *l'Universo diventa costantemente ed irreversibilmente meno ordinato di quello che era.*

Questo comportamento dell'Universo spiega l'unidirezionalità degli eventi e l'irrimediabile passare del tempo. Anche la probabilità entra nel quadro poiché è fondamentalmente connessa con la presenza dell'ordine nel mondo. *La probabilità è una dichiarazione circa la verosimiglianza del manifestarsi di un certo particolare evento fra tutti i possibili eventi che possono manifestarsi in un dato sistema.* Le combinazioni di 4 numeri sono date da $4!$ (4 fattoriale = $4 \times 3 \times 2 \times 1$) e cioè 24 possibilità. La disposizione ordinata è una o al massimo due su 24. Con 52 carte la disposizione ordinata è una su $52!$ (cioè oltre 80miliardi di possibilità).

Così se il numero di possibili alternative è piccolo, la probabilità di ciascuna è alta. La relazione fra probabilità e ordine è quindi evidente: una bassa probabilità corrisponde ad una scelta particolare fra molte possibilità ed è equivalente all'ordine, corrispondente al fatto che le parti di un sistema possono assumere solo alcune tra le molte possibili disposizioni interne. Poiché sappiamo che con il passare del tempo una disposizione ordinata diventerà spontaneamente meno ordinata, ne segue che una situazione improbabile tenderà con il passare del tempo a trasformarsi in una situazione più probabile. Questo è un altro modo di enunciare il secondo principio della termodinamica: *ogni sistema lasciato a se stesso tenderà in media a raggiungere lo stato con una probabilità massima.*

Si noti che il secondo principio non sostiene che il sistema passerà necessariamente in una configurazione più probabile, ma solo che questo accadrà in *media*, cioè qualche particolare cambiamento potrà andare in un altro senso, ma con bassa probabilità.

D'altra parte la probabilità è strettamente connessa con l'informazione. La teoria dell'informazione è un aspetto relativamente nuovo della scienza che ha recentemente assunto una notevole importanza pratica a causa delle sue implicazioni nel campo della progettazione dei calcolatori. Un calcolatore genera informazioni che selezionano una certa configurazione di scelte in una serie di alternative possibili; una scelta è normalmente determinata dalla posizione chiusa o aperta di un interruttore. La scelta di una delle due possibili posizioni dell'interruttore rappresenta una unità di informazione cioè il *bit*. Il programma del calcolatore specifica la posizione che deve essere assunta da ciascuno di una serie di interruttori interconnessi, e la quantità totale di informazione interessata è la somma dei bit che rappresentano le scelte fatte a tutti gli interruttori.

In termini molto generali, *l'informazione consiste nell'esclusione di alcune tra le possibili disposizioni alternative di un sistema*. L'informazione è quindi analoga ad una diminuzione di probabilità e ad un aumento di ordine, per cui il secondo principio può essere enunciato: *ogni processo spontaneo ed irreversibile che si realizza in un sistema isolato dà come risultato una diminuzione di informazione*.

Le formule chimiche delle strutture ordinate mostrate in Fig.3 rappresentano situazioni estremamente improbabili e ad alto contenuto di informazione.

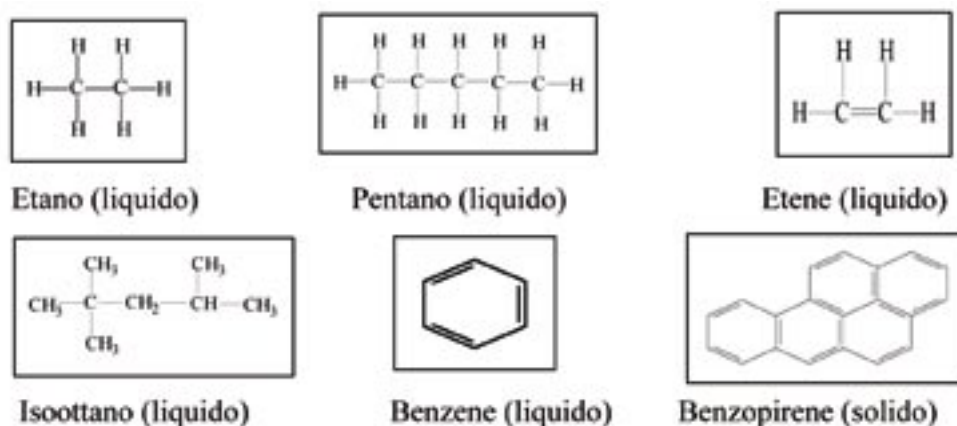


Figura 3. Formule chimiche di alcuni idrocarburi con crescente ordine strutturale.

Questa informazione è stata accumulata nei combustibili fossili dalla natura nel corso di milioni di anni. Il mondo moderno consuma quantità immense di informazione bruciando i combustibili fossili per ottenere anidride carbonica e vapor acqueo che divengono così i principali responsabili dell'effetto serra e non sono più utilizzabili per usi qualificati. La intrinseca scarsità delle fonti fossili può essere dedotta dalla Fig.4 che mostra come ai *trend* attuali di consumo la durata delle riserve sia molto limitata ad eccezione della fonte carbone per la quale comunque sussistono problemi ambientali irrisolti. L'uranio per uso civile (produzione di energia elettrica), per il quale l'impatto ambientale imputabile al confinamento sicuro delle scorie è ancora una questione aperta, con rischi difficilmente calcolabili, come si può vedere dovrebbe sparire prima del petrolio. Non è quindi una possibile soluzione del problema.

	RISERVE ACCERTATE (MILIARDI DI TEP)	CONSUMO ATTUALE (MILIARDI DI TEP)	DURATA RISERVE (ANNI)
PETROLIO	135	3.2	42
GAS NATURALE	120	1.8	67
CARBONE	540	2.3	235
URANIO	18	0.6	27

Figura 4. Riserve accertate, consumi attuali (in Miliardi di Tonnellate equivalenti di petrolio) e durata (anni) sulla base dei consumi attuali per le principali fonti primarie di energia.

I vincoli di natura ambientale imposti dall'applicazione del protocollo di Kyoto, recentemente divenuto legge internazionale, possono trasformarsi in una grande opportunità di sviluppo tecnologico ed economico se le politiche energetiche cammineranno sulle due gambe rappresentate dall'uso razionale ed efficiente dell'energia e sullo sviluppo delle fonti rinnovabili. In questo quadro il vettore energetico del futuro, pulito ed efficiente potrebbe essere l'Idrogeno soprattutto se prodotto dalle rinnovabili.

L'energia pulita non esiste: l'unica energia pulita è quella che non si usa (o che non c'è bisogno di usare, quindi risparmiata). Il risparmio più significativo come si è visto è quello di secondo ordine. Più che di risparmio energetico si dovrebbe parlare quindi di risparmio entropico. In sostanza l'energia va utilizzata al livello di qualità che possiede. Per esempio ad una analisi attenta si vede che nel Paese buona parte della domanda elettrica negli usi finali, sia nell'industria che nei settori civile e terziario, è finalizzata a scopi termici. La gerarchia qualitativa delle differenti forme energetiche impone dei vincoli di cui la pianificazione energetica dovrebbe tenere conto in fase di programmazione/installazione di nuovi impianti e nella fase di riordino del sistema. In un ottica integrata, ci si dovrebbe basare sui concetti di 'localizzazione' e di 'uso razionale' dell'energia. La localizzazione consiste nella mappatura o georeferenziazione delle diverse tipologie di domanda energetica presenti sul territorio: si tratta in pratica di localizzare i siti dove viene richiesta principalmente energia termica a bassa temperatura piuttosto che i siti dove invece è preminente la domanda elettrica. La necessità di localizzare la domanda termica è dettata dalla termodinamica. Il trasferimento di calore a distanza è ovviamente soggetto a fenomeni di dispersione e di raffreddamento; questo impone che l'installazione di centrali (cogenerative o meglio trigenerative) con funzioni preminentemente termiche (e di raffrescamento), debba essere posizionata a più breve distanza possibile dall'utenza finale. Le stesse ragioni termodinamiche impongono vincoli sulla dimensione, o la taglia, degli impianti: la possibilità di tenere conto della diversificazione della domanda e contemporaneamente ridurre i consumi di risorse

migliorando l'efficienza energetica della produzione e la razionalità negli usi finali è data tecnologicamente dalla cogenerazione con una dimensione medio-piccola degli impianti (microcogenerazione diffusa) che sembra essere la più idonea per la giusta modulazione dell'offerta alla reale domanda di energia, evitando il rischio di sprechi dovuti al sovradimensionamento. Una approfondita e puntuale georeferenziazione della domanda energetica passa inevitabilmente attraverso la costruzione di 'catasti energetici' costruiti su diverse scale territoriali dove la mappatura della domanda termica a diversi livelli di temperatura permetterà la sinergia tra settori economici anche diversi e risparmio delle risorse e dello spazio con gli strumenti indispensabili per una nuova *Governance* orientata alla decarbonizzazione dell'economia, vedi [2] e [3].

Per quanto riguarda le energie rinnovabili che rappresentano l'altro elemento irrinunciabile di un processo virtuoso per lo sviluppo di politiche energetiche più sensibili ai vincoli ambientali e territoriali non è questa l'occasione per elencarne i pregi evidenti e le grandi potenzialità connesse alla loro dimensione e distribuzione.

Ragioniamo un momento su quelli che sembrano essere gli elementi di criticità che ad oggi hanno ostacolato la penetrazione delle fonti rinnovabili più promettenti come il solare fotovoltaico e l'eolico. Come è noto nel caso del secondo è ormai raggiunta la competitività economico/finanziaria con le altre modalità più invasive di produzione elettrica. Entrambe le fonti però condividono la criticità dovuta all'intermittenza (discontinuità della fornitura) e alla scarsa densità di potenza per unità di superficie/volume. Questi 'difetti' intrinseci potranno essere superati nel futuro se queste fonti verranno usate per la produzione di idrogeno che potrebbe diventare quindi il vettore energetico della transizione. L'idrogeno infatti se prodotto dal *reforming* del metano o di altri idrocarburi di origine fossile consente indiscutibilmente di diminuire l'impatto ambientale, ma non risolve il problema strutturale della scarsità delle fonti fossili oltre a quello di una perdita exergetica notevole. Se prodotto invece dalle rinnovabili unirebbe il vantaggio ambientale a quello di non condividere con le fonti di partenza il problema della limitata stoccabilità e della bassa densità di potenza. Le stime recenti sullo sviluppo del fotovoltaico e dell'eolico sono molto incoraggianti per questa prospettiva con incrementi nella produzione di moduli Fv del 36% in Giappone nel 2003 e con incrementi del 24% sull'anno precedente per l'eolico in Europa negli ultimi due anni grazie soprattutto alla Germania, [1].

Un ruolo significativo potranno averlo anche le biomasse (e tutte le forme ad esse correlate come biogas e/o biodiesel) che non presentano il problema della discontinuità e che vengono valorizzate dall'entrata in vigore del Protocollo di Kyoto. Insieme ad iniziative legislative orientate a favorire lo sviluppo diffuso delle rinnovabili, la prospettiva del loro uso per produrre idrogeno è forse il dato tecnologico più promettente per un futuro più pulito che releghi il petrolio ad un ruolo residuale, come il petrolio ha fatto nel secolo scorso per il carbone. In ultima analisi considerato che il nucleare è messo fuori gioco dalla irrisolta questione delle scorie, prima ancora che dai rischi di incidente catastrofico, il futuro non dovrà avere le forme di un ritorno al passato

con l'opzione carbone (e i costi ambientali ed economici che le norme di Kyoto non potranno non penalizzare), ma di un atto di ottimismo verso vettori e tecnologie pulite come l'idrogeno prodotto da rinnovabili.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Basosi R., Prospettive della politica energetica, l'Italia dopo Kyoto e verso il terzo millennio, *La Chimica e l'Industria*, 5, 2005, pp. 48-51.
- [2] Basosi R., Verdesca D., *Politiche energetiche per enti locali e regioni*, Il Sole24Ore, Milano 2005, pp. 1-468.
- [3] Basosi R., Verdesca D., L'energia delle regioni, *QualEnergia*, 5, 2005, pp. 60-63.
- [4] Commoner B., *La povertà del potere*, tr. it. Garzanti, Milano 1976.
- [5] Commoner B., *Il cerchio da chiudere*, tr. it. Garzanti, Milano 1973.
- [6] Feynman R. P., Leighton R. B., Sands R., Masson M., *La fisica di Feynman*, tr. it. Zanichelli, Bologna 2001.
- [7] Tiezzi E., *Tempi storici, tempi biologici*, Garzanti, Milano 1984.
- [8] Zemansky M. W., *Calore e termodinamica*, Zanichelli, Bologna, 1981.

QUALI RISORSE ENERGETICHE?*

ROBERTO VACCA

1. Fonti e consumo d'energia

Le fonti primarie (legno, carbone, petrolio, gas, idroelettrico + nucleare + geotermico – sommati) hanno fornito nel mondo le porzioni di energia rappresentate nel diagramma di Fig.1. Le ordinate del diagramma sono proporzionali ai logaritmi di $F_i/(1-F_i)$, ove F_i è la percentuale dell'energia primaria fornita dalla fonte i .

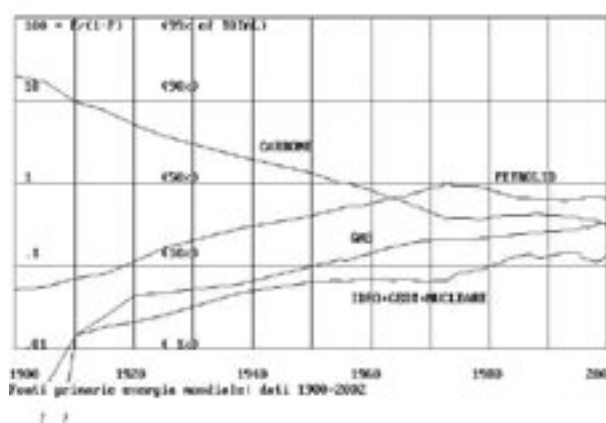


Figura 1. Ripartizione fonti primarie di energia nel mondo.

In questa rappresentazione, se un diagramma è rappresentato da una retta inclinata verso l'alto o verso il basso, ciò significa che la variabile relativa è governata da un'equazione di Volterra-Lotka, segue, cioè, una curva ad S (o logistica) che parte e arriva a tratti orizzontali (in cui la variabile ha valore costante). Il declino del carbone nel secolo XX aveva pendenza vicina a quella già verificata col declino del legno nel secolo XIX e il declino del petrolio dopo il 1973, sembrava inizialmente destinato a seguire una terza curva parallela alle due dette. La crescita del gas avvenne con una pendenza vicina a quella del petrolio fino al 1970. Vent'anni dopo, però, il gas non ha superato il petrolio. Le 4 fonti considerate hanno mantenuto a lungo percentuali costanti. Il gas ha raggiunto il carbone nel 1999 e le 2 fonti forniscono la stessa percentuale fino al 2003.

Il consumo di energia è cresciuto senza posa nel secolo XX. Nel 2002 era di 428 EJ/anno [1 ExaJoule = 10^{18} Joules] cioè 9.405 MTEP (milioni di tonnellate equivalenti di petrolio). Adattando alla serie 1925-2002 dei consumi mondiali una equazione di

Volterra, si ottiene una proiezione al 2050 di 477 EJ (10.570 MTEP). La Fig.2 mostra la curva logistica dell'energia totale che meglio si adatta ai dati empirici.

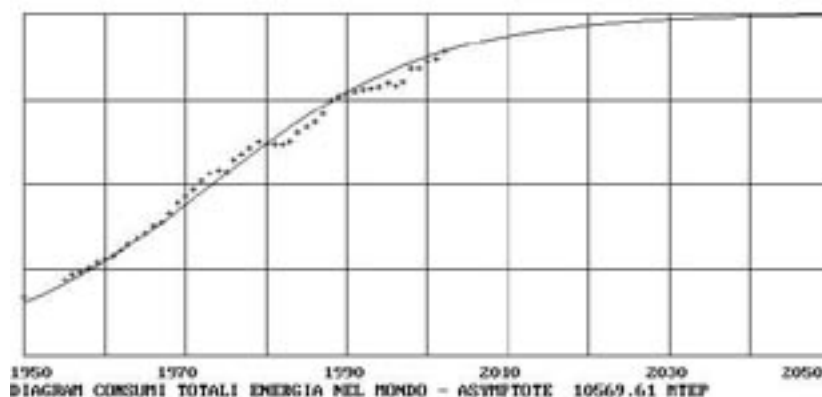


Figura 2. Consumo energia totale nel mondo: dati rilevati e curva logistica.

Carbone, petrolio, gas, idroelettrico + nucleare + geotermico (sommati) hanno fornito in Italia le porzioni di energia riportate in Fig.3.

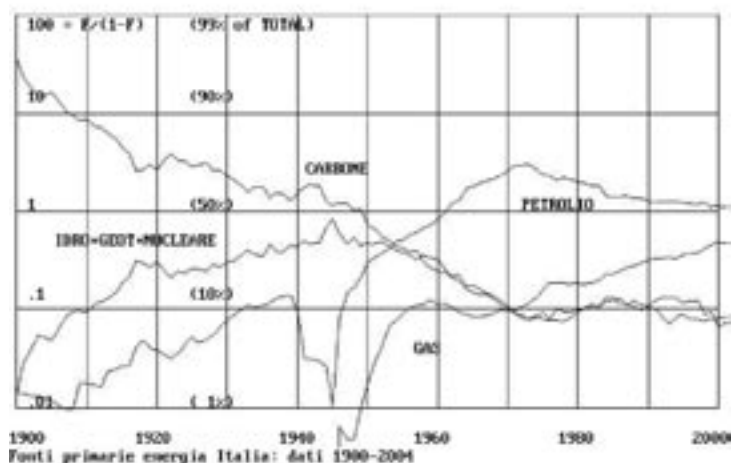


Figura 3. Ripartizione fonti primarie di energia in Italia.

Il declino del carbone iniziò anche in Italia con il secolo XX. Dal 1970 oscilla intorno al 10% del totale. Il declino percentuale del petrolio dal 1973 sembrava inizialmente destinato a seguire un andamento simile a quello del carbone a metà del secolo scorso. Invece negli ultimi 20 anni ha rallentato. Se continuano gli andamenti attuali, potremmo attenderci che verso il 2025 le porzioni fornite da gas e petrolio vadano a coincidere al 42%, mentre il 16% sarà fornito in ugual misura da carbone e idroelettrico più geotermico.

Il consumo totale di energia in Italia è raddoppiato dalla metà degli anni '60 raggiungendo oggi 186 MTEP. (milioni di tonnellate equivalenti di petrolio). Adattando alla serie dei consumi 1900-2004 un'equazione di Volterra, otteniamo una proiezione

al 2050 di 216 MTEP. La Fig.4 mostra la logistica che meglio si adatta ai dati empirici dell'energia totale italiana.

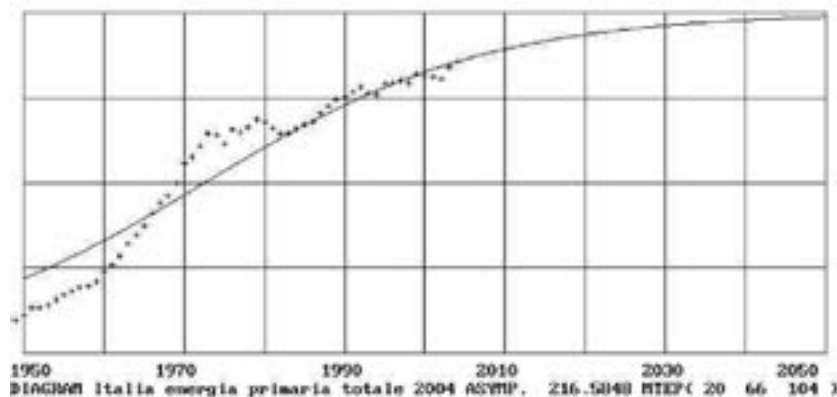


Figura 4. Energia totale consumata in Italia: dati rilevati e curva logistica.

La crescita dei consumi energetici, dunque, continua e in termini assoluti, rallenta. Però la quota percentuale calante del petrolio corrisponde negli ultimi 25 anni a una quantità assoluta che oscilla di poco intorno a 90 MTEP. L'aumento dei consumi di energia così previsto nel prossimo quarto di secolo implicherà problemi relativi alla disponibilità di risorse, oltre che agli impatti ambientali. Occorre analizzare e pianificare l'uso di risorse energetiche diverse al petrolio.

Secondo le proiezioni precedenti l'incremento dei consumi da oggi al 2050 dovrebbe essere quello riportato nella tabella seguente.

Fonte	petrolio	gas	carbone	idro + geot.	totale
2004	90 MTEP	60	18	18	186
2050	90 MTEP	90	18	18	216

Taluno considera preoccupante questo aumento di circa il 18% nel ricorso ai combustibili fossili, costituito da 30 MTEP di gas naturale. Questo causerebbe un aumento eccessivo dell'effetto serra dovuto al CO_2 prodotto. Ne conseguirebbe un aumentato riscaldamento globale con conseguenze ambientali insostenibili. La tesi è contenuta nel Protocollo di Kyoto del 1992. Tale documento, pur firmato da 154 Paesi (stilato nel 1997 ed entrato in vigore nel 2005), non contiene alcun dato numerico, nè cita alcuna analisi scientifica di tali processi. Si limita ad affermare gratuitamente che sono le attività antropiche a causare riscaldamento globale modificando il clima terrestre. Gode, quindi, di scarsa considerazione fra gli esperti.

Analisi più accurate indicano che il riscaldamento globale ha cause primarie astronomiche alle quali *consegue* un aumento dell'anidride carbonica atmosferica e un aumento dell'effetto serra. (v. Vacca, R. "La verità sull'effetto serra", M!ND Agosto 2005). Certo, anche se bruciare petrolio e metano non è davvero rischioso ai fini dell'impatto sul clima, queste sostanze sono alla base dell'industria petrolchimica e

della plastica con utilità ben maggiore di quella ottenuta bruciandole. Inoltre esse sono soggette a rischi di approvvigionamento e a costi crescenti. Gli aumenti del prezzo del greggio sono drammatici: documentati dalla stampa e percepiti direttamente con l'aumento del prezzo dei carburanti. Misure efficaci da prendere in ogni caso, consistono nello sviluppare energie alternative che evitino di bruciare combustibili fossili.

2. Ritorno al nucleare – quale nucleare?

Per ridurre drasticamente la rischiosa dipendenza dell'Italia da fonti energetiche importate, converrebbe ricorrere di nuovo all'energia nucleare. Ogni dibattito in merito, però, è pervaso da considerazioni passionali e da disinformazione. In Italia le centrali esistenti sono state fermate e quella di Montalto è stata convertita in termoelettrica dopo il referendum del 1987, i cui quesiti erano e sono largamente ignorati dall'opinione pubblica, dai media, da pubblicitari e sociologi.

Le tecnologie a cui ricorrere per creare di nuovo una industria e una produzione elettronucleare in Italia sono ben note. Il libro "Orizzonti della Tecnologia Nucleare Italiana" (a cura di E. Mainardi e U. Spezia, Associazione Italiana Nucleare, 21° Secolo, 2005) analizza l'intera situazione alla luce dei progressi tecnologici notevoli compiuti negli ultimi due decenni. Le prospettive dell'energia nucleare in Italia appaiono incerte non per ragioni tecniche, ma per motivi di inadeguatezza culturale.

Per consentire ai decisori pubblici e privati di formulare piani di sviluppo razionali e realistici, occorre intraprendere una vasta operazione culturale che fornisca informazione corretta in termini semplici atti a raggiungere un pubblico vasto. Sono da illustrare i punti seguenti.

Referendum del 1987

Il referendum non verteva sull'impiego del nucleare, nè certo sulla eventuale opportunità di chiudere le centrali esistenti. I referendum in Italia possono solo essere abrogativi. Poneva quesiti che hanno ridato al Parlamento facoltà di scegliere i siti senza compensi ai Comuni interessati.

Sicurezza

Il disastro di Chernobyl ha provato che l'addestramento degli operatori è fattore vitale. A Chernobyl con leggerezza inaudita (in assenza di ingegneri nucleari) ingegneri elettrotecnici tolsero le sicurezze dall'impianto e provarono se in caso di distacco dalla rete, l'energia immagazzinata nei rotor dei turboalternatori fosse adeguata ad abbassare le sbarre di carburo di boro. Non lo era e l'impianto esplose. La catastrofe sarebbe stata molto meno grave, se il reattore fosse stato contenuto in guscio di acciaio come quelli USA. Gli effetti dell'incidente alla centrale di Harrisburg (USA) furono contenuti dallo scudo metallico e notoriamente non causarono alcun evento fatale.

Nuove soluzioni

I timori riguardanti i rischi dovuti a centrali nucleari vengono discussi con riferimento alla struttura di centrali di molti decenni or sono. A parte il fatto che quelle realizzate

in USA, Canada, Francia erano già molto più sicure di quelle russe, i progetti e le realizzazioni cui si mira attualmente sono intrinsecamente sicure. Gli interventi di sicurezza non avvengono in essi in base al funzionamento di sistemi attivi (sensori e motori elettrici), ma per azione di forze naturali (gravità, dilatazione di elementi in bimetalli). Il reattore MARS è stato progettato all'Università di Roma consiste di moduli da 200 Mwe; è componibile, cioè costituito da elementi flangiati sostituibili singolarmente in caso di usura o danneggiamento (anche da radiazioni). Quindi i tempi di costruzione sono drasticamente ridotti. La vita del MARS è praticamente illimitata riducendo drasticamente le spese di smantellamento, citate come troppo onerose nei dibattiti correnti. Il costo e la produzione di scorie sono molto limitati.

Alternativa attraente è quella di passare a reattori di IV generazione ad alta temperatura raffreddati a gas. Questi, oltre ad essere più sicuri dei reattori ad acqua, possono raggiungere temperature di 1000°C cui conseguono rendimenti termodinamici del 50% e la possibilità di produrre economicamente idrogeno per via termochimica. Ne furono realizzati prototipi in USA e in Germania, ma si affermò già dai primordi la preferenza per i reattori ad acqua, molto più compatti e adatti a essere installati in sottomarini. A.S. Thompson ha documentato la storia del pesante coinvolgimento in quelle decisioni dell'Ammiraglio H.J. Rickover

Tendenze attuali in altri Paesi

Col metano 3 volte più caro di 10 anni fa, ci sono 24 centrali elettronucleari in costruzione nel mondo (fra cui 8 in India, 4 in Russia, 3 in Giappone, una in Finlandia). La prima pietra della nuova centrale finlandese di Olkiluoto (la quinta del Paese) è stata posta il 12/9/2005. È un reattore EPR (ad acqua in pressione) della potenza di 1600 Mwe e del costo di 3 G€ (1.9 k€/kW). In USA 9 produttori di energia insieme a 2 costruttori, hanno costituito il consorzio NuStart ("Ripresa") per progettare nuove centrali atomiche moderne, raffreddate ad acqua, ma a sicurezza passiva. La NRC (Nuclear Regulatory Commission) ha già approvato il progetto di una centrale Westinghouse da 1 GW. La General Electric ne progetta una da 1,5 GW.

3. Altre fonti di energia alternative

Idroelettrico

Il potenziale idroelettrico mondiale ancora non sfruttato è di circa 1500 GW (equivalente a 1500 grandi centrali nucleari a fissione), che potrebbero produrre 40 EJ/anno in più. Gli impianti fattibili si dovranno costruire in luoghi remoti in Africa, Asia e Sud America e la potenza si dovrà trasportare a migliaia di km in corrente continua a tensioni di oltre 1 MV. Sono noti i grandi programmi in corso, in particolare in Cina.

Di interesse europeo, e italiano, è la diga della Grande Inga sul fiume Congo che potrebbe produrre secondo uno studio del Prof L Paris 30 GW per 8700 ore/anno cioè 260 TWh/anno. L'apporto di tale energia, unito a quella idroelettrica e geotermica già disponibile, sarebbe tale non solo da soddisfare l'intera nostra domanda di energia elettrica, ma di consentire anche l'accumulo in laghi alpini e appenninici e l'esportazione

a Paesi limitrofi. L'energia potrebbe essere trasportata in Italia su cavo sottomarino a ± 1 MV in corrente continua, della lunghezza di circa 8.000 km. Le perdite nel cavo sarebbero di circa il 15%. Il costo dell'impianto della grande Inga, valutato verso il 1980 ammontava a circa 100 TL -- e includeva il cavo sottomarino. Ai livelli attuali il costo dell'impianto dovrebbe essere dell'ordine di 150 G€. Occorrerebbe ovviamente ricalcolarlo tenendo conto dei progressi tecnologici e dell'ipotesi di usare come vettore l'idrogeno invece di elettricità via cavo.

Solare fotovoltaico

Il solare fotovoltaico darebbe un contributo decisivo, se si raggiungessero rendimenti molto maggiori degli attuali. Ciò si otterrebbe usando rectenne, nanotubi di carbonio inclusi in polimeri. Il massimo teorico del 93% fu determinato nel 1977 da P.T. Landsberg. Oggi la tecnologia è studiata da Martin Green all'università del South Wales (Australia) utilizzando film sottili avanzati di terza generazione. Finora si sono ottenuti rendimenti del 35%. Si spera di conseguire rendimenti dell'80%, con un costo di produzione di 0,2\$/Watt. Si tratta di tecnologie avveniristiche per realizzare le quali occorrono sforzi di ricerca notevoli. Sarebbe azzardato sperare in sviluppi interessanti in Italia: i dati pubblicati da ISTAT (Ottobre 2005) indicano che gli investimenti in R&S erano 1.16% del PIL nel 2002 e 1.14 nel 2003. Nel 2004 gli investimenti degli enti pubblici sono scesi dell'11%. Gli investimenti delle imprese si prevede che salgano nel 2005 del 5,1%: inadeguato rispetto al livello che è 1/3 della media europea. Il numero degli addetti alla ricerca è diminuito nel 2003 dell'1,3%.

Eolico

L'Italia è al quinto posto in Europa per la potenza installata con aeromotori (1.125 MW – dopo Germania con 16.629, Spagna con 8.263, Danimarca con 3.117). L'energia elettrica prodotta, però, è solo lo 0,5% del totale. I costi di impianto non sono alti (1k€/kW), ma il coefficiente di utilizzazione è solo del 25%: si conta in media su 2.200 ore/anno. Non possiamo attenderci, quindi, contributi apprezzabili da questa fonte.

NOTE

* Contributo alla Conferenza/Dibattito che ha avuto luogo a Livorno, il 18 Ottobre 2005, nell'ambito di Pianeta Galileo 2005.

LA PREVENZIONE DEL DISAGIO GIOVANILE

STEFANO CALAMANDREI

Psichiatra A.S.L. 10 Firenze – MOM SMA Q5

1. Il formarsi del senso di realtà. Adolescenti e compiti evolutivi

Durante il processo di crescita, per un equilibrato sviluppo psicologico, vi deve essere un costante e progressivo avvicinamento tra i ragazzi e la realtà. Questa integrazione con il mondo del reale, sia oggettivo che sociale, avviene in maniera graduale e sempre più intensa mano a mano che ci si inoltra nell'età adolescenziale. Il ragazzo, fino dai primi anni delle Medie Inferiori, comincia ad inserirsi attivamente nella società ed è opportuno, quindi, che inizi a misurarsi con fatti, esigenze ed impegni del tutto nuovi. Per questo deve essere in grado di attivare alcune nuove capacità che vengono abitualmente definite con il termine di 'compiti evolutivi'.

I compiti evolutivi sono attività che si situano a metà strada tra un bisogno individuale ed una richiesta sociale, e possono essere portati a termine solo se il ragazzo riesce ad effettuare un compromesso psicologico interiore. Ogni compito ha la funzione di mettere alla prova e stimolare il ragazzo a superare positivamente la condizione di sviluppo in cui si trova, preparandolo ad affrontare le fasi successive.

Se facessimo un elenco dei compiti che devono essere affrontati nell'adolescenza avremmo una lista lunghissima di compiti complessi e intersecati tra loro. Infatti in pochi anni un ragazzo o una ragazza devono imparare a padroneggiare un corpo ed un mondo che cambia, e che, da loro, pretende sempre di più. Devono sapersi adattare ai rapidi e rilevanti cambiamenti somatici a cui stanno andando incontro, e saper ricostituire, di volta in volta, una nuova unità somato-psichica soddisfacente. Devono saper accettare le proprie pulsioni ed imparare a padroneggiarle secondo i valori condivisi. Devono saper instaurare e mantenere dei rapporti affettivi con i coetanei dello stesso e dell'altro sesso. Devono sapersi integrare e partecipare ai gruppi di coetanei, sapendo sviluppare contemporaneamente la propria indipendenza ed autonomia. Devono riuscire a stabilire una interazione adeguata con le istituzioni sociali, come la scuola ad esempio, dove poter formare un proprio sistema di valori, e riuscire così a progettare il proprio futuro. Come si vede ci sono molti doveri ed è naturale che ci sia molta resistenza ad affrontarli.

Nel mondo moderno questa serie di successioni, veri e propri gradini del percorso evolutivo, non sono facilitati, come era un tempo, dai riti di iniziazione, che da sempre hanno accompagnato l'adolescenza, né dalla comunità che, invece, sosteneva il giovane adulto in questa difficile fase.

Il rito funzionava da mediatore psicologico, sia sociale che individuale, e serviva per sopportare la tensione, la confusione, il confronto con la realtà esterna e le sue esigenze. Questo aiutava a fare un compromesso con il mondo interiore, ed alla fine, principalmente, donava un ruolo, che aiutava a trovare gradualmente la propria collocazione nella comunità, ed in cui era possibile riconoscersi, identificarsi, potersi sentire sé stesso.

Nel mondo moderno non avendo più un aiuto in questa delicata fase di passaggio, l'adolescente tende a soffrire maggiormente, è effettivamente più solo, ed ha difficoltà ad individuare ruoli sociali definiti da utilizzare come modello per le sue identificazioni, ed a cui potersi appoggiare. Ogni giovane trova pertanto difficoltà e sofferenza proprio nel momento in cui comincia a costituire la propria identità.

2. Il disagio giovanile

Con il termine di *disagio* recentemente si è definito, in modo generico, un'area di malessere giovanile che in precedenza era anche definita dai termini disadattamento o devianza, e che oggi, purtroppo, sono diventati quasi sinonimi. A volte questi termini vengono considerati tappe d'un percorso di progressione patologica che partendo dal malessere soggettivo, porterebbero fino ad una condizione di malattia psichiatrica o di aperto conflitto con la società. In realtà per disagio, come viene inteso dalla pedagogia e dalla psicologia, si considera una condizione psicologica legata soprattutto a percezioni soggettive di malessere, si può dire che il disagio si "sente", ma non è detto che si "veda".

Con disadattamento invece si definisce una situazione in cui esiste maggiormente un problema di alterazioni comportamentali che possono emergere anche come problemi di disciplina, come bene viene chiarito da Winnicott con la nozione di antisocialità. La devianza, infine, attiene alle trasgressioni di norme con una gravità o provocatorietà tale da determinare una definizione di stigma sociale.

Una definizione di *disagio* potrebbe essere che questo è, in realtà, una domanda, un bisogno, non ancora patologico, ma psicologico o affettivo, che include le difficoltà familiari, di relazione, o scolastiche, all'interno del più generale malessere esistenziale connesso al processo di costruzione dell'identità personale. Qualsiasi definizione che potremo dare si concentrerà comunque sulle capacità del soggetto di affrontare i compiti evolutivi nella transizione verso l'età adulta e sui condizionamenti derivanti dal confronto con la cosiddetta società complessa. È evidente che la definizione è così generica che individua una situazione diffusa, una condizione di difficoltà nel crescere che investe ogni adolescente, e si confonde con la cosiddetta normalità.

Perché una difficoltà, un disagio adolescenziale divenga disadattamento, bisogna anche che intervengano dei "fattori-rischio" e che questi riguardino i molti aspetti della vita di una persona e non solo il suo aspetto scolastico, come per esempio le problematiche familiari, o la deprivazione culturale, la marginalità socioeconomica, la carenza di offerte di tempo libero e di aggregazione, e perfino quali sono gli atteggiamenti

con cui viene affrontata la devianza. Un giovane, infatti, può trovarsi in una condizione di marginalità per nascita o per storia familiare, come un giovane immigrato; e in questi casi c'è un forte rischio di cronicizzazione del disturbo. Oppure ci può essere una condizione di marginalità, per i meccanismi di emarginazione indotti proprio dal sistema sociale, in seguito al percorso di disadattamento.

Molto spesso le conseguenze psicologiche di un simile itinerario emarginante portano alla perdita dell'autostima, alla perdita di senso della propria vita. Questo può condurre alla interiorizzazione della marginalità stessa come cultura, che diviene un modello di comportamento e di identificazione (una sorta di rito di iniziazione patologico che la società offre al giovane), che prelude all'autoemarginazione in subculture separate, antagoniste nei confronti dei valori della società, alla ribellione come identità.

Nell'età adolescenziale la devianza è sostanzialmente un prodotto sociale, un etichettamento che può indicare, in eguale misura, comportamenti anticonformisti e condotte antisociali, gesti determinati da circostanze casuali e atti di deliberata ribellione. In questo caso l'impegno preventivo dell'operatore e della scuola rischiano di assumere i connotati del semplice controllo a difesa della norma e della conformità. Alcuni autori infatti, di fronte a definizioni generiche, ma troppo connotate in senso patologico, di comportamenti tipicamente adolescenziali, hanno suggerito di sostituire l'espressione *devianza* con *comportamento improprio*. Riassumendo sotto questo termine le condotte ritenute inadeguate al conseguimento dei compiti evolutivi dell'adolescenza. Queste condotte possono tradursi in una condizione di devianza solo nel caso in cui il soggetto, sottoposto ad etichettamento, ad una diagnosi che ne stigmatizza il comportamento, dovesse riconoscersi in questa condizione. Poichè in questi anni di fragile strutturazione dell'identità è molto facile per un giovane in difficoltà, aderire ad un qualsiasi ruolo socialmente definito, anche se patologico. (In questo caso l'individuazione di sintomi precoci, per esempio, non ci indica la devianza, ma potrebbe essere considerato fattore-rischio, cioè proprio il formulare questa diagnosi influenza l'andamento sociale, e può generare od aggravare la situazione di emarginazione incipiente.)

Quando si deve applicare il concetto di prevenzione a tematiche psicosociali e socio-pedagogiche, in età adolescenziale, dove non è possibile individuare chiaramente un unico fattore su cui è possibile intervenire, dove lo schema di lettura di tipo lineare causa-effetto è impossibile, molto alto è il rischio, data anche l'imprevedibilità delle risposte soggettive, di influenzare negativamente, con una stigmatizzazione anticipata, una popolazione così facilmente influenzabile e condizionabile.

Possiamo considerare il disagio adolescenziale come un fattore fisiologico, normale, non eliminabile, ma costitutivo di quella età, testimone di quella fase di transizione che porta all'età adulta. Prevenire in maniera invasiva o normativa il disagio evolutivo potrebbe significare bloccare il processo di crescita di un ragazzo, di cui la crisi adolescenziale non è solo un elemento costitutivo, ma ne è anche l'insostituibile motore. È necessaria perciò una prevenzione che accompagni il giovane senza che questa proponga dei propri valori, dei ruoli già definiti, ma che affronti i problemi

per il significato specifico che assumono per ogni diverso ragazzo, con una modalità “transizionale”, mediatrice, e cioè che operi con il mutamento del giovane, in sintonia con il suo mondo interno.

Appare evidente come in letteratura e nella prassi operativa, ci sia stata, in questi anni, un’evoluzione dal termine prevenzione a quello di promozione. Proprio a testimoniare la diversa concezione d’approccio al disagio giovanile che deve rimandare piuttosto all’idea di un sostegno, di uno stimolo delle risorse, di aiuto all’emancipazione della soggettività.

3. La promozione della salute psicologica nella scuola

Impostare progetti di intervento in un’ottica di promozione comporta la scelta di operare in contesti di normalità, più che sulla patologia conclamata, sulla generalità della popolazione giovanile e non solo sui soggetti problematici, sui bisogni dei ragazzi e non solo sui rischi di devianza. Significa aiutare un ragazzo ad affrontare i suoi compiti evolutivi, diversi nelle diverse fasi di sviluppo della persona. Sapendo che realizzarli con successo conduce il ragazzo al raggiungimento di compiti ulteriori, mentre dal fallimento non può che derivare insoddisfazione, ulteriori difficoltà delle tappe successive e così via.

La promozione perciò dovrebbe preoccuparsi di creare condizioni adatte per consentire al giovane di affrontare in modo soddisfacente i propri compiti di sviluppo. La promozione deve agire facendo leva sui cosiddetti fattori protettivi, che si ritiene siano elementi capaci di esercitare un’azione di tutela degli equilibri psicologici e comportamentale di un individuo, soprattutto nelle situazioni di stress.

Alcune ricerche hanno dimostrato, in gruppi di studenti, che alcuni tratti, condizioni, o situazioni, possono alterare, o addirittura invertire le previsioni di psicopatologia basate su situazioni di alto rischio. In queste ricerche sono stati individuati gli elementi comuni che ricorrono a costituire i fattori protettivi e riguardano sostanzialmente quattro aree di competenza. La promozione dovrebbe porsi quindi come obiettivo l’incremento ed il rinforzo di questi fattori. Queste aree sono:

1. quella dell’autostima, cioè la sensazione di valore personale, di fiducia dell’efficacia della propria azione sull’ambiente;
2. l’autocontrollo, ovvero la capacità di controllare i propri impulsi e di rinviare le gratificazioni;
3. le aspettative e le prospettive ottimistiche, l’orientamento verso il successo, l’abitudine a porsi e conseguire scopi, la fiducia nel futuro, l’adattamento al cambiamento;
4. la capacità di interazione sociale, le ricerche di una relazione sentimentale, la capacità di mantenerla, avere tolleranza e flessibilità.
- 5.

4. Il ruolo dell'insegnante

Il ruolo che esercita l'insegnante in questa lunga fase è determinante per la crescita sana del ragazzo, proprio perchè può interagire positivamente o negativamente sui fattori psicologici protettivi che si devono sviluppare nell'adolescenza. Certo deve essere un'insegnante attento e soprattutto formato a saper valutare e saper gestire le dinamiche relazionali che si stabiliscono tra ogni allievo e l'intero gruppo classe, e soprattutto le dinamiche psicologiche che si proiettano sulla sua figura. Ritengo che l'insegnante, se troppo immerso nel suo ruolo istituzionale, non riesca ad essere cosciente di queste dinamiche, e possa solo difendersi dal coinvolgimento emotivo negandolo o cercando di preservarsi dietro un agire tecnico, che ingenuamente può ritenere neutrale. Infatti, oltre ad essere una difesa psicologicamente molto faticosa, l'idea della neutralità è impossibile a sostenersi con i ragazzi, che invece vivranno tale atteggiamento come indifferenza nei loro confronti e di conseguenza moltiplicheranno gli sforzi per farsi considerare. Questo atteggiamento può portare ad un vero e proprio scontro tra l'adulto e il ragazzo, ad un braccio di ferro disciplinare che non sarà né educativo né evolutivo. E che molto spesso può determinare l'interruzione del percorso scolastico.

Più facilmente e con minore fatica psicologica, l'insegnante, se ben formato psicologicamente, può aiutare a far crescere i propri allievi in modo che siano più robusti interiormente, senza per questo trasformarsi in psicologo, purchè sappia lavorare anche con sé stesso, con le proprie emozioni. Un insegnante cosciente del proprio mondo emotivo, in sintonia con sé stesso, capace di gestire e muoversi nelle differenti dinamiche emotive, può facilmente mettersi in relazione con gli allievi, senza temere il coinvolgimento emotivo, ma anzi utilizzandolo come il suo più efficace strumento didattico.

PROGRESSO SCIENTIFICO-TECNOLOGICO E SVILUPPO ECONOMICO NELLA CINA CONTEMPORANEA

GUIDO SAMARANI

Dipartimento di Studi sull'Asia Orientale, Università Ca' Foscari, Venezia

Premessa

Lo sviluppo della scienza e della tecnologia in Cina è diventato, sin dagli anni Ottanta, un obiettivo strategico per il governo cinese, tanto è vero che esso figura tra le «quattro modernizzazioni» delineate sin dalla fine degli anni Settanta da Deng Xiaoping.¹

La rilevanza strategica del settore scientifico e tecnologico ha una duplice valenza: da una parte, essa è parte integrante di quella grande attenzione, in termini di programmazione politica e delle risorse, che la Cina sta dedicando ai temi della formazione del sapere, della scuola, della ricerca; dall'altra, essa è strettamente intrecciata all'impegno costante ai fini della crescita economica, i cui successi sono evidenti a tutti, accanto alle contraddizioni che essa ha provocato e sta provocando.

Tale nuovo approccio è da considerarsi tanto più straordinario se si pensa ai limiti e alle carenze che avevano contrassegnato la politica cinese in campo scientifico-tecnologico nei 30 anni successivi alla fondazione della Repubblica Popolare Cinese (RPC, 1949-1979). Dapprima (anni Cinquanta), infatti, fu il modello sovietico – con il semplice trasferimento di tecnologia industriale avanzata e quindi senza stimolare sostanzialmente le capacità indigene in campo scientifico-tecnologico – a influenzare largamente le politiche economiche nel settore; successivamente (fine anni Cinquanta, prima metà anni Sessanta), la scelta di una 'via cinese' alla industrializzazione spinse tra l'altro alla definizione di successivi Piani per la scienza e la tecnologia (i primi dal 1949), con significativi risultati. Infine, successivamente alla Rivoluzione Culturale (seconda metà anni Sessanta), si assistette in particolare ad un processo di decentramento nell'organizzazione scientifica².

A partire dalla fine degli anni Settanta, l'avvio – per l'appunto – del programma di riforme delle «quattro modernizzazioni» vide chiaramente il ritorno ad una politica di implementazione pianificata e coordinata, l'avvio di una nuova politica di attenzione e stimolo verso le competenze scientifiche e nuovi orientamenti nel settore, con in particolare un'accentuazione dell'importanza delle scienze applicate e dell'importazione di tecnologie industriali a scapito della passata enfasi sulla ricerca pura³.

1. Il quadro costituzionale

Nella Costituzione cinese promulgata nel 1982⁴, i riferimenti all'importanza dello

sviluppo scientifico e tecnologico sono vari e significativi. Nel 'Preambolo', si afferma che il compito principale del popolo cinese è oggi di «lavorare duramente per realizzare gradualmente la modernizzazione dell'industria, dell'agricoltura, della difesa nazionale e della scienza e tecnologia, per fare della Cina una nazione socialista di alto livello culturale e democratico». Nel *Capitolo I. Principi generali*, all'art. 14 si indica che il compito dello Stato di sviluppare le forze produttive si realizza tra l'altro «diffondendo scienza e tecnologia avanzate»; al successivo art. 19 si sottolinea che lo Stato «promuove l'educazione socialista ed eleva il livello culturale e scientifico del popolo di tutto il Paese», organizzando un sistema scolastico articolato e completo, provvedendo «all'educazione politica, culturale, scientifica, tecnica e professionale di operai, contadini, funzionari dello Stato ed altri lavoratori e incoraggiando la formazione professionale autodidatta. All'art. 20 si enfatizza come lo Stato «promuove lo sviluppo delle scienze naturali e sociali, la diffusione delle conoscenze scientifiche e tecniche, elogia e ricompensa i risultati delle ricerche scientifiche, le scoperte e le invenzioni tecniche».

Nel *Capitolo II. I diritti e i doveri fondamentali dei cittadini*, si sottolinea all'art. 47 la libertà di cui godono i cittadini cinesi nel campo della ricerca scientifica e l'aiuto che lo Stato fornisce a coloro che si dedicano all'educazione e alla scienza. Nel *Capitolo III. L'ordinamento dello Stato*, si indica tra l'altro come (art. 70) l'Assemblea Nazionale Popolare⁵ istituisce nel suo seno varie commissioni specifiche, tra cui quella per la scienza; e all'art. 89, si prevede che il Consiglio per gli Affari di Stato⁶ «guida e gestisce il lavoro concernente l'educazione, la scienza, la cultura ...».

In seno al Consiglio per gli Affari di Stato, i principali ministeri che hanno competenza generale nel settore sono il Ministero per la Scienza e Tecnologia (sigla MOST) e la Commissione Statale per la Scienza, Tecnologia e Industria per la Difesa Nazionale (i cui poteri sono equiparati a quelli del ministero), anche se altri ministeri – tra cui in particolare il Ministero dell'Educazione – hanno parziali competenze nel settore. Il Ministero si occupa soprattutto del coordinamento delle varie attività nazionali, formulando le linee guida, le politiche e i regolamenti, definendo i piani annuali e pluriennali di sviluppo, in modo da ottimizzare le risorse, facilitare la commercializzazione dei prodotti tecnologici e la diffusione delle tecnologie applicate. Nel suo ambito, opera un apposito Dipartimento per la cooperazione internazionale.

La Commissione, che originariamente cumulava responsabilità di carattere civile e militare, si occupa ora solo del lavoro degli istituti di ricerca non militari, essendo stato costituito un apposito Dipartimento generale degli armamenti con specifica competenza sulle attività scientifiche e tecnologiche collegate all'apparato militare. La Commissione svolge essenzialmente un ruolo di sostegno e di rafforzamento dell'opera di coordinamento e di gestione generale svolta dal Ministero, ma opera specificamente nel campo del controllo della qualità, della sicurezza, degli standard, e – attraverso due specifiche agenzie – nei settori della politica spaziale e dell'energia atomica.

L'attività degli organismi ministeriali è corroborata e rafforzata dal lavoro di numerosi organismi, agenzie e uffici che si dedicano in particolare alla implementazione delle

politiche nel settore. Responsabilità analoghe a quelle degli organismi centrali vengono previste nelle sezioni successive del Capitolo III per gli organi di governo locali e per gli organi di autogoverno delle zone ad autonomia etnica.

2. Strategie politiche ed organizzative

Aldilà delle norme costituzionali, tuttavia, appare impressionante l'ampiezza dell'impegno politico, organizzativo ed istituzionale che nella RPC viene dedicato ai settori scientifico e tecnologico e la profondità delle riforme avviate e dei progressi compiuti in questo ultimo ventennio.

Nel marzo del 1985, il Comitato Centrale (CC) del Partito Comunista Cinese (PCC) ha approvato la «Decisione di riformare il sistema di gestione del settore scientifico e tecnologico».

Alla base di tale decisione è il principio secondo cui l'edificazione economica poggia sulla scienza e la tecnologia: si tratta di un assunto innovativo se si pensa all'impostazione generale che era prevalsa in passato, con da una parte l'assunzione negli anni cinquanta del modello sovietico quale punto di riferimento e, successivamente, con una politica che aveva fatto della emarginazione e penalizzazione delle risorse umane nel settore scientifico-tecnologico uno dei suoi cardini. Tra l'altro, la «Decisione» del 1985 – dato anche questo nuovo – afferma con forza l'importanza dell'assorbimento del know-how tecnologico dall'estero ai fini dello sviluppo nazionale.

Le indicazioni generali del 1985 sono state successivamente traslate in norme operative negli anni immediatamente successivi, e negli anni Novanta e in questi primi anni del nuovo secolo esse sono state ulteriormente aggiornate e arricchite con l'approvazione di varie leggi, norme e disposizioni varie.

La *Legge sul progresso scientifico e tecnologico*⁷ del 1993 stabilisce tra l'altro che la Cina promuove la cooperazione e gli scambi con governi stranieri ed organizzazioni internazionali e incoraggia a tal fine agenzie di ricerca, istituzioni di istruzione superiore, ecc ad avviare forme varie di cooperazione con gli ambienti scientifici e tecnologici stranieri. Essa prevede inoltre l'istituzione di un Premio per la Cooperazione Scientifica e Tecnologica Internazionale.

Nel 1995 è stata approvata congiuntamente, dal CC del PCC e dal Consiglio per gli Affari di Stato, la «Decisione di accelerare il progresso scientifico e tecnologico», nella quale si ribadisce lo stretto legame tra sviluppo economico, sviluppo scientifico-tecnologico e «economia socialista di mercato». La «Decisione» sollecita tra l'altro gli enti di ricerca a creare, al pari di quanto era già avvenuto e stava avvenendo nel campo economico-commerciale, joint-ventures con partner cinesi e stranieri al fine di accelerare il trasferimento dei risultati al settore industriale. In essa, inoltre, si riafferma la priorità della cooperazione internazionale per la Cina, e si sottolinea come tale cooperazione debba essere innanzitutto finalizzata alla crescita economica nazionale, nel rispetto dei principi di eguaglianza e di mutuo beneficio e delle pratiche internazionali consolidate.

Nel 1996, ancora, è stata approvata la *Legge per promuovere la trasformazione dei risultati scientifici e tecnologici*. L'obiettivo essenziale della legge era di incoraggiare la creazione e l'utilizzo di quei risultati, prodotti dalla ricerca scientifica e tecnologica, finalizzati ad elevare la produttività, a creare nuovi prodotti, e sviluppare nuove attività.

Nel 1999 è stato approvato il *Regolamento sulle ricompense statali per la scienza e la tecnologia*. Si tratta di premi destinati al settore delle scienze naturali, delle innovazioni tecnologiche, dei progressi in campo scientifico-tecnologico e della cooperazione internazionale e riservati a singoli od organizzazioni straniere che si sono distinte nella cooperazione con partner cinesi, ottenendo significativi risultati nel campo della ricerca o del trasferimento di tecnologie avanzate o nel rafforzamento della cooperazione con la Cina. La rosa dei potenziali candidati ai premi spetta alle ambasciate cinesi all'estero, mentre spetta al Consiglio per gli Affari di Stato assegnare formalmente il premio. Il regolamento prevede altresì la possibilità per i governi provinciali e regionali di istituire premi analoghi.

Nel 2002, infine, è stata approvata la *Legge sulla popolarizzazione della scienza e tecnologia*. Si tratta di una legge di grande rilievo che muove dall'assunto secondo cui la scienza è vitale per lo sviluppo di una sensibilità educativa in un paese moderno: dunque, la diffusione delle conoscenze scientifiche tra la gente comune, aldilà degli scienziati ed esperti, è vista come un obiettivo essenziale per il futuro.

Il compito di promuovere tale popolarizzazione è affidato innanzitutto al governo nazionale – che formula i piani generali per la popolarizzazione – nonché ai governi locali e in particolare alle associazioni per la scienza e la tecnologia sorte nel corso degli anni, le quali assumono un ruolo essenziale nella organizzazione di iniziative e di attività finalizzate alla popolarizzazione delle conoscenze scientifiche e tecnologiche di base tra la popolazione. Tra queste, va innanzitutto ricordata la Associazione per la Scienza e Tecnologia (sigla CAST), a carattere non governativo, che conta decine di società provinciali e che pone un'enfasi particolare sull'educazione scientifica tra i giovani.

Va poi menzionata la Accademia Cinese per le Scienze (sigla CAS), a carattere governativo, che ad oggi è la più prestigiosa accademia nazionale di ricerca nel settore delle scienze di base e dell'alta tecnologia⁸. Essa si articola in varie divisioni: matematica e fisica, chimica, scienze biologiche, scienze della terra, ecc e ha accordi con varie decine di paesi.

A livello di base operano infine gli enti ed istituti di ricerca: vi sono quelli che dipendono da organismi statali (la sola CAS ne include un centinaio), quelli che fanno parte del sistema universitario e quelli legati alle imprese stesse.

La programmazione rimane uno strumento ancora rilevante anche nel settore scientifico e tecnologico, con i relativi piani annuali e pluriennali, l'ultimo dei quali (il Decimo) si è concluso proprio nel 2005.

Nell'ultimo decennio circa, anche la politica per il settore scientifico e tecnologico ha

risentito quantomeno in parte dei nuovi orientamenti che spingono verso una relativa diminuzione della presenza dello stato, un incoraggiamento alla iniziativa da parte della autorità provinciali e locali, e il ricorso al mercato per il reperimento di nuovi fondi.

Nell'insieme, la spesa nazionale nel settore è aumentata del 30% circa nel quinquennio 1997-2002, e tra il 2003 e 2004 del 19,7%, toccando nel 2004 l'1,35% del PIL. L'obiettivo per il 2005 è di raggiungere l'1,15% del PIL, di cui circa il 50% destinato a sostenere lo sviluppo scientifico-tecnologico nelle imprese.

Fonti statistiche cinesi indicano che una componente decisiva all'interno del budget scientifico-tecnologico per quanto riguarda la provenienza delle risorse è rappresentato dal settore delle imprese con circa il 60% del totale.

Nel suo rapporto sull'attività di governo presentato nel marzo del 2005 nel corso della sessione annuale dell'ANP, il Premier Wen Jiabao ha evidenziato l'ennesima prestazione eccellente delle attività high-tech nel 2004, con un balzo in avanti del 23% rispetto all'anno precedente e con particolari prestazioni favorevoli nei settori dei computer, dei beni elettronici, delle telecomunicazioni, anche se uno dei problemi più seri da risolvere è ancora rappresentato dal livello ancora largamente basso della tecnologia industriale⁹.

3. La Cina e la cooperazione internazionale

Il settore tecnologico – e in particolare quello dell'alta tecnologia – appare sempre più come uno di quelli strategici per l'economia nazionale nonché per l'export cinese, in cui il valore dell'export tecnologico è cresciuto a ritmi vertiginosi nel corso dell'ultimo decennio. Il supporto statale allo sviluppo scientifico e tecnologico è verificabile anche dagli ingenti finanziamenti destinati alla creazione di Parchi scientifici e tecnologici, che si contano oggi in Cina in varie decine e che godono di significativi incentivi anche fiscali finalizzati ad attrarre investitori stranieri.

Sul piano specifico della cooperazione internazionale¹⁰, la Cina opera sempre più in contatto con vari organismi internazionali, a partire dall'UNESCO, con particolare riferimento al Programma UNISPAR (Partnership scientifica tra università e industria) e MAB (Uomo e biosfera). In ambito regionale, di particolare rilievo la formazione del Comitato congiunto Cina-ASEAN¹¹ per la scienza e la tecnologia, che ha ormai quasi dieci anni.

Quanto alle relazioni Cina-CEE/UE, i primi significativi passi sono stati mossi nel 1985 con l'Accordo commerciale e di cooperazione. Nel 1995 e nel 1998, con i documenti e le comunicazioni dell'UE su *Una politica di lungo termine per le relazioni Cina-Europa* e *Costruire una partnership estesa con la Cina*, e con l'approvazione nel 2003 da parte di Pechino del Documento sulla politica verso l'UE, sono state poste le basi per lo sviluppo ulteriore negli ultimi anni sul piano della cooperazione bilaterale. Nel 1999, poi, è stato firmato l'Accordo di cooperazione scientifica e tecnologica tra la Comunità europea e la Repubblica Popolare Cinese.

Tra i progressi compiuti più recentemente, vanno segnalati l'impegno congiunto

per il raggiungimento dell'obiettivo dell'uso pacifico dell'energia nucleare e per la collaborazione nell'ambito – elemento da non dimenticare, parlando proprio di *Pianeta Galileo* – del Programma Galileo che mira ad equipaggiare l'Europa con un sistema globale di navigazione radio-satellitare, estendendolo quindi alla Cina ed aprendo quindi un mercato potenzialmente enorme.

Alla luce delle indicazioni emerse sulle nuove strategie della Comunità Europea nell'ambito del prossimo (dal 2007) programma quadro delle attività comunitarie nei settori della ricerca e dello sviluppo tecnologico, pare delinearsi in prospettiva un ulteriore rafforzamento delle attività di collaborazione con la Cina anche alla luce del crescente interesse in generale della Comunità per le attività di scambio e di mobilità del personale.

NOTE

¹ Le “quattro modernizzazioni riguardano i settori, dell’agricoltura, dell’industria, della difesa nazionale e della scienza e tecnologia.

² [2], pp. 7-22

³ [8] e [2], pp. 32-38

⁴ [4]. Si tratta dell’ultimo testo costituzionale approvato nella Repubblica Popolare Cinese, anche se successivamente tale testo è stato emendato in vari punti soprattutto nelle parti inerenti le riforme in campo economiche e del sistema di proprietà.

⁵ Si tratta dell’organismo le cui funzioni sono assimilabili, pur con evidenti differenze, al nostro Parlamento.

⁶ Si tratta dell’organismo le cui funzioni sono in gran parte assimilabili al nostro Governo.

⁷ Sul testo della Legge e i successivi mutamenti introdotti, si veda [2].

⁸ L’altra è l’Accademia Cinese di Scienze Sociali (sigla CASS), che opera per l’appunto nell’ambito del settore delle scienze sociali.

⁹ Su uno dei settori innovativi nell’ambito dello sviluppo scientifico e tecnologico in Cina – quello delle biotecnologie – si veda [5]

¹⁰ Per i dati sulla cooperazione internazionale si veda [1], in particolare il capitolo IV sulla cooperazione tra UE e Cina.

¹¹ L’ASEAN è l’associazione che raccoglie gran parte dei paesi dell’Asia sud-orientale.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Baldini, G., *La partecipazione della Repubblica Popolare Cinese alla cooperazione internazionale scientifica e tecnologica: profili giuridici*, tesi di laurea specialistica (inedita), Università Ca' Foscari di Venezia, a.a. 2004-2005
- [2] Barba, P. (a cura di, con saggio introduttivo di Losano, M.G.), *La legislazione per la scienza e la tecnologia nella Repubblica Popolare Cinese*, Unicopli, Milano 2001
- [3] Cao, C. and Suttmeier, R. P., China's New Scientific Elite: Distinguished Young Scientists, the Research Environment and Hopes for Chinese Science, *The China Quarterly*, 168, December 2001, pp. 960-984
- [4] Costituzione della Repubblica Popolare Cinese (dicembre 1982), *Relazioni Internazionali*, 43-44, ottobre-novembre 1983, e *Mondo Cinese*, 1983 (numeri vari)
- [5] De Giorgi, L., L'etica delle biotecnologie nella Repubblica Popolare Cinese, *Mondo Cinese*, 120, 2004, pp. 47-57
- [6] Decisione del Comitato Centrale del Partito Comunista Cinese sulla riforma del sistema di gestione in campo scientifico e tecnologico, adottata nel marzo 1985, *Gazzetta del Consiglio per gli Affari di Stato della Repubblica Popolare Cinese* (in cinese), 9, 1985
- [7] Decisione del Comitato Centrale del Partito Comunista Cinese e del Consiglio per gli Affari di Stato sull'accelerazione del progresso scientifico e tecnologico, adottata nel maggio 1995, *Gazzetta del Consiglio per gli Affari di Stato della Repubblica Popolare Cinese* (in cinese), 13, 1995
- [8] Goossen, R.J., *Technology Transfer in the People's Republic of China: Law and Practices*, M. Nijhoff Publ, Dordrecht 1987
- [9] Legge della Repubblica Popolare Cinese per promuovere la trasformazione dei risultati in campo scientifici e tecnologico, promulgata nel maggio 1996, *Gazzetta del Comitato Permanente dell'Assemblea Nazionale Popolare* (in cinese), 4, 1996.
- [10] Legge della Repubblica Popolare Cinese sulla popolarizzazione della scienza e della tecnologia, promulgata nel giugno 2002, *Gazzetta del Comitato Permanente dell'Assemblea Nazionale Popolare* (in cinese), 4, 2002.
- [11] Quarterly Chronicle and Documentation, *The China Quarterly*, annate varie
- [12] Regolamento sulle ricompense statali in materia di scienza e tecnologia, in vigore dal maggio 1999, *Gazzetta del Consiglio per gli Affari di Stato della Repubblica Popolare Cinese* (in cinese), 19, 1999

The background features a complex, abstract design. It consists of numerous thin, light blue lines that form a dense, circular web of overlapping loops and spirals. This central web is surrounded by a series of long, thin, curved lines that radiate outwards, creating a sense of depth and movement. Scattered throughout the composition are several semi-transparent grey circles of varying sizes, some of which are positioned near the text.

**ISTRUZIONE
RICERCA
TRASFERIMENTO**

LA DIFFUSIONE DELLA MENTALITÀ SCIENTIFICA

CARLO BERNARDINI

Dipartimento di Fisica, Università di Roma, "la Sapienza"

1. Un problema senza fine

Il problema di una didattica delle scienze che arrivi a produrre una mentalità scientifica *diffusa* è vecchio: ammesso che *Homo sapiens sapiens* avesse già qualche predisposizione creata dalle sue necessità immediate, è da epoche storiche che sembra avere tutte le caratteristiche degli obiettivi irraggiungibili. È vero che ci sono occasionali ed eccezionali individui che arrivano, studiando, a livelli molto elevati di razionalità e competenza specialistica, ma si tratta generalmente di autodidatti (assecondati al più dai familiari) che hanno realizzato un itinerario formativo originale e a loro congeniale al quale la routine scolastica si sovrappone solo come «atto dovuto», passaggio inevitabile della crescita individuale (si va dal 'precoce' Fermi al 'ritardato' Einstein). Questi individui non fanno testo, è inutile occuparsene a scopo pedagogico: al più, possono eccitare qualche giovane spirito sognatore. Il problema è semmai quello della moltitudine di ragazzi che nelle scienze non trovano alcuna suggestione spronante. È a loro che si rivolge la disperata impresa di ogni insegnante di scienze responsabile.

Da quello che dico, appare forse evidente la mia propensione a suggerire una formazione degli insegnanti 'senza esclusione di colpi': bisogna provarle tutte. Mi sembra che l'occasione che mi viene qui offerta non sia da sprecare: perciò, dico subito che parlerò fuori dai denti. Lasciatemi dire alcune cose un po' estremiste:

1. il «pensiero mitologico», come lo chiama François Jacob¹, produce con facilità un *inprinting*: ha una risposta per ogni problema. La scientificità, chiaramente, non riesce a produrre *inprinting* con altrettanta facilità, anche se ci sono aneddoti che riguardano i genii. Possiamo competere? Questa osservazione spingerebbe a esplorare il terreno culturale che rende possibili questi *inprinting*, nella convinzione (ben nota a gesuiti, rabbini e imam) che il pensiero infantile sia completamente plasmabile, specie con paure e inquietudini.
2. Scrivere in modo elegante, godere della pittura o della musica colta, sono qualità apprezzate e riconosciute anche da chi, con rammarico, non le ha. Chi non pensa scientificamente, invece, non si sente 'analfabeta', meno che mai se ne vergogna. Possiamo competere? Questa osservazione si riferisce almeno al problema della 'godibilità', che nella didattica delle scienze non sembra minimamente coltivato.

3. Chi si esercita in una capacità fisica, uno sport, una abilità manuale, acquista un senso compiaciuto della propria “potenza”, spesso attraverso la competizione ma non di rado anche come percezione rassicurante del corpo. L’esercizio della mente non è altrettanto percepito come possibile qualità distintiva individuale. Possiamo competere? Questa osservazione si riferisce soprattutto al fatto che le rappresentazioni mentali scientificamente efficaci non sono sufficientemente possedute come capacità di elaborazione autonoma ma piuttosto come istruzioni per l’uso in speciali circostanze.

Per ora mi fermo a queste tre annotazioni, per bizzarre che possano apparire rispetto alla tradizionale problematicità della didattica delle scienze. Come ho già detto, l’impressione mia è che l’immane corpus pedagogico ruminato per secoli non abbia prodotto alcun risultato tangibile nella educazione scientifica di massa; anzi: i manuali scolastici disponibili sono le opere più tristi e pedanti che si possano concepire, non recuperabili con il metodo, che sciaguratamente alcuni autori adottano, di menzionare le «magnifiche sorti e progressive» delle scienze contemporanee. La verifica dell’apprendimento è affidata alla memorizzazione di definizioni o alla esecuzione di esercizi destinati a rilevare il possesso di nozioni contenute a brevissima distanza di pagine dall’enunciato. Nel contesto scolastico, le scienze appaiono come aspetti minori della formazione; soprattutto, come specialismi non obbligatori, non facenti parte di un patrimonio comune, non comunicanti con altri settori culturali.

Fermandomi qui con le critiche di fondo, vorrei fare alcune proposte disperate e certamente velleitarie. Comincio dagli insegnanti. Supponiamo che il dottor/la dottoressa X voglia dedicarsi all’insegnamento della fisica, o della matematica, o della biologia, o della chimica. Può darsi che, pur non avendo impostato la propria formazione a fini didattici, lo faccia perché ha saputo che ci sono posti disponibili nelle scuole, il che è nei suoi diritti; ciò non toglie che l’aspirazione debba essere corredata dal possesso di requisiti ‘moralì’ (perciò difficilmente definibili con precisione) come la «propensione a insegnare» e il «senso della propria competenza». Non è necessario che questi requisiti siano certificati, spesso una buona sensazione di averli è già un punto di inizio importante. Se i requisiti ci sono, oltre a indirizzarsi verso eventuali occasioni istituzionali di specializzazione e aggiornamento, l’aspirante farà bene a chiedersi:

1. che cosa so io della storia della mia disciplina?;
2. qual è l’epistemologia che accompagna la mia disciplina?;
3. quali sono le opere storiche e filosofiche più importanti per capire l’impatto culturale della mia disciplina?;
4. quali sono le opere divulgative più importanti per chiarire i concetti di base della mia disciplina?;
5. in che cosa ciò che dovrò insegnare si discosta dall’intuizione ingenua (senso comune)?

Naturalmente, questo auto-interrogatorio comporta uno sguardo intorno a sé per scoprire se la dotazione di testi e strumenti che si possiedono è adeguata. Generalmente, queste ricognizioni fruttano di più se fatte con colleghi che hanno lo stesso problema. L'aspirante insegnante, inoltre, farà bene a non polarizzarsi troppo sui metodi utili a insegnare a una sola fascia di età, riflettendo su ciò che è plausibile dall'età prescolare alla maggiore. Questo è un precetto a cui si sono spesso attenuti grandi pensatori come, per esempio, Bertrand Russell, che analizzava i meccanismi dell'apprendimento scientifico e filosofico², a partire da quello infantile dell'inferenza fisiologica per arrivare a quello adulto dell'induzione.

Peraltro, suggerisco, invece, di non perdere troppo tempo su opere strettamente pedagogiche che, spesso, rivelano una modesta conoscenza della realtà giovanile e scolastica. Sto cercando di sostenere, sulla scorta della mia esperienza personale corroborata da quella dei miei maestri e di amici e colleghi docenti, che un buon insegnante è un personaggio che ha o cerca una certa completezza culturale: spesso accade infatti che matematici, fisici, chimici e – un po' meno, forse – naturalisti e biologi, appaiano sgradevolmente monomaniaci, insistendo solo sul possesso del linguaggio specifico della loro disciplina, recisa da ogni contesto culturale. La collocazione in un contesto culturale ampio è invece indispensabile per creare curiosità e interesse.

Ripeto: le scienze contemporanee, da Galilei in poi, sono nate dal superamento del senso comune, delle intuizioni spontanee. È l'apprendimento dei risultati come prodotto finito che produce il fallimento della didattica; la gradualità dell'insegnamento è perciò strettamente finalizzata al produrre efficacemente la transizione dalle osservazioni ingenuie all'interpretazione astratta. L'opera di Galilei ha questo in sé di colossale: testimonia uno sforzo senza precedenti di rendere la ragione più potente delle percezioni, mediante la costruzione di proposizioni ben fondate, nell'esperienza o in una logica verificabile. Ma quanti insegnanti hanno letto Galilei apprezzandone la potenza dialettica?

2. Proposte apparentemente spicciole

Prendo l'esempio della fisica, che mi è più familiare. Poi, proverò a generalizzare. Una espressione comune, tra fisici, è: *ordine di grandezza*. Dire che l'ordine di grandezza delle dimensioni di un essere umano è 1 metro vuol dire soltanto che è più grande di 10 centimetri e più piccolo di 10 metri. Certo, questo esempio può lasciare perplessi: a che serve mai? Ma quando si dice che certe cose avvengono su «scala umana» vuole dire che l'ordine di grandezza dello spazio su cui si sviluppano è quello, 1 metro. L'uso del fattore 10 per passare da un ordine di grandezza al successivo è del tutto convenzionale, legato alla scelta della numerazione decimale di cui siamo debitori alle dita delle mani. La fisica si 'spande', oggi, su circa 40 ordini di grandezza, dai 10^{-15} metri del mondo subnucleare ai 10^{+25} metri dei 'confini' dell'universo: ma già qui c'è un problema; le «potenze di dieci» non sono nell'uso comune, pur essendo una invenzione banale, una notazione utile, una abbreviazione efficace. Come le avremmo chiamate, queste due

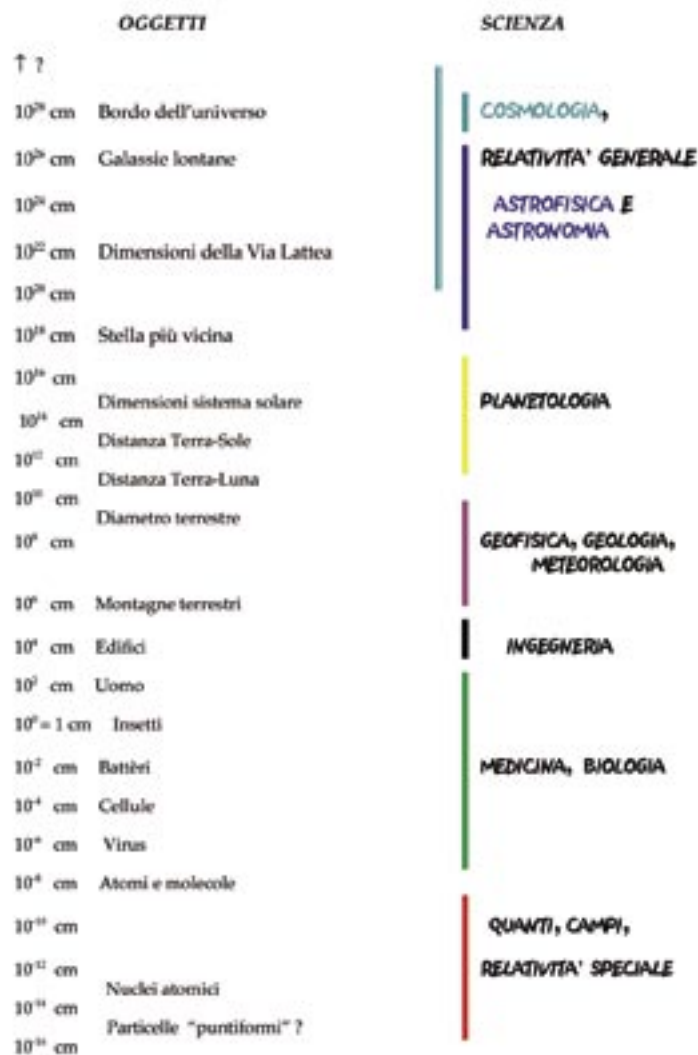
dimensioni estreme? Per ridicolo che sia, le scriverò qui perché non restino dubbi:

$10^{-15} = 0,000000000000001$, a parole: un milionesimo di miliardesimo

$10^{+25} = 10000000000000000000000000$, a parole: dieci milioni di miliardi di miliardi.

A nessuno sfuggirà la razionale economia delle potenze di dieci, comprensibili a colpo d'occhio – e siamo tornati ad Archimede!

A che età si può incominciare a usare gli ordini di grandezza e le potenze di dieci? Molto probabilmente a 10-12 anni. Una volta acquistata padronanza, non dovrebbe essere difficile disegnare una scala di lunghezze e un'altra di tempi lungo la quale annotare gli intervalli di cui si occupano le diverse 'fisiche'.



Si sale dalla fisica nucleare alla cosmologia con l'estrema varietà di mestieri che adoperano i vari settori della fisica: è una mappa che piace ai giovani. Certo, è una mappa «divulgativa», ma insegna e diverte molto di più del vetusto diagramma del moto uniformemente vario.

Con gli ordini di grandezza il «qualitativo» fa il suo ingresso in fisica. Ma come, la fisica non è una «scienza esatta»? Sì, certo, quando ne vale la pena. Se, in automobile, percorro 10 km in 7 minuti, qual è la mia velocità in km/h? 7 minuti sono 7 sessantesimi (7/60) di ora, dunque la velocità è $600/7$ km/h. Il ragazzo che è con me afferra la sua calcolatrice elettronica e mi dice trionfante: 85,714285714 km/h. Gli dico che 86 può bastare: arrotondo. Mi guarda perplesso: la 'macchinetta' ha dato nove decimali, perché sprecare un risultato avuto gratis? «Perché non corrisponde ad alcuna *verità*. Cioè, 85,714... non è *più vero* di 86; e nemmeno di 85...». Ma qui mi imbatto nel problema di che cosa è vero e che cosa è sbagliato; e siccome gli errori, nella tradizione didattica di ogni età scolare, si puniscono, meglio non rischiare: garantisce la 'macchinetta'. Ammetterete che siamo alla follia, a quelle forme della retorica giustificativa che permeano molta parte del pensiero adulto comune. Ebbene, se riuscirete a spiegare come e perché si arrotonda, anzi si deve arrotondare, farete un'opera di acculturazione che va molto al di là di queste storielle, peraltro veridiche e frequenti.

Il fatto che il linguaggio naturale della fisica sia la matematica (l'algebra e l'analisi) la rende automaticamente deterministica (quasi sinonimo di «esatta», nel discorso volgare). Pochissimi si rendono conto che, pur essendo intrisa di relazioni di causa ed effetto, la fisica che ci fa analizzare la realtà quotidiana è piena di elementi casuali. Se non altro perché le «cause» sono numerosissime, di importanza decrescente e con effetti imprevedibili. Per fare fisica, ne ignoriamo la gran parte: per esempio, i fenomeni dissipativi, gli attriti o le resistenze aerodinamiche. Personalmente, sono stufo di chi mi obietta che «Galilei aveva torto, perché un sasso e una piuma cadono con accelerazioni ben diverse»; ma poi penso che queste cose mettevano in difficoltà anche Aristotele, che per quel motivo fece un'altra fisica. Denigrare Aristotele è improponibile, visto che aveva molti altri meriti e si rischierebbe di sentirsi dire, oggi, che «dopotutto, la fisica è un dettaglio».

E allora? Pazienza, ci vuole pazienza. E la capacità di parlare con le parole giuste. Ecco, questo è al cuore delle intuizioni ingenuie: superare il senso comune significa anche lasciare Aristotele nell'antichità, come personaggio storico, ma senza ignorare che la gente anche oggi poco istruita (i nuovi 'Simplicio' galilæani) la pensa ancora come lui: la gente non sa come si fa ad «astrarre dal contesto, con buone argomentazioni, il fenomeno importante dalla miriade di concause occasionali e fuorvianti». Fare *congetture* è molto meno che fare teorie; però bisogna saperlo fare; e vale la pena di farlo: gli ordini di grandezza delle cause devono essere quelli giusti per ottenere gli effetti osservati. Si impara moltissimo, a farle: sono uno strumento didattico migliore degli esercizi. Ma c'è forse qualcuno che ci lavora con i suoi studenti?

Per valutare una congettura, bisogna conoscere un po' di calcolo delle probabilità. L'ignoranza dell'uso della probabilità è alla radice dei mali della didattica di tutte le scienze. Il determinismo fisico cui accennavo prima è spesso frutto della matematizzazione classica, modellata su traiettorie e diagrammi orari. Molti sistemi, però, compiono invisibilmente salti da uno 'stato' in cui si trovano a un altro, e questo

avviene con le leggi del caso. La didattica è forse condannata alla scala umana, dove impera il determinismo degli ingegneri costruttori di macchine? O può godersi un po' di fisica atomica o di cosmologia?

3. Scienza e società

La tradizionale didattica delle scienze è asettica. Le scienze sono insegnate come verità esterne al contesto sociale. Sicché, in quel contesto, esse si paleserebbero come regole arcane della realtà naturale, come il catalogo razionale dello spettacolo immutabile al quale assistiamo in ogni istante della nostra vita come spettatori anche se ne facciamo parte. Su questa presunta separatezza, che si vorrebbe conservare al livello pedagogico, si basano, purtroppo, le forme più diffuse di ripugnanza per il pensiero scientifico, il cosiddetto "antiscientismo viscerale". Fior di filosofi e sociologi alla moda – con vasto seguito di opinionisti – si fanno un vanto di questa ripugnanza³. Conosco, però, persino alcuni colleghi, peraltro specialisti colti, che idealizzano questa incompletezza della didattica trasformandola in un loro senso di colpa e finendo con l'attribuire al pensiero scientifico i mali della civiltà umana: tra le pratiche che aggiustano i problemi di coscienza, l'espiazione preventiva è molto diffusa.

L'obiezione che a costoro si fa più frequentemente, specie nelle contese politiche, da pare degli scienziati 'ortodossi' (che forse esagerano un po' nel modo di respingerli) è che «prima bisogna conoscere e poi trasferire al sociale»⁴, acquistando, per esempio, la capacità di dare valutazioni sensate del rapporto rischi/benefici nella produzione di certe tecnologie a elevato contenuto di scienza. Ma questa obiezione non ha molta fortuna e appare troppo rudimentale; l'antiscientismo⁵ ha buon gioco sulla pubblica opinione, fino al punto di rendere plausibile uno 'strumento' inconfutabile quanto paralizzante, il «principio di precauzione», una inattesa estrapolazione abusiva e un po' ridicola della causalità classica: «Se non si fa nulla, non accade nulla» (nel male ma – *omissis* – anche nel bene).

Comunque, questo insieme di problemi nati dallo sviluppo scientifico c'è e va affrontato già in sede scolastica. È difficilissimo dare suggerimenti, perché, in questo campo, le opinioni contano più dei fatti; perciò, diventa imperativo parlare di come si confrontano le opinioni con i fatti. L'esempio tipico di ciò che può portare a una diatriba irrisolvibile è il seguente: un certo farmaco può prevenire una malattia invalidante ma non letale che colpisce una persona ogni 100 nella popolazione, ma può essere letale per una persona su 10.000. È lecito somministrarlo? Di questi problemi se ne trovano a iosa: il principio di precauzione li risolve 'con l'accetta' escludendo l'impiego senza nemmeno sollevare il dubbio della ragionevolezza.

Ovviamente, una risposta assennata consiste nel decidere per l'uso ma, al tempo stesso, intensificare la ricerca scientifica sui motivi per cui è letale e sui rimedi per questo grave inconveniente; ma se i risultati tardano? Spesso, i dinieghi nascono dalla convinzione irrazionale che il caso sfortunato si riferisca con alta probabilità a se stessi; una convinzione che fa il paio con quella che, giocando a una lotteria, è molto probabile

essere proprio noi a vincere («contare sulla fortuna»). Ebbene, bisogna prendere il coraggio a due mani e portare nella didattica questi problemi e i dati conosciuti che permettono di analizzarli quantitativamente. I ragazzi potrebbero essere disponibili a riflettere: se un mago in televisione dà i numeri del lotto come «sicuri», perché non li gioca lui stesso? In questi casi, taluni rimproverano alla scienza di «uccidere le illusioni», dimenticando che le opportunità che essa ha offerto in pochi anni sono enormi, inclusa quella di vivere molto più a lungo: questo, appunto, è scritto nei rilevamenti statistici, che bisogna imparare a leggere.

Da qualche anno a questa parte, sono facilmente disponibili⁶ i dati mondiali su una infinità di eventi: dal mercato delle arachidi alla frequenza scolastica, dal numero di scarpe vendute in ciascun paese al numero di bambini nati nell'anno. Questi dati destano spesso una sana curiosità e conviene imparare a leggerli, a identificare le tendenze, a scoprire quali sono i punti deboli della civiltà (per esempio, le spese per gli armamenti, il tasso di delinquenza, l'indisponibilità di acqua in certe regioni del mondo, eccetera). A molti dei problemi che emergono si può dare una soluzione «scientifica», a patto di accompagnarla con una convergenza di risorse dei paesi ricchi e con regole di controllo sociale umanitarie: è qui che fatti e opinioni si possono mescolare proficuamente raggiungendo livelli elevati di razionalità. Ma bisogna saper valutare il famoso rapporto rischi/benefici: ce la faremo mai a convincere gli insegnanti di scienze a occuparsene seriamente? Ci sono alcuni «gioielli» sul mercato editoriale, che possono mettere sulla buona strada. Ne cito uno tra gli altri, scritto dal Nobel biochimico Max Perutz⁷.

Un problema serio è certamente quello della cattiva letteratura, che non vuol dire «letteratura illeggibile» ma «letteratura menzognera», difficile da distinguere nel mare della produzione editoriale priva di valutazione a priori. Dunque, chi insegna dovrebbe essere garantito, nelle sue scelte, da *referees*, valutatori accreditati, grazie ai quali acquistare anche capacità autonome di giudizio «verificabili». Terribilmente difficile. Il pensiero irrazionale è una caratteristica umana quasi inespugnabile, contrastarlo sembra quasi «privare gli individui di una libertà»: bisogna saperlo fare. In questo, un po' di storia e di epistemologia aiutano, purché si sappia scegliere. Posso solo dire quali sono i miei autori preferiti: Bertrand Russell e Eric Hobsbawm per la storia⁸, Richard von Mises per l'epistemologia⁹. Per una lista di quelli da evitare, rimando al libro di Bellone citato alla nota 2.

4. Piccoli (?) provvedimenti urgenti

Il mestiere di insegnante è uno dei più belli e soddisfacenti del mondo: una moltitudine di giovani che si ricordano con gratitudine del loro «maestro» è un «patrimonio sociale» inestimabile. Poche altre attività hanno un effetto di amplificazione così vasto: naturalmente, detto così, mostra anche l'altra faccia del problema, e cioè l'amplificazione del possibile effetto devastante di un cattivo maestro. Tutto ciò è così ovvio che non ha bisogno di commenti. Ma potrebbe ben essere che il pessimo impatto delle scienze fosse dovuto alla scarsa comunicativa dei docenti, combinata con la cattiva qualità del

materiale di supporto (manuali, laboratori, audiovisivi, ecc.).

La capacità di comunicare è, in parte, fascino personale, per un'altra parte, però, è qualcosa di simile al cosiddetto *matching*, un concetto che si usa per i circuiti elettrici per indicare la facilità con cui i segnali si trasmettono attraverso le «impedenze» di settori diversi del circuito. Il *matching* (in italiano potremmo renderlo con «adattamento») docente-allievi comprende, oltre l'attenzione generata dal fascino, la perspicuità dei messaggi trasmessi, la loro adeguatezza alla comprensione profonda. Per fare un esempio, il fascino può aiutare a trasmettere una metafora efficace ma non sufficiente a creare competenza. Forse, in questo, gli insegnamenti scientifici si differenziano da quelli umanistici, per i quali la metafora può essere, invece, sufficiente a formare rappresentazioni mentali efficaci e produttive.

Tenendo presenti questi problemi 'di sempre', penso che alcune pratiche scolastiche innovative potrebbero alleviarne gli effetti dannosi. Se le attuali figure di capi d'istituto, i presidi o dirigenti scolastici (secondo la mutevole nomenclatura), fossero sdoppiate in un direttore amministrativo e un 'organizzatore culturale', eventualmente elettivo e a tempo determinato, forse gli istituti potrebbero fornire agli insegnanti, sotto la guida di un responsabile di loro fiducia, occasioni di mettere in gioco la propria capacità didattica con l'antico ed eccellente strumento della conferenza periodica pubblica su argomenti di ricerca nella propria disciplina. Questo non riguarda specificamente le scienze ma è utile a far sì che ogni docente sia «valutato» anche dai propri colleghi. Una siffatta attività seminariale dovrebbe dare diritto all'eventuale attribuzione di periodici incentivi economici deliberati con voto a scrutinio segreto da un consiglio dell'istituto. Altre pratiche di «socializzazione didattica» presentano vantaggi non meno importanti: l'anno sabbatico a scopo di studio, per esempio, presso istituti di istruzione superiore (università e centri di ricerca); lo *stage* all'estero sulla base di accordi nella comunità europea o con altri paesi; la redazione e distribuzione a scuole affini di bollettini di valutazione del materiale didattico in uso.

Come è evidente, tutte queste innovazioni sono possibili solo in una rete di istituti pubblici, collegati da interessi pubblici e finanziati pubblicamente in modo adeguato. È da molti anni che sostengo queste possibilità senza ottenere alcun risultato: è naturale, sono gli stessi insegnanti che dovrebbero chiederne la realizzazione annoverandole tra i loro diritti: queste richieste, tra l'altro, avrebbero un impatto sulla pubblica opinione assai più positivo di quanto non lo abbiano le pur giustificatissime proteste sindacali sull'inadeguatezza degli stipendi. Solo con una tale «socializzazione didattica» l'insegnamento delle scienze potrebbe assolvere al suo compito di produrre effetti collettivi nella popolazione uscendo dalla trappola delle nozioni senz'anima in cui è caduto da molti decenni.

5. Motivi ideali, per concludere

Ci sono molti modi diversi per passare la propria vita, utilizzando le proprie forze e capacità per stabilirsi su buoni livelli di benessere. Le difficoltà incominciano quando

questi livelli producono conflitti, grandi o piccoli che siano. Sappiamo bene che tutta la storia dell'umanità è dominata da problemi di 'possesso' in cui la cosiddetta e banalissima «legge del più forte» spesso si afferma come elemento regolatore.

Dimostrare razionalmente la convenienza dell'altruismo per il benessere collettivo non è sinora riuscito con la dovuta efficacia, sicché questo pregevolissimo obiettivo è stato ottenuto talvolta con altri mezzi, spesso impropri, per esempio la religione, solo come autodifesa di una moltitudine di individui deboli e, spesso, sprovveduti, che si associano per fronteggiare i violenti. L'equilibrio è precario e generalmente non duraturo. Tra l'altro, anche i conflitti religiosi, non rari, si presentano spesso come guerre tra poveri facendo sì che si perdano per questo i vantaggi che si voleva ottenere con l'impegno spirituale. Gli interessi materiali, in altri termini, non muoiono mai e, anzi, finiscono con il prevalere. È possibile affermare in modo convincente la convenienza del comportamento altruista per la collettività umana? Forse non è possibile; ma invitare tutti noi e le generazioni future a tentare di dimostrarlo può essere di per sé un obiettivo estremamente pregevole. Questo è uno di quei casi in cui essere convinti che valga la pena di dimostrarlo è già quasi una dimostrazione: se non altro, un modo di sperimentarlo è proprio quello di una sorta di moratoria mondiale di ogni conflitto; ovementi funzionasse si tratterebbe soltanto di mantenere la tendenza consolidandola.

È evidente che per proporsi questi scenari è indispensabile fare ricorso a tutta la razionalità di cui siamo capaci. Che appaia un obiettivo utopico è fuori dubbio, ma non più di quello di raggiungere la stella più vicina o trovare il modo di produrre energia dall'acqua di mare. Possiamo limitare le ambizioni della scienza moderna a quelle che comportano la costruzione di macchine? Direi di no. Ci sono però molte scienze, lontane dalle cosiddette scienze «dure», che vanno in quella direzione; sono spaventosamente difficili e non hanno ancora avuto riconoscimenti scolastici. E però bisognerebbe spiegare sin dall'infanzia che sono importanti¹⁰.

Ma questi orizzonti implicano uno sviluppo culturale che sposta il baricentro dell'impegno dalla conoscenza della realtà naturale a quella della realtà umana. Se cadiamo nella trappola di discettare su che cosa è più importante, finiamo nuovamente in un ginepraio di opinioni da cui è molto difficile uscire. Dunque, una motivazione per così dire «teorica» per convincersi della capacità risolutiva di un comportamento altruista nel ginepraio dei conflitti attuali ha di per sé un valore inestimabile, purché si tratti veramente di una «dimostrazione», di una proposizione logica ben fondata.

Se posso esprimere un punto di vista ingenuo ma, forse, di una certa validità pratica, mi sembra che si possa fare il seguente paragone: il linguaggio è una abilità acquisita senza la quale la comunicazione non sarebbe possibile. La scienza linguistica si occupa degli aspetti «tecnici» del linguaggio e solo marginalmente dei contenuti per i quali lo si usa. Tuttavia, tutti i rapporti sociali sono possibili, nel bene e nel male, solo grazie allo sviluppo del linguaggio e alla forza argomentativa che esso può dare a qualunque tesi. Potrei dire che l'altruismo e la solidarietà sono il fondamento di una società senza conflitti; potrebbero perciò essere concepiti come uno strumento tecnico da impiegare

per azzerare la possibilità di conflitti. Insomma, come fondamento razionale della «sopravvivenza». Lo spirito giusto per parlare di queste cose potrebbe essere quello che aleggia in alcuni classici di grandi scienziati, come il Max Perutz citato alla nota 6 o il Freeman Dyson del celebre *Turbare l'universo*¹¹: non che altruismo e solidarietà siano esplicitamente illustrati in essi come chiavi risolutive della condizione umana, ma in quanto fortemente ispirati a una generalizzazione della mentalità scientifica a problemi che esulano dalle scienze classiche.

Insomma, c'è un enorme lavoro da fare. Bisogna incominciare a farlo, è un invito ai giovani. Per questo ho parlato di «problema senza fine». Forse, ci vorranno molti Galilei, molti Darwin e molti Einstein per superare decisamente il punto in cui siamo: ma non dubito che, alla fine, scienza e umanesimo, le due culture, saranno categorie preistoriche, alla radice di una sola cultura perfettamente razionale che farà piazza pulita delle innumerevoli sciocchezze di cui viviamo ancora oggi.

NOTE

¹ Cfr. [8].

² Cfr. [11].

³ Cfr. [2].

⁴ Potrei suggerire, con le parole di un insigne studioso hegeliano, Francesco Valentini, che anche Hegel sosteneva, con una famosa battuta, che «non si può imparare a nuotare prima di arrischiarsi in acqua», in [4].

⁵ Mi sembrano mirabili le considerazioni contenute nell'ultimo capitolo del libro di Gerald Holton, [7].

⁶ Cfr. per esempio [1].

⁷ Cfr. [9].

⁸ Cfr. [10] e [6].

⁹ Cfr. [12].

¹⁰ La teoria dei giochi meriterebbe più attenzione. Personalmente, sono propenso a seguire e incoraggiare lo studio di risultati come quelli di Cristina Bicchieri; per esempio, il recente [3].

¹¹ Cfr. [5].

BIBLIOGRAFIA

- [1] ADN KRONOS, *Il libro dei fatti*, Adnkronos Libri, Roma (annuale).
- [2] Bellone E., *La scienza negata*, Codice, Torino 2005.
- [3] Bicchieri C., *The Grammar of Society: the Nature and Dynamics of Social Norms*, Cambridge University Press, Cambridge 2006.
- [4] Ceci L. e Demofonti L. (a cura di), *Chiesa, laicità e vita civile. Studi in onore di Guido Verucci*, Carocci, Roma 2005.
- [5] Dyson F., *Turbare l'universo*, Boringhieri, Torino 1981.
- [6] Hobsbawm E., *Il secolo breve*, BUR Rizzoli, Milano 2004.
- [7] Holton G., *Le responsabilità della scienza*, Laterza, Bari 1993.
- [8] Jacob F., *Il gioco dei possibili*, Mondadori, Milano 1982.
- [9] Perutz M., *È necessaria la scienza?*, Garzanti, Milano 1989.
- [10] Russell B., *Storia delle idee del secolo XIX*, Einaudi, Torino 1950.
- [11] Russell B., *Sintesi filosofica*, La Nuova Italia, Firenze 1973.
- [12] von Mises R., *Manuale di critica scientifica e filosofica*, Longanesi, Milano 1950.

SCIENZA E SCUOLA: OGGI E DOMANI

FRANCO CAMBI

*Dipartimento di Scienze dell'Educazione e dei Processi Culturali e Formativi,
Università di Firenze*

1. La scienza: un'avventura cruciale della civiltà

Certamente, guardando dall'oggi l'evoluzione complessa e complessiva delle civiltà, nel loro lungo e articolato divenire storico, possiamo dire che il *partus masculus* della cultura che esse hanno elaborato è il sapere scientifico. Quel sapere che si vuole come conoscenza 'vera' del reale, saldamente ancorato a un metodo d'indagine, ma aperto alla sfida che gli viene dall'esperienza e rivolto a costruire un'immagine razionale del mondo sempre più rigorosa e capillare, relativa ad ogni suo aspetto. Già nel mondo greco tale nozione è chiaramente definita: e si pensi a Aristotele, a Euclide, a Archimede, che – inoltre – la definiscono in modi tra loro diversi, ora più empirico-sperimentali ora più sistematico-rigorosi; ma che – comunque – del reale ci rimandano un'interpretazione secondo principi immanenti e definiti secondo uno stretto innesto tra logica e esperienza.

È stato poi il Mondo Moderno a far decollare la scienza come forma aurea del sapere, a renderla produttiva nella società, a imporla come asse del pensiero. Tra Galilei e Bacon (o viceversa) tanto l'oggetto e il metodo quanto il potere innovativo della scienza sono ben declinati. Poi l'avventura si fa strepitosa e cresce in modo esponenziale, in stretto legame con la tecnica (che è sì figlia della scienza, ma ha anche una sua autonomia, e cognitiva e sociale), su su fino ad oggi. Nel nostro tempo la scienza/tecnica si è fatta il volano stesso e della nostra vita quotidiana e della stessa organizzazione sociale, oltre che dell'evoluzione dei saperi, anche con qualche rischio di imperialismo e di dogmatismo (come è accaduto già nel positivismo ottocentesco, ma da cui lo stesso neopositivismo logico non è stato del tutto immune). Tale avventura ha prodotto 1) affinamento e sofisticazione del metodo, riletto via via in forma più problematica e complicata; 2) centralità assegnata alle teorie che hanno varia origine e non sempre endoscientifica; 3) crescita nel *parterre* stesso delle scienze, poiché accanto alle scienze della natura (che dalla fisica sono passate alla chimica, alla biologia, alla medicina, costruendo un fascio di saperi sperimentali e rigorosi in continua crescita e crescita 'rivoluzionaria' e mai solo lineare e evolutiva) si sono affermate le scienze dell'uomo (o umane o sociali) che hanno accresciuto l'orizzonte dei saperi scientifici e ne hanno rinnovata l'immagine epistemica, poiché scienze interpretative, comprendenti e genealogiche, che seguono sì il metodo galileiano (pur adattato) e la sperimentazione, ma lavorano con un diverso concetto di 'legge', come anche di 'osservazione' etc. Si pensi soltanto all'antropologia

culturale e a come tale sapere re-interpreti tutta l'avventura delle scienze, ricollocandole dentro una 'forma di vita'. E lo faccia in forma, a suo modo, rigorosa.

Oggi, allora, della scienza abbiamo una visione più *critica*, più *sottile*, più *articolata*, oltre che – per il legame stretto che pur corre tra scienza e tecnica – più *problematica*. E più problematica in molto sensi. Per quanto riguarda la tecnica entra in gioco la responsabilità dello scienziato e, quindi, il suo agire e presso il politico e dentro l'etica pubblica, il che implica l'uscire dallo studio e dal laboratorio e stare 'nella piazza', nell'*agorà*. Per quanto riguarda il sapere, la scienza sa di essere sì una forma fondamentale di esso, ma che *deve* convivere sia con l'arte sia con la filosofia (e le sue *Weltanschauungen*) e con esse dialetticamente integrarsi. Per quanto riguarda la società la scienza deve diffondersi, e come insieme di contenuti e come *forma mentis*, deve farsi (nella 'società delle conoscenze', nel tempo del 'pensiero produttivo', nell'età della tecnica) sapere condiviso. Per quanto riguarda la formazione, delle giovani generazioni soprattutto, deve esser posta e più al centro e al centro in modo migliore di quell'«asse culturale» della scuola contemporanea (post-umanistica e post-borghese) che già Gramsci ci ricordava collocato nell'intreccio, assai complicato e tutto da definire, di lingua/scienza/storia. Certamente tale formazione dovrà oltrepassare la tradizione del passato (ancora viva, anzi 'vivissima') e inoltrarsi in forme nuove di insegnamento: relativo a contenuti e a metodi (didattici).

2. Insegnare-scienza nella scuola: tra 'vecchio' e 'nuovo'

È stato Kuhn a consegnarci un paradigma per comprendere criticamente il modo tradizionale di insegnare la scienza, di organizzarla e di trasmetterla, quando ha parlato di «scienza normale», sottolineandone lo statuto lineare, sistematico, evolutivo e, anche, l'implicita valenza dogmatica. È la scienza così come viene esposta per formare altri scienziati ed è la scienza letta alla luce delle certezze di un determinato tempo storico e che intorno ad esse tutta si organizza sia nei suoi vari «rami» sia nella sua immagine d'insieme. Certamente tale «scienza normale» è necessaria, è un po' *l'a quo* (e non *l'ad quem*) della formazione scientifica ma è anche connessa a un'immagine riduttiva (e, pertanto, falsa) del fare-scienza e dell'universo-scienze. Oggi più di ieri tale immagine risulta falsificata, e non solo e non tanto dalle riflessioni epistemologiche, quanto dall'*operari* stesso degli scienziati, che lavorano con un'idea di ricerca scientifica come lavoro-per-ipotesi, portato avanti attraverso conferme talvolta anche esse ipotetiche, costruito su «palafitte» e sempre coinvolto nella sfida dei diversi «programmi di ricerca», oltre che messo *sub judice* dall'avvento delle «rivoluzioni».

Da qui il problema attuale dell'insegnamento: come, quanto e se passare da un'immagine di «scienza normale» a una, invece, di scienza critica, problematica, dialettica, aperta a una sfida interna che, dal punto di vista della ricerca, ne indica lo statuto reale e anche la buona salute? Scienza normale o scienza-ricerca? Certamente la tradizione dell'insegnare scienza a scuola si colloca, tutta o quasi, sul fronte della scienza normale: la scienza dei manuali – strumenti fondamentali del sapere scolastico

– è convergente, lineare, sistematica; offre i fondamentali di un sapere; coagula le sue ‘certezze’. E così svolge un’opera cruciale nella formazione di mentalità e di competenze. Però questa non è tutta la scienza. Anzi qui si aprono due ordini di problemi: 1) quello dell’aggiornamento della stessa scienza normale; 2) quello di fare entrare, sia pure per assaggi, nel ‘cantiere aperto’ della ricerca, proponendo degli *excursus* nelle sue frontiere più avanzate.

Sono, è vero, due ordini diversi di problemi, ma che, forse, possono convergere nel rinnovare l’immagine della scienza che la scuola viene a veicolare.

Per un verso vanno aggiornati i manuali, coordinandoli, disciplina per disciplina, alle scoperte ormai acclamate, alle ultime «rivoluzioni» già digerite, riaffiatandoli alla ricerca, e il più possibile. Faccio un esempio. Un po’ dovunque (nel mondo) si continua a insegnare storia secondo un paradigma legato al primato del politico, del nazionale, dell’etnocentrismo che a livello di ricerca risulta ormai de-legittimato dall’avvento della storia sociale, del gioco tra i confini e gli scambi tra etnie, culture, nazioni, dell’ottica di mondialità in cui siamo immersi. Dopo le *Annales*, dopo la *Social History*, dopo l’avvento di una «storia del mondo» (e si pensi a Braudel de *Il mondo attuale*), la ricerca cammina per strade diverse rispetto ai manuali in uso un po’ in tutto il mondo (come ci ha testimoniato recentemente Procacci).

Per un altro verso, però, i manuali vanno integrati con contatti più diretti e decisivi con la ricerca, col fare-ricerca, con lo stare-nella-ricerca. Come? Attraverso, forse, una prassi modulare, che offra occasioni (sia pur circoscritte) di entrare nel cantiere della scienza e di coglierne la *complessità* e la *problematicità* che oggi, sempre più, la contrassegnano.

3. Strategie per formare una ‘mentalità scientifica’ avanzata

Si tratta, allora, di far-entrare in questi cantieri avanzati del fare-scienza, individuando alcuni nuclei più aggiornati, disciplinari o interdisciplinari, attorno ai quali far lavorare gli studenti per un tempo definito e sottolineando in questo percorso sia gli aspetti metodologici sia quelli di contenuto, in modo che passi nella mentalità scientifica in formazione dei giovani un’immagine *non solo* normativa della scienza, bensì anche e proprio il suo stare nell’avventura, nella scoperta, nella tensione innovativa del fare-ricerca.

Tutto questo deve avvenire nell’ambito curricolare, attraverso l’attivazione di moduli, che sono segmenti organici di uno o più saperi, legati a *un* tema, *un* aspetto, *un* problema che viene così approfondito più a contatto con la ricerca e che, proprio per disporsi su tale frontiera, deve vertere su aspetti avanzati, attuali e ancora aperti, o quasi, del fare-scienza. Certamente non si tratta di dare ai giovani un’immagine schizoide o strabica della scienza, che ora è normale e ora è rivoluzionaria, bensì di far capire come il fare-scienza oscilli, produttivamente, tra questi due fronti che devono integrarsi pur restando tra loro differenti. E ciò deve avvenire perché ciò è necessario per stare davvero dentro il complesso cantiere della scienza e possedere di essa un’immagine non-

dogmatica, non-riduttiva, ma neppure aleatoria, senza certezze, priva di 'fondamentali'. La scienza è invece un'avventura complicata che raccorda e scandisce «scienza normale» e «rivoluzionaria», come ci ha ricordato Kuhn, anche se poi Kuhn stesso ha dato di tale dualismo una lettura tutta diacronica e assai poco sincronica. E invece è questa che qui, a noi, interessa.

Questo per quanto concerne il *curriculum*, ma alla scuola compete anche un'azione extracurricolare (e si pensi al POF) che può essere intesa anche come una ripresa, pur sotto altro aspetto, degli stessi saperi scolastici. Voglio fare alcuni esempi. Lo stesso *Pianeta Galileo* organizzato per giovani e adulti dalla regione Toscana già nel 2004 e poi nel 2005 non è stato un'occasione di alta divulgazione scientifica a contatto stretto con la scienza-come-ricerca? I dibattiti che si sono aperti con le scuole e per le scuole intorno all'evoluzionismo e alla sua tenuta scientifica, in quanto ipotesi, ma ipotesi provata (come quello promosso dall'Istituto Stensen a Firenze e costituito di conferenze e di laboratori, per le scuole in particolare questi ultimi), non si collocano su questa frontiera? Che ruolo svolgono in diversi luoghi le Città della Scienza con le loro molteplici attività? O i festival, come quello di Genova, con i complessi e sofisticati temi che affrontano: si pensi al *post-human* messo sotto analisi nel 2004 proprio a Genova?

Tra scuola e extrascuola la scienza deve diffondersi secondo un modello avanzato, tanto come «scienza normale» quanto come «rivoluzione scientifica» (o ricerca-in-atto), che opera sempre come *sfida*, come *ricerca del nuovo*, come possibile *cambio di paradigmi* – almeno in potenza; e modello avanzato proprio in quanto connesso a un'immagine del suo 'agire' complessa, problematica, aperta.

4. Iniziative regionali in Toscana

La Regione Toscana ha, da tempo, cercato di mettere in cantiere tale *iter* di ricerca nella e per la scuola, con due iniziative integrate tra loro e coordinate dagli stessi principi, pur in parte separate per gestione e per tipo di scuole coinvolte. Da un lato sta il progetto di educazione scientifica per la scuola dell'obbligo o di base (elementare + media inferiore, ma già a partire dalla scuola dell'infanzia) coordinato da Gigliola Sbordoni e che ha come guida il fisico Carlo Bernardini e un gruppo di altri esperti (tra cui il sottoscritto) e che si rivolge a individuare le buone pratiche realizzate dalle scuole, a vagliarle, a organizzarle secondo un modello di documentazione, a metterle a disposizione delle scuole tramite la rete TRIO della Regione e poi a riattivarle attraverso seminari nelle scuole interessate a seguirle e rielaborarle ad un tempo; seminari con esperti che tengano viva la qualità innovativa di quelle pratiche. La documentazione presente sul sito è ormai ricca e sempre qualificata e le scuole stanno ben rispondendo alle sollecitazioni della Regione. Dall'altro lato sta il progetto di educazione scientifica promosso e guidato dall'IRRE-Toscana e coordinato dal sottoscritto, con i docenti universitari Becciolini, Nesti e Villani, con gli esperti Barsantini, Fiorentini, Sbordoni, che già ha svolto una sua sperimentazione per moduli e che la sta nuovamente articolando e diffondendo,

attraverso una prassi di documentazione, ma anche di coinvolgimento delle scuole secondarie superiori a cui il progetto si rivolge in modo specifico. Il 24 febbraio 2006 è stata realizzata una giornata di studio aperta alle scuole, proprio per promuovere una precisa sensibilizzazione al tema e un più ricco coinvolgimento degli insegnanti.

Tutte queste due iniziative sono nate proprio in vista di quel bisogno/sfida contemporanea che viene alla scuola dai saperi scientifici e dalla 'società della conoscenza', dagli stessi obiettivi formativi imposti dall'Unione Europea per la scuola, ai quali si è cercato di rispondere in modo *costruttivo e integrato*, forse migliorabile, ma già fin qui assai positivamente orientato e nel suo *modus operandi* e nei suoi risultati previsti e raggiunti, nelle classi e nelle scuole.

BIBLIOGRAFIA

- Bellone E., *La scienza negata. Il caso italiano*, Torino, Codice, 2005.
- Brown H. I., *La nuova filosofia della scienza*, Roma-Bari, Laterza, 1984.
- Butterfield H. I., *Le origini della scienza moderna*, Bologna, Il Mulino, 1971.
- Curi U. (a cura di), *La razionalità scientifica*, Abano Terme, Francisci, 1978.
- Dumas M. (a cura di), *Storia della scienza*, Roma-Bari, Laterza, 1969.
- Eiseley L., *Il secolo di Darwin*, Milano, Feltrinelli, 1975.
- Feyerabend P., *Contro il metodo*, Milano, Feltrinelli, 1979.
- Feyerabend P., *La scienza in una società libera*, Milano, Feltrinelli, 1981.
- Galimberti U., *Psiche e tecne*, Milano, Feltrinelli, 1999.
- Geymonat L., *Galileo Galilei*, Torino, Einaudi, 1957
- Gusdorf G., *Le scienze umane nel secolo dei lumi*, Firenze, La Nuova Italia, 1981.
- Kolakowski L., *La filosofia del positivismo*, Roma-Bari, Laterza, 1974.
- Kuhn Th., *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, Torino, Einaudi, 1967.
- Kuhn Th., *La rivoluzione copernicana*, Torino, Einaudi, 1972.
- Lakatos I., Musgrave A. (a cura di), *Critica e crescita delle conoscenze*, Milano, Feltrinelli, 1976.
- Mendelssohn K., *La scienza e il dominio dell'occidente*, Roma, Editori Riuniti, 1981.
- Minazzi F., *Galilei "filosofo geometra"*, Milano, Rusconi, 1994.
- Pera M., *Apologia del metodo*, Roma-Bari, Laterza, 1982.
- Popper K.R., *La logica della scoperta scientifica*, Torino, Einaudi, 1970.
- Popper K.R., *La ricerca non ha fine*, Roma, Armando, 1976.
- Preti G., *Storia del pensiero scientifico*, Milano, Mondadori, 1957.
- Rossi P., *Immagini della scienza*, Roma, Editori Riuniti, 1977.
- Rossi P. (a cura di), *Storia della scienza*, Torino, UTET, 1988

E POI OGNI MATTINA SI ENTRA IN CLASSE...
INCURIOSIRE, MOTIVARE, COSTRUIRE COMPETENZE
SIGNIFICATIVE INSEGNANDO SCIENZE

ROSSANA NENCINI

Istituto Comprensivo, Barberino di Mugello, Firenze

1. Se osserveremo attentamente i bambini

Mi emoziona, ancora, dopo tanti anni di insegnamento, scoprire quanto i bambini sappiano interessarsi, mi emoziona incontrare la loro profonda curiosità, il loro desiderio di sapere, la loro voglia di fare. «Se osserveremo attentamente i bambini li tratteremo in modo diverso. E capiremo da dove proviene la nostra capacità di osservare con attenzione: sarà questa la considerazione più profonda che ne ricaveremo. Quel che di più interessante hanno i bambini è che sono così enormemente interessati; quel che hanno di più meraviglioso è l'infinità capacità di meravigliarsi», [4] p. 255 – di meravigliarsi nell'osservare semplici esperienze di laboratorio come ad esempio le piccole bollicine che si formano durante il riscaldamento dell'acqua, il loro aumentare, progressivamente, per diventare grandi bolle che scoppiano e fanno rumore, di stupirsi nel vedere che l'acqua piano piano diminuisce, ... di porsi dei perché: *Dove sarà andata a finire maestra?*

Mi emoziona, ma al contempo mi fa sentire tutta la responsabilità che la scuola e i suoi insegnanti hanno in merito all'azione didattica e al successo scolastico dei ragazzi: responsabilità che deriva dall'attribuire valore a certe scelte didattiche piuttosto che ad altre, riconoscendo al fare scuola quotidiano un ruolo di primo piano nel costruire motivazione, interesse, curiosità, desiderio di imparare, di sapere. L'interesse e la meraviglia che i bambini sanno dimostrare in classe non nascono per caso, sono il frutto di un'attività di ricerca didattica complessa, profonda, capillare che non lascia niente al caso, che non improvvisa, ma coniuga, continuamente, nelle piste di lavoro che propone agli alunni, una profonda conoscenza dell'epistemologia disciplinare – con altrettanto profonde conoscenze nella psicologia, nella pedagogia, nella sociologia dell'educazione –, di una ricerca didattica consapevole che una scuola di qualità non può essere enciclopedica, ma deve saper scegliere pochi contenuti fondanti e trattarli a fondo sapendo valutare a quale età possono essere sviluppati e con quali modalità devono essere proposti per essere davvero compresi.

È necessaria una profonda trasformazione del 'contesto scuola' per poter avviare una concreta innovazione nelle pratiche dell'insegnamento. Si deve saper incidere

contemporaneamente sulla professionalità dei docenti e sulla disciplina, impegnandoci in un progetto culturale che dia valore al ruolo degli insegnanti e sappia impegnarli, all'interno della propria scuola e di reti di scuole, collegialmente, in gruppi di studio e ricerca sulla didattica disciplinare nel tentativo di costruire curricoli disciplinari verticali davvero innovativi: curricoli disciplinari verticali che sappiano individuare che cosa si insegna nelle varie fasce d'età legandolo a *come* si insegna, che sappiano ripensare profondamente gli approcci disciplinari ed educativi ricorrenti, che sappiano abbandonare l'illusione di un insegnamento enciclopedico per scegliere e concentrarsi su saperi essenziali, cioè, fondamentali nella struttura della disciplina e adeguati alle potenzialità cognitive degli alunni nelle varie fasce d'età.

Trattasi di curricoli verticali in cui veramente «ogni esperienza dovrebbe in qualche modo preparare l'individuo alle esperienze posteriori più profonde e più ampie. È questo il vero significato di [crescenza], continuità, ricostruzione dell'esperienza», [3] p. 32 – curricoli verticali che non sottovalutano la variabile *tempo* e impongono lo svolgersi dell'azione didattica in un *tempo disteso*. Solo il tempo disteso permette quel livello di individualizzazione che si orienta a garantire a tutti un raggiungimento significativo degli obiettivi prefissati. Solo il tempo disteso permette di svolgere le diverse attività in una dimensione laboratoriale che è l'unica forma didattica veramente efficace nella scuola primaria, su di essa si basa la profondità e la persistenza degli apprendimenti. È un compito complesso di alta e specifica professionalità. Questi i presupposti indispensabili per poter offrire ai ragazzi di ogni ordine di scuola la possibilità di appassionarsi, essi stessi, al sapere.

2. Ma entriamo davvero in classe...

e cerchiamo di analizzare quali momenti caratterizzano proposte di insegnamento delle scienze di ormai sperimentato valore didattico in grado di affascinare i bambini, di contribuire a formare in ognuno di loro una mente critica, l'autonomia di giudizio, il gusto della ricerca e di creare un contesto classe dove l'insegnante può ridurre al minimo la necessità di esercitare la propria autorità, perché è la proposta didattica la migliore garanzia di controllo dell'attenzione e della concentrazione degli alunni. Nella scuola primaria lo sviluppo cognitivo degli alunni è tale che qualsiasi proposta deve necessariamente prevedere l'osservazione diretta di semplici esperienze su cui i ragazzi siano in grado di riflettere elaborando previsioni e ragionamenti.

Osservare semplici esperienze cosa significa? Indubbiamente aver scelto i contenuti da trattare in quella determinata classe e quindi in quella fascia di età cognitiva e affettiva, e ovviamente aver scelto gli esperimenti attraverso cui mostrare ai bambini il fenomeno oggetto di studio, ma significa anche avere sviluppato, come insegnante, la consapevolezza della valenza dell'osservazione in quanto momento didattico fondamentale per costruire conoscenze significative. Non solo è necessario poter usufruire di ambienti attrezzati e di strumenti necessari a svolgere concretamente le varie esperienze, ma occorre garantire l'organizzazione dello spazio e il tempo necessario

ad osservare con l'obiettivo di consentire ai ragazzi di acquisire, nel tempo, la capacità di interrogare l'esperienza, cioè di osservare ponendosi dei perché e cercando delle spiegazioni. E allora anche un semplice esperimento, come l'ebollizione di una piccola quantità di acqua distillata, diventa uno straordinario catalizzatore di attenzione.

I bambini seduti in cerchio attorno al tavolo su cui si svolge l'esperienza pongono attenzione a ogni dettaglio, sono pronti a cogliere ogni minimo cambiamento. Mentre osservano attentamente si scambiano opinioni e le riferiscono all'insegnante «Guarda, maestra, si sono formate delle minuscole bollicine sul fondo del becker! ... Stanno cominciando a salire ... Ora stanno diventando più grandi ... Salgono ... Esce del fumo». Il loro interesse verso l'osservazione dell'esperienza non si esaurisce velocemente e spesso ne chiedono la ripetizione, per osservare meglio quel *fumo* che qualcuno è riuscito a vedere a malapena, per verificare quanto diventano grandi quelle piccole bolle che poi scoppiano e riempiono di uno strano rumore l'aula, dove, tutti, si sono completamente zittiti per ascoltare.

Il riferimento all'osservazione di fenomeni concreti nella scuola primaria è essenziale, così come è essenziale operare scelte rigorose in merito ai fenomeni da proporre agli alunni individuando quei fenomeni che sono meno carichi di teoria e quindi sostanzialmente connessi ad attività di osservazione e sperimentazione da cui i ragazzi possano estrapolare significative definizioni operative. Ritorna, quindi, la necessità di effettuare una profonda analisi epistemologica della disciplina per individuare all'interno di essa i livelli di complessità dei diversi fenomeni. Ma, per quanto interessante e coinvolgente l'attività di osservazione di esperienze, non può essere fine a se stessa se l'obiettivo dell'azione didattica è quello della costruzione di conoscenze consapevoli.

Se ci limitassimo all'osservazione non consentiremmo ai bambini di approfondire, ampliare, e, talvolta confutare le conoscenze legate al senso comune. Soprattutto, se ci limitassimo a riproporre semplici esperienze legate al vissuto quotidiano, come nel caso dell'ebollizione dell'acqua, l'attività didattica sarebbe sostanzialmente inutile. Ciò che costruisce significato è la riflessione individuale e collettiva sull'esperienza vissuta e osservata insieme. Occorre che ogni bambino, nella sua individualità, abbia la possibilità di riflettere su quanto osservato e questo non può avvenire, da subito, in una dimensione di discussione collettiva che, troppo spesso, dà spazio solo ai ragazzi più intraprendenti, più sicuri di sé, e lascia nell'ombra tutti gli altri. È necessario che ogni alunno si sforzi per attivare il proprio sistema di rappresentazione simbolico e dia forma linguistica a quanto osservato, riflettendo in maniera sistematica e acquisendo consapevolezza.

Acquisire consapevolezza significa tradurre 'in parole' l'esperienza vissuta, raccontarla, dandole consequenzialità logico-temporale ed evidenziarne i particolari significativi. Dentro a ogni esperienza è nascosta una 'storia' con un inizio, uno svolgimento e una conclusione, una storia che ogni bambino deve narrare con il proprio linguaggio naturale, personale, senza schemi imposti dall'insegnante, perché possano essere narrate

anche le emozioni, positive e negative, perché ci si possa appassionare a quanto si scrive, perché si scriva volentieri.

«Oggi siamo andati in laboratorio di scienze, la maestra, appena entrati, ha preso la piastra elettrica e un becker, con dentro acqua demineralizzata. Una volta accesa la piastra e posizionato il becker, abbiamo dovuto aspettare, ma dopo il giusto tempo, finalmente l'acqua si è riempita di bollicine minuscole, però solo sul fondo. Dopo altro tempo le bolle si sono ingrandite, dal becker usciva fumo bianco e si sentiva un lieve rumore, sempre più forte. Aspettando ancora si è sentito anche uno strano odore, la stanza si era riscaldata e ormai le bolle erano tante e grandi. Quando la maestra ha spento la piastra, l'acqua era la metà di quanta ce ne aveva messa e le bolle non smettevano perché la piastra era ancora calda, e neanche il fumo aveva smesso». Samira, al quarto anno della scuola primaria, ha *raccontato* così l'esperienza di ebollizione dell'acqua usando il proprio linguaggio naturale, ma riuscendo a cogliere in modo incisivo e consequenziale tutti i dati significativi dell'esperienza: *il tempo, le bollicine, il fumo, le grandi bolle, la diminuzione dell'acqua*. Ha associato delle parole a ogni elemento cruciale dell'esperienza, parole che attribuiscono significato all'esperienza stessa e da essa acquistano significato condiviso.

Le parole, come sostiene Dewey, possono isolare e conservare un significato solo allorché esso è stato in precedenza implicato nei nostri contatti diretti con le cose. Non tutte le descrizioni/narrazioni prodotte dai ragazzi sono, ovviamente, corrette e complete come quelle di Samira ... In relazione a descrizioni o produzioni individuali imprecise, poco chiare, sono necessarie alcune considerazioni intorno all'età cognitiva dei bambini e allo scopo per cui scrivono. Sarebbe assolutamente inopportuno intervenire sulle narrazioni degli alunni con pesanti correzioni ortogrammaticali e di contenuto, si scrive per capire, è quindi impossibile pretendere che il linguaggio usato possa essere strutturalmente e lessicalmente corretto come quello di chi ha già capito. I bambini devono sentirsi liberi di scrivere senza timori relativi alla correzione dell'insegnante, ciò che deve prevalere, nel nostro caso, è il tentativo di mettere per scritto le proprie idee, i propri pensieri, di costruire una propria rappresentazione mentale di ciò che si è osservato – operazione tutt'altro che facile e immediata. C'è chi lascia per lungo tempo il foglio in bianco prima di 'mettersi in gioco', prima di 'mostrare' i propri pensieri, per timore di sbagliare, per difficoltà a trovare le parole; ma, spesso, perché ritiene che non valga la pena esplicitare il proprio punto di vista, considerato assolutamente inadeguato e certamente inferiore a quello del compagno.

Non dobbiamo dimenticare le 'storie' che caratterizzano ogni alunno, storie individuali e familiari che determinano pesantemente modi di essere, di percepire, di comprendere ..., di costruire la propria autostima. Storie che la scuola ha il dovere di considerare, storie diverse, che devono avere un peso nella progettazione didattica, non certo per costruire percorsi differenziati che perseguono obiettivi diversi, ma piuttosto per riuscire a gestire e orientarsi a colmare le differenze iniziali. Una scuola di qualità si distingue soprattutto da come riesce ad affrontare le differenze nell'azione didattica di

ogni giorno, proprio in classe, durante l'ora di scienze, non certo nelle ore aggiuntive dedicate all'illusione del recupero.

3. È il 'fare scienze' che una scuola più democratica sogna

Il linguaggio improprio e confuso che caratterizza gli scritti di un numero consistente di alunni, all'inizio del percorso di *questo* insegnamento delle scienze, è l'unico linguaggio che consente loro di capire, o meglio di iniziare a cercare di dare forma, sulla base delle proprie strutture cognitive, ai fenomeni che si stanno osservando; ha, quindi, un grande valore per lo sviluppo successivo delle capacità logico linguistiche e per il potenziamento del pensiero riflessivo, indispensabile per l'acquisizione di significative competenze scientifiche. Osservazione profonda e riflessione capaci di creare, nel tempo, un atteggiamento individuale verso l'apprendimento che si contrappone fortemente ai modelli oggi proposti dai mezzi di comunicazione di massa e riafferma il valore del soffermarsi a pensare, a ragionare, a prevedere cosa succederà in quel piccolo mondo che sto interrogando ... che riafferma il valore dello sforzo individuale per rispondere agli interrogativi nati spontaneamente dall'osservazione o posti dall'insegnante: 'piccole sfide' sempre misurate dalla capacità progettuale dei docenti; non troppo difficili perché sarebbe scoraggiante, né troppo facili perché non si imparerebbe gran che e non si sarebbe sufficientemente stimolati.

4. È il 'fare scienze' che educa al pensiero autonomo e alla riflessione critica

Dopo che ogni bambino ha elaborato la propria descrizione del fenomeno osservato, diventa importante il confronto, la discussione collettiva, mirata ad analizzare, modificare, correggere, arricchire, completare le produzioni individuali. Cinque o sei bambini, a turno, leggono ai compagni i propri scritti e su di essi si sviluppa la discussione, in un clima di cooperazione che mira al raggiungimento di più obiettivi: da un lato lo sviluppo della concettualizzazione del fenomeno osservato (in questo caso l'ebollizione dell'acqua), dall'altro l'acquisizione della capacità di cooperare, cioè, il rapportarsi con gli altri, rispettando i diritti e le opinioni altrui, sviluppando la capacità di lavorare insieme per la soluzione di problemi e comprendendo l'importanza dello scambio verbale per l'interpretazione dei fatti.

In [5] si riportano citazioni dal testo di Roger Cousinet [2]:

Ciascuno porta anche le proprie parole, parole differenti (che qualche volta indicano la stessa cosa) e siccome ciascuno comprende il significato del linguaggio che ascolta, le parole che designano spiegazioni si urtano, si oppongono, e siccome ciascun fanciullo si preoccupa di far trionfare il proprio punto di vista e di convincere l'oppositore, [...] bisogna osservare più da vicino riprendere la propria analisi, verificarla, o incorporarvi le spiegazioni di altri che diventeranno [...] elementi di cui egli potrà nutrirsi.

[...] il fanciullo [...] impara a proporre le sue interpretazioni invece di imporle, impara a esprimersi con precisione e in maniera analitica, a desiderare e a sforzarsi di essere compreso dai suoi interlocutori, ad ascoltare e comprendere

le loro interpretazioni. Impara a vivere socialmente, cioè ad arricchire il suo pensiero con l'apporto del pensiero altrui. [5] p. 25 e p. 27.

È interessante notare i risultati ottenuti dall'insieme delle ricerche condotte da Pontecorvo e Zucchermaglio; da queste ricerche, infatti è emerso che durante la discussione in classe si verifica una particolare situazione di interazione sociale che comporta processi linguistici e socio-cognitivi particolarmente rilevanti ai fini dell'acquisizione di nuove strategie e conoscenze più complesse. Da sottolineare, inoltre come queste ricerche abbiano verificato che la discussione non si realizza naturalmente a scuola, ma è il risultato di un'attività di progettazione capillare dell'azione didattica che inserisce nel contesto scolastico condizioni volte a garantire lo svolgersi di una discussione efficace. Tali condizioni specifiche sono:

- a) Un'esperienza comune preliminare alla discussione [...]
- b) Un discorso che rielabora l'esperienza compiuta e che si struttura come situazione di problem solving collettivo, in cui sia possibile negoziare significati, condividere e confrontare differenti soluzioni o interpretazioni di uno stesso materiale (ad esempio un testo scritto) o di una stessa esperienza (ad esempio, un'osservazione o un'esperimento scientifico).
- c) Un cambiamento delle usuali regole di partecipazione al discorso scolastico, i turni del discorso non devono essere controllati dall'insegnante; le usuali domande dell'insegnante sono in parte sostituite da riprese o rispecchiamenti degli interventi degli allievi, da richieste di spiegazione e da interventi che sottolineano un'eventuale discordanza di posizioni. [5] p. 76.

6. È il 'fare scienze' che educa alla convivenza democratica

In questo contesto di discussione che valorizza il lavoro di tutti integrandolo e completandolo si ha modo di esplicitare e capire gli errori, di comprendere le modalità con cui arricchire i propri elaborati, di modificare il proprio iniziale processo di concettualizzazione o di renderlo più solido e completo. Concordiamo, quindi, pienamente nell'attribuire alla discussione collettiva fra pari grande importanza sia sul piano cognitivo che motivazionale oltre che linguistico, ma riteniamo che debba essere seguita da un altro momento di riflessione individuale che dia ad ogni bambino la possibilità di ritornare, alla luce della discussione appena svolta, sulla produzione individuale scritta precedentemente, per integrarla, modificarla, riscriverla a seguito di quanto è emerso nel confronto collettivo. Trattasi di un momento di affinamento della concettualizzazione che ci appare sempre più importante per tutti gli alunni, ma, in particolare, per coloro che, più degli altri, hanno difficoltà a costruire una propria rappresentazione dei fenomeni e ad esprimerla in una forma linguistica accettabile.

È una richiesta che stimola a rileggere con attenzione il lavoro individuale e a richiamare il dibattito verificatosi nel corso della discussione, per scegliere al suo interno quegli elementi che possano rendere più significativa la propria verbalizzazione scritta. Si tratta di un lavoro complesso di cui l'insegnante deve essere pienamente

consapevole, per richiederlo quando ritiene davvero opportuno garantendo ai bambini il tempo necessario per orientarsi al meglio in questa attività. Un'altra consapevolezza che l'insegnante deve avere è legata alla complessità che sta dietro ad ogni significativa concettualizzazione dei fenomeni, anche dietro ad un fenomeno, in genere considerato banale come l'ebollizione dell'acqua.

I bambini finora hanno osservato un'esperienza di ebollizione dell'acqua, ma conoscono la parola 'ebollizione'? Riconoscono il fenomeno dell'ebollizione? In genere è necessario dare loro la possibilità di distinguere il fenomeno dell'ebollizione dal riscaldamento dell'acqua per consentire di *isolare* l'ebollizione e le sue caratteristiche peculiari. A seguito della nuova esperienza e dell'osservazione della stessa, i bambini saranno di nuovo coinvolti in una produzione scritta individuale che non richiederà loro una descrizione dettagliata del riscaldamento, ma, piuttosto, la messa in evidenza delle differenze rilevate fra le due esperienze (ebollizione e riscaldamento). Solo a questo punto del percorso didattico i ragazzi saranno in grado di elaborare una definizione di ebollizione dell'acqua. L'iter della proposta didattica è completamente ribaltato rispetto a quello prevalente anche nella scuola primaria: non si parte dalla definizione del fenomeno, magari imparata a memoria, per poi procedere alla sua spiegazione mediante esperimenti dimostrativi che i bambini difficilmente comprendono, la definizione operativa arriva alla fine del percorso ed è costruita dagli alunni che ne hanno piena consapevolezza.

Costruire passo, passo le proprie conoscenze scientifiche partendo da fenomeni accessibili legati a conoscenze strettamente connesse ad aspetti operativi, da fiducia agli alunni nella loro comprensione di quanto trattato e li stimola ad approfondire e a ricercare nuovi saperi. Le definizioni che i bambini sono in grado di costruire sono del tipo che segue: «L'ebollizione è un fenomeno in cui l'acqua fa piccole bollicine, sempre più grandi, fumo bianco, il contenitore si appanna, l'acqua diminuisce e si agita. L'ebollizione non avviene se l'acqua non si scalda abbastanza» (Gaia). Su queste produzioni, già sufficientemente chiare e complete, potrà poi intervenire l'insegnante che *rimetterà a pulito* le produzioni dei bambini dando loro forma linguistica adeguata e riportandole su copia fotostatica che ognuno inserirà nel quaderno individuale.

Il quaderno individuale, strumento fondamentale e prezioso in questa proposta di insegnamento delle scienze, documenta nei dettagli tutto il lavoro svolto, individuale e collettivo, un diario di bordo sia per l'insegnante che per l'alunno. L'alunno vi si riferisce per rivedere, ripensare, studiare quanto costruito in classe e perché no, anche prepararsi ad esporlo ai compagni e all'insegnante. Per l'insegnante è un documento da leggere sistematicamente per meglio "ascoltare" le parole individuali dei ragazzi e dare loro un peso nel proseguimento di ogni attività cercando così di piegare, sempre, la proposta didattica rivolta a tutti, alle esigenze dei singoli, nella convinzione che sia questo il modo migliore per individualizzare l'insegnamento. Un'impostazione metodologica operativa, quindi, che si articola in fasi ben precise: partire dal fenomeno, osservare, verbalizzare, discutere affinare la concettualizzazione, fasi che rappresentano

un modello pedagogico-metodologico significativo non un dogma da applicare in modo acritico e decontestualizzato, ma un modello flessibile da adattate alle esigenze del percorso didattico in sé e del contesto della classe a cui il percorso viene proposto.

7. Ancora sull'essere insegnante

Una proposta didattica di insegnamento delle scienze, come quella che abbiamo appena tentato di descrivere, reclama insegnanti appassionati e competenti che possiedono cioè specifiche competenze professionali e le sanno tradurre in una significativa capacità progettuale dove la disciplina sa incontrare la psicologia dei ragazzi: un insegnante che sa svolgere bene il proprio ruolo di programmatore, di costruttore di itinerari teorici e pratici, didattici e formativi e che sa coniugare queste competenze con un elevato impegno e un forte senso di responsabilità; un insegnante in grado di partecipare attivamente al processo di insegnamento apprendimento che si svolge fra docente e alunno e si concretizza nello stargli vicino, collaborare con lui, ascoltarlo, ma anche proporgli degli obiettivi e dei compiti precisi, investire su di lui e sul suo futuro proponendogli percorsi didattici, formativi, motivanti che sappiano sviluppare il naturale desiderio di apprendere e garantire loro un personale successo scolastico. Il che non significa un successo uguale a quello dei compagni, ma comunque la possibilità di costruirsi, nella scuola, le competenze necessarie a garantirgli diritto di cittadinanza.

Se è necessario, nelle proposte di insegnamento, saper coniugare la disciplina con le esigenze affettive e cognitive dei ragazzi, ci appare altrettanto necessario che l'insegnante sappia associare, nel proprio mestiere, le caratteristiche umane di comprensione e disponibilità ad una concreta capacità di costruzione di percorsi didattici all'interno dei quali ogni alunno possa sperimentare un concreto successo personale. È la verifica dei concreti progressi nell'apprendimento la migliore strada per costruirsi nel tempo quell'autostima personale che conduce, anche i bambini in difficoltà, ad esprimersi, riempiendo il 'foglio bianco' di parole che raccontano storie, pensieri, idee, ragionamenti, rappresentazioni del mondo che li circonda.

Il problema della mancata formazione specifica degli insegnanti investe tutt'ora le scuole di ogni ordine e grado ed è ampiamente correlato con la disaffezione che i ragazzi dimostrano verso la scuola. A questo proposito appaiono particolarmente incisive le parole di Arnold Arons:

In effetti ci si dovrebbe prendere cura di questo problema nelle scuole, ma ciò non è stato fatto, né sarà fatto nel prossimo futuro, perché gli insegnanti con l'eccezione di una esigua minoranza non hanno sviluppato le necessarie conoscenze e capacità. Deve essere messo chiaramente in risalto che ciò non è una colpa degli insegnanti. La condizione dei futuri insegnanti fu ignorata in maniera cieca quando essi erano all'università, ed essi non furono aiutati a sviluppare le capacità [...] di cui hanno bisogno nelle loro aule. La maggior parte degli insegnanti in attività sono persone dotate di buona volontà, ma essi non possono sviluppare da soli le capacità di ragionamento necessarie. Devono essere aiutati e questo aiuto deve provenire dall'ambito universitario,

sia come preparazione preliminare sia come aggiornamento successivo [...] e il risultato inevitabile è che continuamente si laureano insegnanti che fin dal primo istante hanno bisogno di corsi di recupero. [1] p. 22.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Arons, A. *Guida all'insegnamento della fisica*, Zanichelli, Bologna 1992.
- [2] Cousinet, R., *Un metodo di lavoro libero per gruppi*, La Nuova Italia, Firenze 1949.
- [3] Dewey J., *Esperienza ed educazione*, La Nuova Italia, Firenze 1950.
- [4] Gopnik A., Meltzoff A., Kuhl P., *Tuo figlio è un genio. Le straordinarie scoperte sulla mente infantile*, Baldini & Castoldi, Milano 2003.
- [5] Pontecorvo, C., Ajello, A. M., Zucchermaglio, C., *Discutendo si impara*, La Nuova Italia Scientifica, Urbino 1995.

L'IMPORTANZA DELLA STORIA DEL PENSIERO SCIENTIFICO NELL'INSEGNAMENTO DELLE SCIENZE

BRUNELLA DANESI

Redazione di 'Naturalmente'

1. Problemi didattici relativi alla presentazione dei modelli scientifici e della loro storia

Agli inizi del Novecento, nei suoi scritti storici e metodologici, il sociologo tedesco Max Weber chiariva che lo sviluppo del pensiero scientifico si è accompagnato, nel corso dell'età moderna, al *disincantamento* del mondo: gli uomini, abbandonando gradualmente ogni riferimento a spiegazioni e comportamenti magici, metafisici e religiosi nel descrivere la natura, hanno riconosciuto alla scienza, cioè alla ragione e al sapere tecnico, il ruolo di unici strumenti idonei a svolgere le ricerche e le indagini sui fenomeni naturali. Inoltre, sempre in quei testi, Weber sottolineava che ogni teoria scientifica porta con sé domande e questioni che premono verso altre soluzioni ed evidenziava come il *destino* della scienza coincidesse con la seguente circostanza, ossia che «ogni lavoro scientifico vuole essere superato e invecchiare, cosicché essere superati scientificamente, non è soltanto il destino di tutti noi, ma è anche il nostro scopo»¹. Le due riflessioni mantengono intatta la loro validità e risultano importanti per un corretto insegnamento scientifico.

Relativamente alla prima, va ricordato che i modelli scientifici proposti nella prassi scolastica entrano spesso in conflitto con la rappresentazione immediata e ingenua della realtà, propria del senso comune. Il fatto non deve sorprendere dal momento che il nostro cervello si è evoluto per reagire in modo rapido ed efficace a stimoli ambientali anche complessi e tende pertanto a inserire i dati raccolti in un contesto noto, mentre l'attività scientifica è un processo lento, che prevede cura nella raccolta dei dati, riflessione sul loro significato e verifica delle regolarità, tutti comportamenti che non dovevano possedere grande valore adattativo nell'ambiente in cui la nostra specie è vissuta durante l'evoluzione del suo grande encefalo.

Circa la seconda riflessione di Weber, concernente il carattere non ultimo, né ultimativo delle conoscenze scientifiche, non è facile fare cogliere ai giovani l'importanza dei percorsi storici delle idee scientifiche ed anche il fascino di un tipo di sapere per cui nessuna acquisizione è completamente definitiva; in particolare, non è facile fare loro comprendere che la capacità autocorrettiva è parte della grandezza della scienza, al pari della flessibilità con cui essa è capace di adeguarsi a nuove acquisizioni imposte dal

riscontro dei dati sperimentali.

La scienza tende a dimenticare le sue origini, azzera continuamente il cammino tortuoso che l'ha portata ai presenti risultati, considera del tutto irrilevanti precedenti acquisizioni, ha come suo valore costitutivo quello dell'*oblio* e del superamento del proprio passato². Gli scienziati non hanno interesse per teorie e soluzioni precedenti che si configurano semplicemente come errori, verità parziali, tappe necessarie ma superate per il raggiungimento della verità o per lo meno di quella verità provvisoria accettata in quel momento dalla comunità scientifica. Questo si riflette sul modo in cui vengono costruiti i manuali scientifici, sia a livello universitario che a livello di scuola media superiore: essi rappresentano la summa dei saperi acquisiti in quel momento dalla comunità scientifica, raramente vi trovano spazio i problemi irrisolti, gli interrogativi aperti, i lati oscuri delle questioni. Anche molti saggi di divulgazione scientifica e la maggior parte delle riviste si ispirano a questi criteri di linearità, progressività, astoricità, confermando quest'immagine cristallizzata della scienza.

Nel fare queste brevissime annotazioni sul rapporto tra scienza e storia della scienza non si possono dimenticare le applicazioni tecnologiche della ricerca biologica; a partire dalla seconda rivoluzione scientifica, l'intreccio scienza-industria è divenuto talmente esteso e profondo da segnare profondamente la nostra storia recente e da indurre il cittadino comune a ritenere che la scienza si identifichi e si esaurisca nelle sue applicazioni tecnologiche. Spesso le finalità conoscitive dell'attività scientifica vengono perse di vista e la scienza viene identificata con le sue applicazioni e, di volta in volta, viene visualizzata come fata benefica portatrice di doni o come demone corruttore del pianeta e dei suoi abitanti; soprattutto nel corso di questi ultimi anni si è assistito ad un prepotente fiorire di approcci alternativi alla *scienza ufficiale*, con un moltiplicarsi di sedicenti maghi in grado di predire il futuro o togliere incantesimi e di guaritori che prescrivono cure alternative più *dolci* della farmacopea ufficiale.

Così, la scienza, nata come attività aperta al controllo intersoggettivo, da un lato si è trasformata nel suo opposto, cioè in una sorta di nuova fede dogmatica ed acritica, dall'altro viene messa sullo stesso piano di nebulose ricerche alternative, con un prepotente ritorno all'influenza degli astri, delle pietre, di simpatie ed antipatie che regolerebbero il rapporto fra microcosmo e macrocosmo. In entrambi i casi, si è dimenticato che la ricerca scientifica è stata guidata dall'esigenza di conoscere e non può risolversi nell'esame delle possibili applicazioni, legate ad interessi economici di vario tipo.

Penso che la scuola debba farsi carico di questi problemi e debba individuare spazi in cui sia possibile mettere in luce i legami fra lo sviluppo della scienza e i contesti storici in cui essa si è sviluppata. Questo, naturalmente, non significa rinunciare alla specificità della disciplina, che non può essere sommersa in un generico storicismo.

La conoscenza di come si è giunti a determinate scoperte presenta un alto valore formativo in quanto rende evidente la provvisorietà dei modelli scientifici che l'uomo si è costruito nel tempo e le intersezioni da sempre intercorse fra scienza e altri campi

del sapere; può far comprendere le ragioni dei vinti; fa capire che non esistono osservazioni pure e che *i tacchini induttivisti* sono destinati all'insuccesso; permette di delineare itinerari didattici, seguendo nell'esposizione la stessa progressione con cui tali argomenti si sono andati districando; è possibile ripetere in laboratori anche poco forniti esperienze classiche che non prevedono attrezzature sofisticate come quelle che vengono oggi utilizzate nei moderni laboratori di ricerca; consente di discutere i rapporti scienza-società e scienza-tecnologia.

Naturalmente, questa metodologia non è esente da rischi, in quanto gli insegnanti di scienze, avendo spesso ricevuto una formazione scientifica di base non rispondente alle esigenze sopra indicate, si trovano disarmati di fronte al problema del rapporto tra scienze e storia, e non di rado sono diffidenti; mentre gli insegnanti di storia, per parte loro, non necessariamente hanno seguito corsi di storia della scienza, per cui è estremamente difficile predisporre un percorso integrato che veda coinvolti insegnanti di discipline diverse. Effettivamente, sia le poche ore destinate all'insegnamento delle scienze sia il programma francamente ipertrofico e onnicomprensivo possono svilire questi interventi di storia della scienza a piccoli *flash* aneddotici, non esenti dalla tentazione a un raddrizzamento forzato dei percorsi che, invece, sono stati labirinti di strade tortuose o a fondo cieco. Sarebbe importante ricorrere alle fonti originali e 'far parlare' i documenti, ma si incontrano grosse difficoltà perchè il materiale disponibile non è molto. La lodevole iniziativa della casa editrice Loescher che, a partire dalla fine degli anni Settanta, promosse una collana³, che presentava filosofi e scienziati del passato e scelte antologiche dalle loro opere, non ha avuto seguito. Attualmente, nel panorama dell'editoria italiana, non si trovano in commercio molti scritti di scienziati e naturalisti originali del passato⁴. Non mancano, tuttavia, lavori interessanti sulla storia della biologia e della scienza in genere⁵. Pressochè inesistenti, invece, sono lavori adatti anche per la scuola dell'obbligo.

2. Esempi di percorsi pluridisciplinari di scienza e storia della scienza

Pur con i limiti ed i problemi già evidenziati, molti argomenti di scienze naturali possono essere affrontati in chiave storica. Eccone alcuni possibili.

Le vicissitudini che hanno portato alla lenta affermazione della distinzione fra vivente e non vivente, che va di pari passo con la scoperta, anch'essa travagliata, che la vita – almeno nel mondo che conosciamo oggi – si origina solo dalla vita, sono un esempio paradigmatico che ciò che uno vede dipende sia da ciò cui guarda, sia anche da ciò che la sua precedente esperienza gli ha insegnato a vedere. Gli esperimenti di Redi fanno comprendere come anche le osservazioni più accurate, da sole, non possono far crollare una teoria, in quanto sono sempre circoscritte a casi particolari che non possono essere generalizzabili. Redi mostrò che effettivamente le mosche non derivano dalla carne in putrefazione, ma non escluse che altri organismi potessero formarsi dalla materia non vivente, come ad esempio gli insetti della galle; e Spallanzani, che aveva affrontato in modo ineccepibile dal punto di vista sperimentale il problema della funzione e del

significato degli animalculi nello sperma, escluse in modo tassativo che essi svolgessero un ruolo specifico nella fecondazione, molto probabilmente portato fuori strada dalle sue radicate convinzioni a favore del sistema ovista. Per ben due volte, infatti, credette di osservare che il seme di alcuni rospi era privo di spermatozoi e, nonostante questo, le uova erano state fecondate regolarmente. Successivamente verificò la stessa cosa, anche se nel seme c'erano sì spermatozoi, ma spermatozoi a suo avviso uccisi dal riscaldamento cui aveva sottoposto lo sperma. Il problema della generazione spontanea, che per chi si occupa di scienze naturali è un argomento scontato, non lo è poi tanto per alcuni adolescenti che sono invece convinti che i pidocchi nascano dallo sporco dei capelli.

La disputa biogenesi/abiogenesi, che si conclude tradizionalmente con i classici esperimenti di Pasteur, anch'essi facilmente ripetibili in laboratorio, può permettere di parlare della scoperta dei batteri; a questo proposito, risulterebbe appropriato leggere alcuni brani tratti dallo splendido racconto *Il dottor Semmelweis*⁶, nel quale è tracciata la storia del medico ungherese. Tra l'altro, leggere documenti in cui vengano illustrate quali fossero le possibilità delle cure mediche ancora nell'Ottocento, prima della scoperta dei batteri, porterebbe ad una rivalutazione di quella che da alcuni viene con disprezzo definita 'medicina ufficiale', i cui farmaci sono testati attraverso l'altrettanto 'deprecato' metodo sperimentale.

La storia della nascita e dello sviluppo della teoria cellulare, può rappresentare un esempio paradigmatico di come il microscopio, come ha affermato Canguilhem⁷, è «... più il prolungamento dell'intelligenza che il prolungamento della vista...»; non sono state certamente soltanto le osservazioni al microscopio che hanno portato al pieno sviluppo della teoria cellulare; nella sua formulazione definitiva, questa afferma infatti non soltanto che tutti i viventi sono costituiti da cellule, ma anche che ogni cellula deriva da altre cellule preesistenti e si collega intimamente con la disputa biogenesi – abiogenesi che tenne impegnati nello stesso periodo i naturalisti. È pertanto una banalizzazione collegare questa scoperta al nome di Robert Hooke, semplicemente affascinato dall'inimmaginabile ampliamento dei sensi reso possibile da questo nuovo strumento, che estendeva la vista e permetteva la scoperta di un mondo sino ad allora sconosciuto; la teoria nasce piuttosto dalla teorizzazione delle strette interrelazioni fra struttura e funzione, base concettuale sia della fisiologia di Albrecht von Haller che dell'anatomia comparata di George Cuvier, tanto che il primo, il quale sostiene che i viventi sono costituiti da tessuti, scrive che la fibra (il tessuto) è per la fisiologia ciò che la linea è per la geometria e aggiunge significativamente che le più piccole fibre possono essere osservate con gli occhi della ragione, mentre per Buffon i viventi sono costituite da molecole organiche, anch'esse invisibili al microscopio.

Insomma, chi studia i viventi con il nuovo strumento oscilla fra due posizioni antitetiche, entrambe più teoriche che fondate su protocolli osservativi: l'organismo è infatti visto alternativamente come costituito da una sostanza plastica fondamentale oppure da «granelli di vita» equivalenti agli atomi della materia inorganica e la scelta è intrecciata con le posizioni che i vari naturalisti hanno assunto a proposito della

nascita di nuovi individui per riproduzione sessuata. Lentamente, al chiudersi del secolo Diciottesimo, si fa strada il concetto di 'organizzazione del vivente', non un semplice assemblaggio di particelle indipendenti, ma una struttura in cui le parti sono pienamente integrate. Così, secondo Bichat, fra le molecole e l'organo vi deve essere un nuovo livello di organizzazione, quello costituito dai tessuti, ciascuno dei quali svolge un compito specifico ed è integrato con gli altri. Indubbiamente, anche il miglioramento del potere di risoluzione dei microscopi grazie all'impiego di lenti acromatiche, ha contribuito alla formulazione della teoria, unitamente alle tecniche di dissezione attraverso le quali si cerca di dissociare i tessuti per fare apparire vescichette di forma sempre simile, al cui interno è costantemente presente un' altra sferetta: il nucleo. Tutto questo permette la generalizzazione di Schwann e Schleiden e l'ulteriore precisazione di Virchow. L'affrontare la teoria cellulare su basi storiche offre inoltre la possibilità di ripetere i classici esperimenti di osservazione di tessuti vegetali ed animali e anche quelli che hanno permesso a Pfeiffer di verificare l'osmosi o a Overton di mettere in luce la diversa permeabilità della membrana cellulare a coloranti idro e liposolubili, consentendo di passare da osservazioni di tipo esclusivamente morfologico ad altre che sono introduttive alla fisiologia cellulare.

La cosmologia degli adolescenti e le misconoscenze di cui sono imbevuti ricalcano spesso convinzioni del passato; con questo non voglio sostenere che le tappe della vita umana in qualche modo ripercorrono la storia dell'umanità, ma semplicemente che certe convinzioni, dettate soprattutto dal senso comune, sono dure a morire. Quante volte gli insegnanti danno per scontato la legge di conservazione della massa, che, nella sua semplicità, anche il più restìo degli studenti è in grado di enunciare. Se però si chiede agli studenti il motivo per cui, pur mangiando tutti i giorni, il peso di un individuo adulto si mantiene grosso modo invariato, la risposta più frequente è che il cibo, la materia, si trasforma in energia. Di fronte a questo tipo di risposte, perchè non affrontare il problema raccontando come Lavoisier risolse la questione attraverso gli splendidi esperimenti sulla respirazione animale? Saggi come quelli di Abbri⁸ sono una fonte preziosa per immergersi nell'ambiente culturale del tempo in cui visse l'esattore della *ferme generale*. Sulla scorta di queste pagine si può ampliare il discorso e parlare della nascita della chimica pneumatica, perché anche le caratteristiche dei gas, il fatto di non essere essi dotati, come affermava Aristotele, di *intrinseca leggerezza* non è un'affermazione che può essere data per scontata.

Molti altri argomenti possono essere proficuamente affrontati in chiave storica. Potrei riferirmi alla nascita della genetica, alle grandi scoperte degli inizi del Novecento che portarono al passaggio dalla genetica formale all'idea dell'esistenza di particolari strutture – ancora ignote – situate sui cromosomi e poi allo studio della genetica fisiologica, e ancora all'identificazione del principio trasformante nel DNA e alle ulteriori scoperte che hanno condotto alla 'rivoluzione dei geni', proseguite con l'ingegneria genetica che promette di fornire nuovi poteri allo scienziato, tali da consentirgli di guidare i processi evolutivi.

Certamente, quando si parla di genetica, anche se è fondamentale che gli studenti capiscano appieno il ruolo del DNA e del RNA nel conservare, trasmettere e modificare l'informazione, sarebbe anche opportuno fornire almeno dei cenni sugli intrecci che hanno pesantemente segnato la nascita di questa scienza. Un riferimento da non trascurare riguarda, ad esempio, la chiusura alla genetica decretata nel nascente stato sovietico da Stalin, quando l'agronomo Lysenko, liquidando le nuove teorie e gli studi portati avanti in Europa e negli Stati Uniti come espressione di un sapere falso e borghese, cercò di dimostrare che l'ambiente era in grado di portare modifiche permanenti alle piante di grano sottoposte ad una tecnica di sua invenzione, la vernalizzazione, mentre in Occidente, un atteggiamento ideologico di segno opposto aveva permesso la nascita dell'Eugenetica che ebbe come conseguenza la teorizzazione, su basi proclamate scientifiche, della superiorità di alcune razze su altre, l'internamento in ospedale e successiva sterilizzazione di persone diversamente dotate e infine lo sterminio di ebrei, zingari, omosessuali nella Germania nazista.

Un altro argomento centrale dell'insegnamento della biologia, di cui non si può trascurare lo sviluppo storico, è la teoria dell'evoluzione. A questo proposito è importante mettere in luce quello che osservava Ernst Mayr⁹:

Mentre la biologia funzionale ha numerose somiglianze con le scienze fisiche, la biologia evolutiva crea un ponte verso le scienze sociali e le scienze umane perchè spesso si interessa dei medesimi problemi. In particolare, nello studio dell'uomo, si può constatare che le scienze dell'evoluzione e le scienze sociali per un ampio spazio si sovrappongono.

Quando si indagano le cause remote che hanno determinato le caratteristiche dei viventi presenti attualmente sul pianeta o il loro comportamento, i metodi tradizionali delle scienze fisiche non sono sufficienti, anzi sono fuorvianti. Il processo evolutivo è verificabile in laboratorio solo nel caso dei batteri e le indagini dell'evoluzionista sono molto più simili a quelle dello storico; egli cerca pazientemente documenti del passato, per ricostruire il cespuglio dell'evoluzione o comprendere in quale modo quella determinata struttura si è affermata nel tempo.

Lo studente deve aver chiaro che le Scienze Naturali sono scienze con uno statuto epistemologico particolare, che ciascun vivente è non soltanto un sistema complesso, ma è anche unico, non esiste il topo, ma una popolazione di topi, caratterizzata al suo interno da individui la cui variabilità è una caratteristica precipua e una forza per la sopravvivenza della specie. La Storia della Natura, dopo Darwin, ci narra di un lunghissimo tempo nel quale il nostro pianeta era completamente deserto, di un periodo ancora più lungo in cui, pur esistendo innumerevoli forme di vita, nessun uomo era in grado di osservarle, né di apprezzarne la bellezza e descriverla e può farci prevedere un mondo in cui ogni forma di vita dotata di autoconsapevolezza sarà scomparsa; come si può notare, si tratta di un gravissimo colpo al nostro antropocentrismo. Il cambiamento di paradigma causato da Darwin è stato enorme, rispetto alle posizioni dell'arcivescovo William Paley, che ancora alle soglie dell'Ottocento si sforzava di

dimostrare razionalmente l'esistenza di Dio con la celebre metafora dell'orologio.

La nascita dei modelli evolutivi è strettamente correlata con la scoperta del tempo profondo. Per gli uomini del Seicento la terra è un pianeta nato da poco e la storia umana e quella del pianeta sono fra loro profondamente intrecciati. Ancora una volta, può essere verificata un'analogia fra la percezione dei nostri adolescenti e quella degli uomini del passato: la scoperta del tempo profondo, direi la stessa percezione di tempi lontani, è difficilissima da far pienamente comprendere: i millenni, i milioni, i miliardi di anni si appiattiscono su un orizzonte indistinto ed è importante far capire agli studenti, sia che anche in passato la consapevolezza di «sterminate antichità» è stata una conquista faticosa, sia il modo con cui vi si è giunti. È altresì fondamentale che gli studenti abbiano ben chiaro che se la medicina ai suoi esordi si è concentrata esclusivamente sulle cause prossime della patologia, oggi non può trascurare le cause remote, quelle evolutive: più precisamente, la variabilità degli organismi, che si traduce anche nel diverso modo con cui individui della stessa specie reagiscono ai farmaci, agli attacchi batterici, ai tumori provocati sperimentalmente da agenti cancerogeni, non possono essere considerati un rumore indesiderabile nel sistema sperimentale, ma sono fattori di cui tener conto.

Concludo ricordando un altro argomento biologico di particolare rilevanza, in quanto strettamente intrecciato a problemi economici, storici, politici della contemporaneità: l'ecologia, che sarebbe molto utile affrontare anche nel suo sviluppo storico, magari partendo dall'atteggiamento ambivalente da sempre tenuto dall'uomo nei confronti dell'ambiente naturale (ma esiste ancora?), di volta in volta visto come *locus amoenus* o *horridus*.

NOTE

¹ Si veda [11], pg. 20

² L'argomento è trattato in modo esaustivo in [10].

³ Si veda [2].

⁴ Segnaliamo che tramite *internet* si possono scaricare gratuitamente alcune opere di Francesco Redi (<http://www.liberliber.it/biblioteca/r/redi/>, come ad esempio le *Esperienze intorno alla generazione degl'insetti*) o si possono ordinare presso la casa editrice Olschki di Firenze alcuni lavori di Spallanzani, <<http://www.spallanzani.it/pubblicazioni.htm>>.

⁵ Si veda ad esempio [1], [4], [5] e [8].

⁶ Si veda [6]

⁷ Per ulteriori chiarimenti, si veda [5], p. 79

⁸ Si veda [3].

⁹ Si veda [9], pp. 35-36

BIBLIOGRAFIA

- [1] AA. VV., *I grandi della scienza*, Le scienze, Milano.
- [2] AA.VV., Collana diretta da Paolo Rossi *Storia della scienza*, Loescher, Torino.
- [3] Abbri F., *La chimica del Settecento*, Loescher, Torino, 1978.
- [4] Barsanti G., *Una lunga pazienza cieca. Storia dell'evoluzionismo*, Einaudi, Torino, 2005.
- [5] Beretta M., *Storia materiale della scienza*, Bruno Mondadori, 2002.
- [6] Canguilhem G., *La conoscenza della vita*, il Mulino, Bologna, 1976.
- [7] Celine L., *Il dottor Semmelweis*, Adelphi, Milano, 1975.
- [8] Gohau G., *Storia della biologia*, Einaudi, Torino 1999.
- [9] Mayr E., *Biologia ed evoluzione*, Boringhieri, Torino, 1982.
- [10] Rossi P., *Il passato, la memoria, l'oblio*, il Mulino, Bologna, 2001.
- [11] Weber M., *La scienza come professione*, Einaudi, Torino, 1966.

QUALI CONDIZIONI PER UN INSEGNAMENTO SCIENTIFICO

SIGNIFICATIVO?

CARLO FIORENTINI

Presidente CIDI Firenze

1. Quali sono i risultati dell'insegnamento scientifico?

Durante i lavori del gruppo di scienze della commissione De Mauro¹, nel gennaio 2001, discutendo animatamente, avanzammo, nella prima fase, proposte e riflessioni divergenti su quasi tutto, tranne che su 2 o 3 aspetti; uno di questi, su cui l'accordo fu unanime, fu la valutazione sullo stato dell'insegnamento scientifico usuale. Queste sono le considerazioni che vennero scritte nel documento finale del sottogruppo scientifico: «Si constata, tuttavia, sia nella popolazione adulta che tra i giovani, un sempre più diffuso *analfabetismo scientifico*, rinforzato da una profonda demotivazione all'approfondimento e alla partecipazione. Non si tratta solo di preoccupanti carenze logico-linguistiche, ma anche di un'evidente incapacità di orientamento culturale di base in ambito scientifico, che spesso degrada in atteggiamenti superficiali ed ingenui».

Considerazioni analoghe erano state fatte, negli anni precedenti, da molti esperti, sulla base di ricerche sulle conoscenze scientifiche, che avevano evidenziato che molti studenti di 19-20 anni, dopo molti anni di insegnamento scientifico, continuano ad utilizzare soltanto le loro conoscenze di senso comune; e continuano a condividere, su molti aspetti, concezioni di tipo prescientifico². Come può essere spiegata questa drammatica situazione?

Pensiamo che la causa fondamentale vada ricercata nell'impostazione formalistica e specialistica dell'insegnamento scientifico prevalente in tutta la scolarità preuniversitaria [4]. È un insegnamento deduttivistico, addestrativo, basato sulla bignamizzazione [8], sempre più spinta man mano che si scende ai livelli scolari iniziali, dei manuali del primo anno di università. Da tempo memorabile sono stati indicati i profondi limiti di questa impostazione, sia dal punto di vista pedagogico-psicologico-didattico che sul piano epistemologico-culturale.

2. La scienza come dogma

In riferimento agli aspetti culturali, è stata evidenziata da molti, e da moltissimo tempo, la visione dogmatica, banalizzante e riduzionistica presente in questo insegnamento:

Ogni generazione, quindi, esce dalla scuola con l'idea che la scienza sia un fatto certo, un tessuto di teorie assolute e invulnerabili, dietro alle quali c'è solo una preistoria di errori, e il cui futuro sarà dato forse soltanto da sempre migliori

applicazioni. In sostanza, l'educazione manualistica della scienza distrugge l'idea che la scienza è una realtà storica, *inculca* l'immagine di una scienza dogmatica. Ed è così che la più antidogmatica tra le attività umane, vale a dire la ricerca scientifica, diventa il supporto del dogmatismo ideologico; la scienza è il frutto di discussioni ininterrotte, di polemiche e di controversie, di fantasie ardite e di critiche severe, e tuttavia quanti, attraverso l'immagine della scienza tratta dai loro manuali, desiderano, per esempio, imporre la loro ideologia, diranno (come dicono) che la loro ideologia è scientifica; intendendo con ciò che la loro ideologia è indiscutibile e incontrovertibilmente vera, proprio ... come la scienza [3, p. 27].

Watkins [20, p. 102] aveva osservato che il libro di Kuhn *La struttura delle rivoluzioni scientifiche* conteneva nella scelta del linguaggio molti suggerimenti, alcuni espliciti, altri impliciti, di un significativo parallelismo tra la scienza e la teologia. Kuhn aveva infatti sottolineato il carattere essenzialmente dogmatico dell'insegnamento scientifico: «Si tratta di un'educazione rigida e limitata, forse più rigida e limitata di ogni altro tipo di educazione, fatta eccezione per la teologia ortodossa» [16, p. 199]. Kuhn, tuttavia, ne aveva anche indicato la sua funzionalità per la formazione scientifica necessaria per operare all'interno di una determinata tradizione: «Lo scopo di un manuale è fornire al lettore, nella forma più economica e facilmente accessibile, le proposizioni di ciò che la comunità scientifica contemporanea pensa di sapere e le principali applicazioni alle quali questa conoscenza può essere dedicata» [17, p. 249].

Considerazioni sul ruolo nefasto dell'impostazione dogmatica dell'insegnamento scientifico sono state effettuate da molti altri epistemologi, storici della scienza e scienziati; ci limitiamo a ricordare, fra i molti, Schwab [19], Holton [15], e più recentemente le riflessioni di Reale [18, p. 374] e Bernardini durante i lavori della Commissione dei Saggi, istituita dal ministro Berlinguer nel 1997. Le considerazioni di Bernardini possono essere sintetizzate da queste sue parole: «L'insegnamento delle scienze della natura, così come è ancora oggi, non mostra alcuna parentela stretta con forme generali del pensiero razionale» [18, p. 252].

Questa impostazione è una conseguenza di scelte culturali ideologiche specifiche di tipo dogmatico o la conseguenza di una determinata concezione dell'insegnamento scientifico consistente nel considerarlo soltanto come l'enciclopedia sistematica delle conoscenze (fatti, esperimenti, legge, teorie) attualmente ritenute significative e vere? Ora, dovrebbe a tutti essere evidente che le motivazioni di questa impostazione non stanno generalmente in motivazioni coscientemente dogmatiche, ma in una concezione aculturale e funzionalista del sapere scientifico, in una scelta delle comunità scientifiche di concepire il sapere scientifico in modo non umanistico, non come uno degli strumenti culturali necessari per la formazione alla cittadinanza, ma soltanto funzionale alla formazione e selezione dei futuri ricercatori. Ma l'assenza o la presenza di cultura scientifica nel cittadino medio non è senza implicazioni con la sua cultura generale e con la sua partecipazione responsabile alla vita delle società democratiche. Ciò è indicato in modo chiaro nel Libro Bianco della CEE del 1995 [12, p. 309].

3. Il mito dell'insegnamento scientifico contenutisticamente aggiornato

La ricerca scientifica produce in modo sempre più accelerato nuove conoscenze e nuove teorie sempre più concettualmente raffinate e formalmente elaborate. Anche in Italia è molto diffusa la consuetudine di aggiornare i manuali e l'insegnamento con conoscenze dichiarative attinenti a queste conoscenze più recenti; si va dal Big Bang ai buchi neri, dalle manipolazioni genetiche a molte problematiche ambientali. In alcuni casi, le motivazioni sociali e culturali che guidano queste scelte non possono che essere condivise dal punto di vista teorico, ma ciò non è sufficiente per includere questi argomenti nel curriculum se i risultati formativi che si ottengono sono poi in contraddizione con quelle motivazioni. Scelte di questo tipo vengono effettuate spesso anche nella scuola di base.

Arons, in uno dei migliori libri di didattica della scienze pubblicati negli ultimi cinquant'anni, si chiede, riferendosi addirittura ai corsi universitari, quale significato formativo possano avere: 1) lezioni dove si parla di fisica delle alte energie con l'incomprensibile gergo fatto di quark, gluoni, stranezza, ecc., con studenti che non hanno ancora una comprensione adeguata di concetti, quali accelerazione, massa, forza, energia; 2) lezioni di astronomia dove si tratta di nucleosintesi stellare, pulsar, quasar e buchi neri con studenti che non sono in grado di spiegare perché crediamo che la Terra ed i pianeti ruotino intorno al Sole; 3) lezioni su DNA, biologia molecolare e struttura dei geni con studenti che non sanno come le diverse sostanze vengono definite e riconosciute, che ad esempio non hanno alcuna idea di che cosa si intenda, dal punto di vista operativo, con le parole 'ossigeno', 'azoto', 'carbonio'.

Queste lezioni «sono inutili nel migliore dei casi, e nel peggiore dei casi dannose, dal momento che non c'è abbastanza tempo per affrontare le domande del tipo *Come facciamo a sapere ...? Perché crediamo che ...?* Non è possibile che un flusso di parole incomprensibili possa creare una cultura scientifica; semplicemente esso aggrava il problema che stiamo tentando di risolvere» [5, p. 373]

Arons non nega, tuttavia, l'importanza educativa che possono avere alcune problematiche più connesse alla contemporaneità, ma a condizione che gli studenti ne comprendano i fondamenti scientifici che ne stanno alla base.

Se invece le questioni si affrontano *senza* un'adeguata comprensione della scienza che ne sta alla base, come purtroppo viene spesso fatto, l'iniziativa diventa speciosa. Gli studenti sono indotti nell'errore di pensare di aver compiuto un'indagine e di possedere una conoscenza dei problemi mentre, in effetti, si sono limitati ad usare dei termini tecnici di cui non comprendono il significato, e hanno avuto a che fare solo con generalizzazioni vuote, prive di sostanza e di un'autentica riflessione. In questi casi sono stati incoraggiati in maniera insidiosa ad abbracciare l'idea fin troppo diffusa, secondo cui 'ogni opinione è valida quanto ogni altra' [5, p. 385].

Mi sembra che l'onestà intellettuale dovrebbe richiedere che gli studenti acquisiscano una certa comprensione genuina dei concetti, delle teorie, e

delle scoperte scientifiche alla base del grande problema specifico che stiamo esaminando, e non devono essere incoraggiati a discorrere in maniera vuota di argomenti che essenzialmente non capiscono. Con studenti che già posseggono il retroterra concettuale necessario è possibile discutere subito di questi argomenti. Ma con studenti privi di idee su che cosa significhi 'energia' (molti la considerano un qualche tipo di sostanza materiale) [...]. Con studenti che non hanno alcuna base per credere al fatto che la struttura della materia sia discreta (conoscendo solo una successione di nomi, come 'atomo', 'molecola', 'nucleo', 'elettrone', presentati loro attraverso delle dichiarazioni senza alcuna esame di qualche prova sperimentale, di qualche ragionamento che servano a spiegare il significato dei nomi stessi) [...]. Infine con studenti che sono ancora aristotelici nel loro uso di frasi teleologiche e nella loro ignoranza della legge d'inerzia; con studenti di questo tipo è intellettualmente specioso e disonesto condurre la discussione iniziale senza aiutarli prima a formarsi e a capire i concetti prioritari essenziali [5, pp. 371-372].

L'alternativa indicata da Arons è quella di diminuire il numero di problematiche affrontate per dare «agli studenti la possibilità di seguire e interiorizzare lo sviluppo di un piccolo numero di idee scientifiche, presentate in quantità tale e con un ritmo tale da permettere una conoscenza di tipo operativo, e non solo dichiarativo [...] Gli studenti devono avere il tempo di formarsi i concetti, di pensare, di ragionare, e di percepire i collegamenti. Devono discutere le idee, e devono scrivere qualcosa a riguardo» [5, pp. 372-387].

4. Di meno è di più

Anche per molti esperti di didattica delle scienze, ad ogni livello scolare, a partire dalla scuola elementare, si dovrebbe insegnare un po' di 'tutto'; ovviamente si aggiunge: in un 'modo adatto agli studenti di quel livello'; il 'tutto' avendo a disposizione, in tutta la scuola di base e quando va bene, 2 ore alla settimana. In pratica non viene affrontato in modo significativo per lo studente nessun argomento, né dal punto di vista tecnico, specifico, né dal punto di vista problematico, critico. La regola sono la fretta, la superficialità, il nozionismo. Il risultato è la mancanza dello sviluppo di qualsiasi competenza, o – ancora peggio – dello sviluppo di una qualsiasi dimensione del concetto di competenza. Nel passaggio da un livello scolare all'altro si riparte sempre da capo, non essendoci nessuna base significativa di competenze su cui costruire.

Per avere un insegnamento significativo sono necessari, invece, tempi lunghi – tempi adeguati – per ciascuna problematica affrontata; se viceversa i tempi impiegati sono più simili a quelli degli *spot* televisivi o, detto in altre parole, sono quelli di un insegnamento nozionistico, trasmissivo, libresco, dove è compito principale dello studente comprendere, leggendo e studiando a casa le pagine assegnate, come è immaginabile che resti nello studente qualche conoscenza e che si sviluppi contemporaneamente, seppur gradualmente, *il gusto del conoscere?*

Indubbiamente una delle caratteristiche dell'insegnamento scientifico dovrebbe essere quella di sviluppare nello studente una 'forma mentis' logica, sistematica,

rigorosa. Infatti, una qualsiasi disciplina scientifica ha una sua organizzazione specifica, caratterizzata da relazioni precise fra i vari concetti, e da un lessico proprio; quando le parole che si usano sono anche utilizzate nella vita quotidiana, hanno in quel contesto disciplinare uno specifico significato che potrebbe non avere nulla in comune o addirittura essere in contraddizione con il significato quotidiano.

Lo studente può gradualmente sviluppare questa 'forma mentis' soltanto se potrà gradualmente costruire questi aspetti fondamentali della disciplina adulta durante tutto l'arco della scolarità preuniversitaria, se si troverà costantemente nella situazione di vivere situazioni problematiche – sul piano sperimentale e/o teorico e/o culturale e/o sociale – che lo porteranno a comprendere l'utilità o la necessità, o la possibilità di una nuova ipotesi, di un nuovo concetto, di una determinata generalizzazione, di una formula, di una teoria più generale [10]. Se, viceversa, tutto ciò gli viene proposto nella modalità usuale dei manuali, in modo asettico, non contestuale, non problematico, già ripulito e rifinito, il risultato, nella mente dello studente, non è il rigore, la razionalità, la logica, ma la mancanza di comprensione, di *significato*, e quindi l'opposto di tutto ciò.

Bruner ci ricorda costantemente la fondamentale importanza del «fare significato»:

senza il conferimento di un significato non ci può essere linguaggio, né mito, né arte – e non ci può essere cultura [...] I significati permeano le nostre percezioni e i nostri processi di pensiero in un modo che non esiste in nessun'altra parte del regno animale [...] Per capire bene il 'significato' di qualcosa è indispensabile una certa consapevolezza dei diversi significati che possono essere attribuiti alla cosa stessa, indipendentemente dal fatto che si concordi o meno con esse [9, pp. 179, 27].

Per comprendere qualcosa in ambito scientifico non si può trattare i termini e i concetti scientifici come se fossero venuti alla luce nel modo in cui sono presentati usualmente nei manuali; sono «decontestualizzati, liberati di ogni ambiguità», ormai senza vita, *senza significati*.

Comprendere una cosa in un certo modo è 'giusto' o 'sbagliato' solo dalla particolare prospettiva da cui la si considera. Ma l'«esattezza» di una particolare interpretazione, pur dipendendo dalla prospettiva, implica anche il rispetto di regole quali quelle della dimostrazione, della concordanza e della coerenza. Non tutto è accettabile. Esistono dei criteri intrinseci di giustizia, e la possibilità di interpretazioni diverse non le autorizza tutte indiscriminatamente [9, p. 27].

Ogni problematica importante ha bisogno di tempi molto lunghi per essere appresa in modo significativo, per diventare competenza; ciò implica considerare le variabili tempo e quantità dei contenuti in modo responsabile e non demagogico. «Questo tipo di ragionamento a sua volta implica che l'obiettivo dell'istruzione non sia tanto l'ampiezza, quanto la profondità» [9, p. 130]. Considerazioni di questo tipo erano presenti anche nel documento conclusivo della Commissione dei Saggi ed erano rivolte all'insegnamento di tutte le discipline scolastiche: «Elemento cruciale

per l'apprendimento è dato dalla qualità delle esperienze che insegnanti e studenti realizzano in relazione alle aree di studio ... L'istruzione non può e non deve mirare ad essere enciclopedica. Sezioni diverse del sistema scolastico hanno livelli e scopi diversi, ma in ognuna di esse la regola dovrebbe essere l'insegnamento di alcune cose bene e a fondo, non molte cose male e superficialmente: si deve avere il coraggio di scegliere e di concentrarsi» [18, p. 78].

Programmi di alto livello non sono quei programmi che fanno qualche riferimento a tutti gli aspetti fondamentali dell'enciclopedia scientifica, ma quelli che, effettuando scelte precise, hanno una quantità di contenuti effettivamente compatibili con un insegnamento che ha bisogno di tempi lunghi [6]. Questa esigenza è, a nostro parere imprescindibile sia nella scuola di base³ che nella scuola secondaria superiore. «Il nemico della riflessione è il ritmo a rotta di collo – le mille immagini. In un certo senso profondo, possiamo dire dell'apprendimento, e in particolare dell'apprendimento di materie scientifiche, quello che diceva Mies van der Rohe a proposito dell'architettura, che 'di meno è di più'» [9, pp. 10, 142] .

Se concentriamo la nostra attenzione sulla secondaria superiore non è da molto tempo più accettabile, se si vogliono sviluppare negli studenti competenze, che il programma (o meglio: i manuali) delle varie discipline scientifiche sia più o meno lo stesso a prescindere dalla collocazione di ciascuna disciplina nel piano di studi di ciascun indirizzo; è una situazione ben diversa avere a disposizione 2-3 alla settimana soltanto per un anno scolastico o per 3 o più anni. Evidentemente la quantità delle problematiche che possono essere affrontate dipende innanzitutto ed in modo determinante da questo aspetto.

NOTE

¹ Questo gruppo era costituito da circa venti esperti, in rappresentanza di tutte le associazioni di didattica delle scienze e di alcune associazioni professionali.

² I risultati delle ricerche effettuate in Italia sono in consonanza con quelle effettuate nel contesto internazionale. Fra le pubblicazioni italiane sono particolarmente preziose [11] e [14].

³ Sono stati pubblicati negli ultimi anni due progetti curricolari per la scuola di base che hanno indubbiamente molti aspetti pedagogico-culturali in comune; differiscono radicalmente, tuttavia, sulla scelta delle problematiche, sull'idea che "sia possibile insegnare qualsiasi cosa a qualsiasi età" con le modalità opportune. Il primo progetto, legato a questa visione è stato pubblicato in due libri [1] e [2]. Ed anche il secondo progetto è stato pubblicato in due libri [7] e [13].

BIBLIOGRAFIA

- [1] Alfieri F., Arcà M., Guidoni P., *Il senso di fare scienze. Un esempio di mediazione tra cultura e scuola*, Bollati Boringhieri, Torino 1995.
- [2] Alfieri F., Arcà M., Guidoni P., *I modi di fare scienze*, Bollati Boringhieri, Torino 2000.
- [3] Antiseri D., *Jenner e la ricerca sulle cause e gli effetti del vaiolo vaccino*, La Scuola, Brescia 1981.
- [4] Aquilini E., Gli insegnanti e le scienze, *Scuola e Didattica*, 6, 2003.
- [5] Arons A. B., *Guida all'insegnamento della fisica*, Zanichelli, Bologna 1992.
- [6] Barsantini L., Sull'insegnamento della fisica, *Insegnare*, 5, 2000, pp. 42-45.
- [7] Barsantini L., Fiorentini C., *L'insegnamento scientifico verso un curricolo verticale. Volume primo. I fenomeni chimico-fisici*, IRRSAE Abruzzo, L'Aquila 2001.
- [8] Borsese A., Fiorentini C., Roletto E., Formule sulla leggibilità e comprensione del testo. Considerazioni su una ricerca relativa ai manuali di scienze della scuola media, *Scuola e Città*, 12, 1996.
- [9] Bruner J., *La cultura dell'educazione*, Feltrinelli, Milano 1997.
- [10] Cambi F., Fiorentini C., Gori F. (a cura di), *L'arcipelago dei saperi. Progettazione curricolare, percorsi didattici nella scuola dell'autonomia. II Itinerari di sperimentazione in classe. Area Scientifica*, Le Monnier, Firenze 2001.
- [11] Cavallini G., *La formazione dei concetti scientifici*, La Nuova Italia, Firenze 1995.
- [12] Commissione dell'Unione Europea (a cura di), *Insegnare e apprendere verso la società conoscitiva, Annali della Pubblica Istruzione*, Le Monnier, Firenze 1995.
- [13] Cortellini G., Mazzoni A., *L'insegnamento delle scienze verso un curricolo verticale. Volume secondo. I fenomeni biologici*, IRRSAE Abruzzo, L'Aquila 2002.
- [14] Grimellini Tomasini N. e Segrè G., *Conoscenze scientifiche: le rappresentazioni mentali degli studenti*, La Nuova Italia, Firenze 1991.
- [15] Holton G., *Scienza, educazione e interesse pubblico*, Il Mulino, Bologna 1990.
- [16] Kuhn T. S., *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, Einaudi, Torino 1969.
- [17] Kuhn T. S., *La tensione essenziale*, Einaudi, Torino 1985.
- [18] Maragliano R. (a cura di), *Le conoscenze fondamentali per l'apprendimento dei giovani nella scuola italiana dei prossimi decenni. I materiali della Commissione dei Saggi*, Le Monnier, Firenze 1997.
- [19] Schwab J. J., Brandwein P. F., *L'insegnamento della scienza*, Armando, Roma 1965 (in particolare, p. 75).
- [20] Watkins J., Contro la scienza normale, in *Critica e crescita della conoscenza*, a cura di I. Lakatos I. e A. Musgrave, Feltrinelli, Milano 1976.

QUANTE E QUALI TIPOLOGIE DI E-LEARNING?

ANTONIO CALVANI

*Dipartimento di Scienze dell'Educazione e dei Processi Culturali e Formativi,
Università degli Studi di Firenze*

In genere si parla di 'e-learning' immaginando che questo implichi un'unica metodologia. Non è così. Quando un progettista deve dar vita ad un progetto di e-learning, deve anche affrontare un problema di 'metodologia', definendo la metodologia migliore sulla base dei vincoli in cui ci si trova ad operare. Esistono alcune soluzioni metodologiche che possono essere considerate 'paradigmatiche', anche se poi la soluzione operativa sarà spesso un ibrido tra esse.

È ormai comune, [9], [4, [3], [8], [6], distinguere tre soluzioni principali: *content + support*, *wrap around*, *integrated model*. Rispetto a questo riferimento esistono varianti che possono dipendere da fattori non strettamente legati all'aspetto metodologico, ad esempio il grado di integrazione tra presenza e virtualità [3]; occorre poi considerare che l'e-learning è un mondo in continua evoluzione: si pensi ad esempio agli sviluppi recenti del vasto e variegato mondo del *networked learning* e delle *online learning communities* [13], [17], [14] o del *m-learning*.

1. Tipologia *Content + Support (erogativa)*

Si tratta della tipologia più diffusa ed economica (se il livello di multimedialità ed interattività dei materiali è basso) e si basa sull'erogazioni di contenuti e sul supporto minimale di un tutor (che agisce per e-mail o computer conferencing); si caratterizza per la distinzione tra contenuto e supporto ed è orientata all'apprendimento individuale.

Il presupposto concettuale è che l'insegnamento consista sostanzialmente in una 'trasmissione di informazioni'. Un ulteriore assunto con cui per lo più questa modalità si coniuga è che la conoscenza (punto di arrivo dell'allievo) è già definita, l'obiettivo mantiene 'pochi spazi di libertà'.

L'erogazione, che caratterizza questa modalità, può essere sincrona o asincrona.

A – Erogazione sincrona (live).

Di questo tipo è, ad esempio, una comunicazione in video/audio conferenza in cui mittente e ricevente condividono la condizione temporale. Il valore specifico dell'erogazione sincrona sta nella possibilità di poter creare un tempo di interazione immediata tra soggetti remoti: nel modo tipico un esperto fa il suo intervento, al termine del quale gli studenti remoti possono rivolgere domande, dietro prenotazione, a cui l'esperto può conseguentemente rispondere. (In caso contrario la semplice erogazione assumerebbe il carattere di un semplice *streaming*.)

Occorre anche osservare che questa tipologia erogativa deve confrontarsi con evidenti problemi di accessibilità; in particolare la comunicazione bidirezionale in video conferenza è limitata da problemi di banda, che non consentono, al momento, un numero elevato di interlocutori. Gestibile è invece la comunicazione bidirezionale, limitata al solo audio e trasmissione di immagini statiche (ad esempio slide sincronizzate)¹. Al di là dei problemi di accessibilità (una linea ADSL si può considerare ormai un requisito minimo per ogni utente che voglia interagire con questa tecnologia), bisogna anche dire che l'interazione consentita sarà in ogni caso limitata; questa modalità è sottoposta infatti agli stessi vincoli propri della comunicazione sincrona e quindi anche della lezione in aula, cioè il vincolo della condivisione temporale; non tutti possono avere il tempo di porre domande etc.

Questa modalità prefigura anche quella che sarà la soluzione del cosiddetto *t-learning*, di cui tanto si parla, e che si avvarrà della televisione digitale. In un sistema erogativo basato sulla televisione interattiva, difficilmente l'interazione potrà essere allargata oltre un numero ristretto di persone (se non sotto forma di sondaggi), per l'ovvio intrinseco limite proprio dei sistemi sincroni, già sopra ricordato.

L'uso di una lezione *live*, all'interno di un corso o comunità, può con tutto ciò essere una importante componente con un *particolare scopo* (ad esempio quello di 'rivitalizzare' una classe o un gruppo poco motivato) *in un contesto più ampio di e-learning*.

Particolare valore aggiunto si ottiene infatti quando il momento live si colloca all'interno di un percorso in cui si impiegano anche sistemi asincroni e di rete ed un corredo di supporti informativi di altro tipo (repository digitale etc.): un animatore attiva una discussione preparatoria in un web forum, si raccolgono i quesiti principali, gli utenti si documentano, nell'incontro sincrono l'esperto risponde ai quesiti; il lavoro si completa successivamente con ulteriore elaborazione e documentazione in rete (relazioni, documenti, etc.).

B – Erogazione asincrona.

Nella stessa modalità erogativa troviamo l'erogazione asincrona. Tipicamente ci si imbatte nella presentazione di unità didattiche strutturate ('moduli'). In questo settore ci si muove tra la Scilla, non è sempre ben individuato che cosa dovrebbe fare la differenza rispetto alla comunicazione a stampa; molti moduli rimangono a livello di semplici sfogliapagine, e Cariddi, cioè, il costo di unità didattiche ad elevata multimedialità e interattività (che, oltretutto, perdono in accessibilità ed al di sopra di una certa soglia diventano meglio gestibili off line).

In questo ambito diventano essenziali le regole di una 'buona comunicazione', nella letteratura più volte raccomandate, ma spesso ignorate [11], [5], [1], [15]. Anche sulla multimedialità, su cui molto si è scritto, esistono ripensamenti critici in atto: lo stato della ricerca evidenzia come non esista alcun rapporto lineare del tipo 'maggiore interattività- maggiore apprendimento'. La multimedialità può anzi risultare dispersiva e comportare notevole sovraccarico cognitivo.

Un valore aggiunto dell'approccio modulare può essere offerto dalla possibile componentistica che può, laddove la produzione dei contenuti sia ampia e articolata, consentire corsi individualizzati di apprendimento. In questo senso si muove anche la filosofia dei *Learning Objects*, l'idea cioè di poter realizzare unità minime d'apprendimento autoconsistenti, da riusare e ricomporre in molteplici percorsi. Vi sono tuttavia alcune criticità legate alla natura inequivocabilmente contestualizzata degli apprendimenti e al carattere decisamente non autoconsistente della conoscenza, oggetto di discussione teoriche e metodologiche [7].

Nell'ambito della tipologia *content + support*, come abbiamo detto, il focus è sui materiali informativi. Questi in qualche modo dovrebbero essere esaustivi, autoconsistenti, limitando al minimo l'intervento di altri attori umani. L'approccio erogativo beneficerebbe così di fattori di scala su grandi numeri: da questo punto di vista l'impiego di tutor rappresenta un costo da ridurre (o comunque da contenere). Su grandi numeri la funzione del tutor può essere regolata e divenire in vario grado del tipo *pull* (un tutor che agisce su richiesta dell'utente una sorta di operatore da *call center*). Il tutor poi può avvalersi di strumenti per gestire razionalmente la messaggistica (organizzazione delle tipologie di problemi in *faq*, etc.).

2. Tipologia *Wrap around (active)*

La tipologia erogativa è la modalità a cui il 'senso comune' è indotto a pensare nel momento in cui si pensa a forme di insegnamento in rete. Chi muove da un retroterra psicopedagogico nutre però profonda diffidenza verso il modello erogativo, che identifica l'attività didattica nella trasmissione delle informazioni. Da tutto il mondo educativo è mossa una critica all'eccesso di attenzione al contenuto, ad un apprendimento mnemonico e ripetitivo, con scarsa attenzione alle dimensioni critiche, costruttive e dialogiche dell'apprendimento. Qui è in gioco un diverso paradigma di riferimento, che è alla base di molte divergenze di opinione che investono anche il modo di vedere l'e-learning.

Da Piaget al recente costruttivismo, l'idea che l'apprendimento è «costruzione attiva» che muove dall'interno del soggetto rappresenta un punto di riferimento comunemente accettato in tutto il mondo della ricerca psicoeducativa. In particolare poi dall'ambito umanistico si sottolinea come l'apprendimento debba presentare caratteri di flessibilità ed apertura, lasciando spazi per autodefinirsi in itinere (inserire nuove informazioni, nuovi concetti, nuove riflessioni) e forme di collaborazione interpersonale.

In quest'ottica la rete dovrebbe spostare la propria attenzione dai contenuti, ad aspetti circostanti al contenuto. Come osserva Gilroy, facendo anche riferimento all'esperienza recente del M.I.T. che ha reso visibili in forma gratuita tutti i contenuti dei propri corsi, il difetto principale dell'e-learning attuale si può sintetizzare nella formula «too much contents, too little context». Proviamo allora a vedere la rete in un'ottica diversa, come un ponte tra alunno e docente: si può partire da consegne di lavoro, o da materiali di avvio, procedendo con arricchimenti gradualmente. La rete può agire da stimolo che suscita

il problema ed offre anche suggerimenti, risorse e supporti per la sua soluzione.

I contenuti di studio in senso stretto possono essere di varia tipologia, e rimanere allocati persino nei media tradizionali (libri ecc.); possono altresì non essere tutti definiti all'inizio ed espandersi nella rete, al di fuori dei materiali prefissati (Internet come risorsa di documentazione).

Nella rete si indicano le metodologie, le piste di lavoro, le bibliografie, i problemi da risolvere, le possibili soluzioni ai problemi, i tempi, gli appuntamenti. Il docente via via aggiunge nuovi elementi e suggerimenti in itinere. La rete diventa una sorta di spazio di lavoro condiviso. Strategico diventa l'uso dei *web forum*, dove gli allievi presentano i loro elaborati, condividendoli e discutendoli.

È questa la soluzione meglio confacente per i contesti universitari, in particolare (ma non solo) per l'area umanistica: l'investimento iniziale può essere molto limitato (se non nullo); richiede tuttavia un tutor attivo, capace di aprire/coordinare spazi di lavoro ed aggiungere documenti, stimoli, tenere vivo lo spazio virtuale. Lo strumento fondamentale in quest'ottica è appunto il *web forum*. Un *web forum* può diventare un utensile di particolare rilevanza didattica. Può essere usato secondo varie accezioni metodologiche, come semplice luogo di discussione e confronto, come luogo di elaborazione personale visibile ad altri, come sede di 'seminari', come luogo per attività collaborativa in senso stretto (vedi ultima metodologia).

Il modello è applicabile anche come integrazione alle attività in aula. Il docente fa la lezione in presenza, solleva quesiti, esercizi, spunti di riflessione, invitando gli allievi a svilupparli in rete, condividendo le soluzioni. Nella rete si sviluppano approfondimenti che gli allievi sosterranno con i ritmi e stili di apprendimento che sono loro propri (e che la ristrettezza temporale dell'incontro in presenza rischia di lasciare latenti).

3. Tipologia integrata o collaborativa

La terza modalità è quella che chiamiamo collaborativa. Non esclude la seconda, anzi in genere si presenta come una sua evoluzione/caratterizzazione/integrazione.

In questa soluzione la valenza della "classe virtuale" e della condivisione-collaborazione diventa centrale. I contenuti del corso sono fluidi e dinamici e in un certo senso viene meno la distinzione tra contenuto e supporto, poiché il contenuto nasce proprio nell'interazione e nella negoziazione tra i partecipanti e con il tutor; in questo caso il tutor/docente diventa un moderatore e animatore di comunità di apprendimento. L'apprendimento è visto come costruzione dialogica.

In qualche caso si può parlare di attività propriamente collaborative o cooperative, intendendo con 'collaborazione' l'operare congiunto di un gruppo verso un obiettivo comune attraverso interventi reciproci e condivisi e col termine 'cooperazione' l'operare orientato al conseguimento di un obiettivo comune attraverso strategie basate sulla divisione del lavoro [16], È una strada molto congeniale all'apprendimento 'per progetti'.

Il campo dell'apprendimento collaborativo è uno degli scenari più rilevanti e di

maggiore interesse per il futuro dell'e-learning, venendo a costituire oggi un punto di connessione tra e-learning e *Knowledge Management*, su cui oggi esiste notevole attenzione. Quest'ultimo può essere visto infatti come un sistema di capitalizzazione dei saperi a cui una comunità di apprendimento attinge.

Paradossalmente infatti la modalità collaborativa, mentre da un lato assume caratteri di maggiore sofisticatezza (dando luogo a gruppi di lavoro strutturati per l'apprendimento in rete), dall'altra si congiunge con gli approcci di e-learning *informal*, tipici delle comunità virtuali (in contesti non formali, comunità di dialogo, etc.) e con il mondo del *networked learning* [10]. In generale quando si parla di *networked learning* o di *online learning communities* ci si riferisce a comunità legate principalmente alla pratica professionale, basate sul *peer learning* e sulla condivisione di conoscenze e informazioni. Alla base c'è l'idea che l'interazione sociale rappresenti un agente di rilievo nell'apprendimento. La partecipazione dei soggetti alla vita della comunità può essere più o meno intensa; la forza delle *online learning communities* risiede principalmente nella capacità di generare processi di continua affiliazione e di mutuo apprendimento.

Questa direzione si apre a sviluppi nuovi, con l'avvento delle soluzioni m-learning che lascia intravedere anche nuovi scenari 'info-learn', integrando metodologie *problem based learning* e servizi di *community* – del tipo 'mostro alla comunità il mio problema, chi mi può aiutare a risolverlo?'

In rapporto alle diverse tipologie si richiedono anche diverse funzionalità e quindi, in qualche caso anche piattaforme diverse. Senza entrare nel dettaglio in queste problematiche, possiamo dire che nel primo caso occorreranno tecnologie attrezzate per l'*authoring* e l'erogazione di materiali strutturati, nel secondo caso saranno preferibili tecnologie 'aperte', che consentano con grande facilità agli stessi docenti o tutor inserimento e editing dei dati, nel terzo caso ambienti specializzati per l'apprendimento collaborativo (vedi il mondo del CSCL, Computer Supported Collaborative Learning, che ha sviluppato specifiche funzionalità in questa direzione). Per le diverse soluzioni a livello di microtipologia didattica, non si può che rimandare al lavoro di Ranieri [15].

NOTE

¹ Esistono ambienti come Centra che consentono agevolmente di gestire la comunicazione in full duplex.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ally M., Foundations of educational theory for online learning, 2004 in [2], pp. 3-31.
- [2] Anderson T., Elloumi F. (a cura di), *Theory and practice of online learning*, Athabasca University, Athabasca 2004. In Internet: http://cde.athabascau.ca/online_book/.
- [3] Bellier S., *Le e-learning*, Editions Liaisons, Parigi 2001.
- [4] Calvani A., Rotta M., *Fare formazione in Internet. Manuale di didattica online*, Erickson, Trento 2000.
- [5] Clark R. C., Mayer R. E. (2003), *E-learning and the science of instruction*, Pfeiffer, San Francisco 2003.
- [6] CNIPA (a cura di), *Vademecum per la realizzazione di progetti formativi in modalità e-learning nelle pubbliche amministrazioni*, I Quaderni. Pubblicazione a cura del Centro Nazionale per l'Informatica nella Pubblica Amministrazione (CNIPA), n. 2, 2004.
- [7] Fini A., Vanni L., *Learning object e metadati*, Erickson, Trento 2005.
- [8] Khan B., *E-learning: progettazione e gestione*, Erickson, Trento 2004.
- [9] Mason R., *Models of online courses*, in "ALN Magazine", 2, 1998, in Internet: <http://www.aln.org/publications/magazine/v2n2/mason.asp>.
- [10] Mason R., *Review of E-learning for education and training*, Paper presentato alla Networked Learning Conference, 2002. In Internet: <http://www.shef.ac.uk/nlc2002/proceedings/symp/02.htm#02a>.
- [11] Mayer R. E., *Multimedia learning*, Cambridge University Press, Cambridge 2001.
- [12] McConnell D., *Implementing supported cooperative learning* (II ed.), Kogan Page, Londra 2000.
- [13] Palloff R. M., Pratt K., *Building learning communities in cyberspace: Effective strategies for the online classroom*, Jossey-Bass, San Francisco 1999.
- [14] Prece J., *Online communities: Designing usability and supporting sociability*, Baffins Lane, Chichester, England, John Wiley.& Sons, New York 2000.
- [15] Ranieri M., *E-learning: modelli e strategie didattiche*, Erickson, Trento 2005.
- [16] Strijbos, J. W., Martens, R. L., Group-based learning: Dynamic interaction in groups, in *European perspectives on computer-supported collaborative learning: proceedings of the 1st European conference on computer-supported collaborative learning*, a cura di P. Dillenbourg, A. Eurelings,, K. Hakkarainen, pp. 569-576, Maastricht University, Maastricht 2001.
- [17] Wellman B.(a cura di), *Networks in the global village: Life in contemporary communities*, Boulder, Westview 1999.

I LAUREATI TRA SISTEMA UNIVERSITARIO E SISTEMA PRODUTTIVO IN TOSCANA

SARA MELE

Istituto Regionale Programmazione Economica della Toscana

ALESSANDRO PETRETTO

Dipartimento di Scienze Economiche, Università di Firenze

Le politiche di potenziamento del capitale umano sono spesso invocate come la più importante medicina per il rilancio del sistema socio economico nazionale e regionale.

Si ritiene da più parti che l'Italia abbia finora investito relativamente poco nella sua risorsa più preziosa, il proprio capitale umano, e in conseguenza di ciò si sollecita una veloce inversione di tale tendenza. Da qui gli inviti, da parte degli studiosi, a convogliare maggiori risorse verso il sistema scolastico e, in particolare, verso quello universitario. Tutto ciò potrebbe, tuttavia, non bastare: il problema dell'alta qualificazione del capitale umano anche all'interno del nostro sistema economico regionale appare non solo legato all'offerta ma anche, se non soprattutto, alla domanda da parte dell'apparato produttivo. Analizzando i dati inerenti le ultime coorti dei laureati e il loro impiego nel mercato del lavoro, quello che emerge è un forte *mismatch* prima di tutto quantitativo: il sistema produttivo della nostra regione non è in grado di assorbire l'offerta di lavoro proveniente dai laureati che concludono i loro studi all'interno degli atenei toscani e la situazione non migliora molto se ci spostiamo ad un'analisi di livello nazionale. È per questo motivo che il fenomeno che riguarda i laureati toscani è forse più grave della «fuga di cervelli» paventata, dato che una fuga presuppone un cammino che porti ad una qualche meta che offra una condizione migliore rispetto a quella che si è abbandonato: in questo caso il problema appare proprio quello di assenza di lodi migliori per i laureati toscani all'interno del sistema produttivo regionale e nazionale, il che porta inevitabilmente alla rinuncia alla «fuga» e ad un impiego sottodimensionato rispetto alle potenzialità del titolo di studio posseduto.

In questa nota analizzeremo alcuni dati a sostegno di questa breve analisi, a partire dai «numeri» del sistema universitario regionale.

1. Il sistema universitario regionale attrae studenti sia da dentro che da fuori regione

Nell'anno accademico 2003/2004 gli iscritti negli atenei toscani erano 132.630, di cui il 56% donne.

Sul totale degli iscritti, il 72% sono toscani, mentre il restante 28% proviene da fuori regione: in particolare il 25.5% da altre regioni italiane e il 2.5% da paesi stranieri.

I dati relativi alla provenienza dei laureati riflettono in larga misura la composizione degli iscritti (Tab. 1).

Tabella 1
ISCRITTI E LAUREATI NEGLI ATENEI TOSCANI PER RESIDENZA
A.A. 2003/2004

	Isritti			Laureati		
	Maschi	Femmine	TOTALE	Maschi	Femmine	TOTALE
Toscani	71,1	72,7	72,0	69,0	74,0	71,8
Italiani non toscani	26,6	24,6	25,5	29,7	24,4	26,7
Stranieri	2,2	2,8	2,5	1,3	1,6	1,5
TOTALE ISCRITTI	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Fonte: elaborazioni IRPET su dati MIUR

La regione dalla quale proviene la maggior parte degli studenti è la Calabria che è rappresentata dal 14% del totale degli iscritti italiani non toscani, seguono la Puglia (12,5), la Liguria (11,5) e la Sicilia (11,2). Le regioni meno rappresentate sono il Trentino Alto Adige, il Friuli Venezia Giulia e la Valle d'Aosta. Analoga è la distribuzione dei laureati per provenienza, all'interno della quale gli studenti pugliesi superano i colleghi calabresi (Tab. 2).

Tabella 2
ISCRITTI E LAUREATI NEGLI ATENEI TOSCANI: REGIONI DI ORIGINE
A.A. 2003/2004

	Isritti			Laureati		
	Maschi	Femmine	TOTALE	Maschi	Femmine	TOTALE
Calabria	13,2	14,5	13,9	11,7	13,4	12,6
Puglia	12,8	12,3	12,5	14,9	13,7	14,2
Liguria	10,3	12,7	11,5	9,4	11,3	10,4
Sicilia	12,7	9,8	11,2	13,1	10,8	11,9
Campania	8,3	7,9	8,1	6,7	6,2	6,5
Lazio	7,9	6,9	7,4	9,6	7,9	8,7
Sardegna	7,1	6,4	6,7	6,0	5,7	5,8
Basilicata	5,6	6,1	5,9	4,9	5,9	5,4
Emilia Romagna	4,3	4,6	4,5	4,4	4,6	4,5
Umbria	3,5	4,5	4,0	3,9	5,3	4,6
Marche	2,9	2,7	2,8	2,3	2,5	2,4
Lombardia	2,4	3,1	2,8	2,6	3,3	2,9
Abruzzo	2,9	2,6	2,7	3,0	3,3	3,2
Veneto	1,6	1,5	1,6	1,7	1,7	1,7
Piemonte	1,4	1,6	1,5	2,0	1,6	1,8
Molise	1,6	1,3	1,4	1,9	1,2	1,5
Trentino A.A.	0,9	1,0	0,9	1,0	0,9	0,9
Friuli V.G.	0,5	0,5	0,5	0,8	0,5	0,6
Valle d'Aosta	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1

Fonte: elaborazioni IRPET su dati MIUR

Quanto alla provenienza dei non italiani, l'area maggiormente rappresentata è quella europea extracomunitaria (Tab. 3). In questa categoria preponderante è la presenza di studenti provenienti dall'Albania, che frequentemente abbandonano gli studi determinando con ciò una caduta del tasso di laurea degli studenti europei extracomunitari.

Rilevante è il dato secondo il quale più di un terzo dei laureati di nazionalità non

italiana proviene da un paese dell'Unione Europea. Questi valori, in linea con i dati medi nazionali, testimoniano una certa capacità attrattiva degli atenei toscani nei riguardi di studenti provenienti da paesi «forti» in quanto ad offerta accademica.

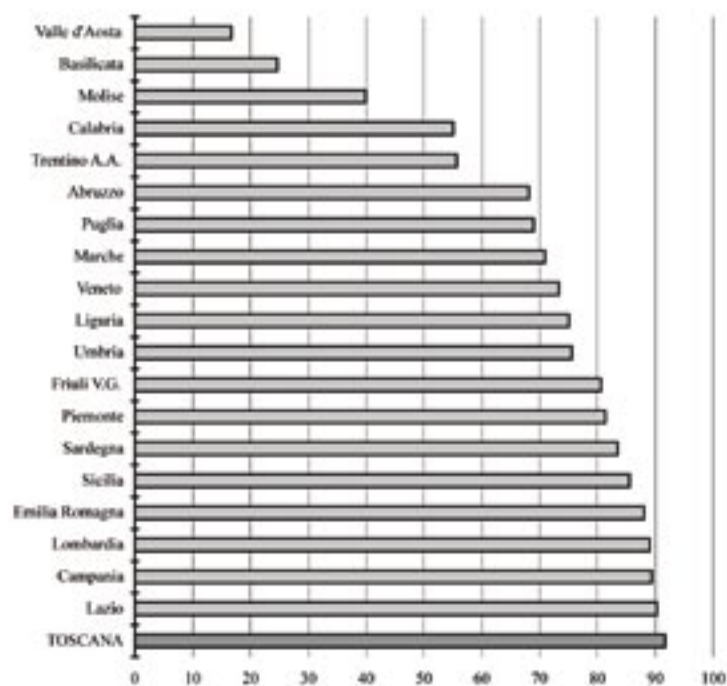
Analizzando gli studenti universitari in Italia per residenza, appare interessante notare come la Toscana sia la regione con il più alto tasso di «fidelizzazione»: fatto 100 il complesso degli studenti universitari italiani di provenienza toscana ben il 92% studia in Toscana, contro il 90% circa di Lazio, Campania e Lombardia, l'88% dell'Emilia Romagna, fino ad arrivare al 25% della Basilicata e al 17% della Valle d'Aosta, a fronte di un dato medio pari al 79% circa¹ (Graf. 4).

Tabella 3
ISCRITTI E LAUREATI STRANIERI NEGLI ATENEI TOSCANI: PAESI DI ORIGINE
A.A. 2003/2004

	Iscritti			Laureati		
	Maschi	Femmine	TOTALE	Maschi	Femmine	TOTALE
Europa UE	44,9	52,4	49,4	27,6	45,5	38,6
Europa non UE	26,3	26,3	26,3	36,2	31,1	33,1
Asia	11,6	8,7	9,9	12,4	7,8	9,6
Africa	13,3	6,0	8,9	21,0	6,6	12,1
Sud America	3,0	5,2	4,3	1,9	9,0	6,3
Nord America	0,9	1,3	1,2	1,0	0,0	0,4
TOTALE	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Fonte: elaborazioni IRPET su dati MIUR

Grafico 4
LA PERMANENZA DEGLI STUDENTI NELLA PROPRIA REGIONE DI ORIGINE
Valori %, A.A. 2003/2004



Fonte: elaborazioni IRPET su dati MIUR

Tali dati dipendono in modo cruciale dall'offerta didattica e quindi dalla dimensione dei vari sistemi universitari regionali: maggiore la varietà dell'offerta, minore la necessità di andare a studiare fuori regione.

Ciò fornisce quindi un'indicazione della capacità di radicamento da parte dei sistemi universitari regionali nei confronti degli studenti provenienti dalla regione stessa. Cosa è invece possibile affermare circa la capacità di attrazione nei confronti degli studenti provenienti da fuori regione?

Il sistema universitario regionale con la migliore capacità di polarizzazione di studenti «stranieri» (vale a dire con provenienza esterna alla regione) è l'Emilia Romagna, nei cui atenei la presenza di non regionali è solo leggermente inferiore alla presenza di studenti provenienti dalla regione (47,5% contro 52,5%). Segue l'Umbria, dove i non umbri sono quasi il 45% del totale degli iscritti negli atenei della regione (Tab. 5).

Come visto in precedenza, in Toscana i non toscani sono il 28% del totale iscritti; un valore questo superiore al dato medio nazionale pari al 21%.

È possibile, quindi, affermare che la nostra regione, con l'offerta formativa proposta tramite i tre atenei, distribuiti su 12 sedi didattiche, nell'ambito di complessive 31 facoltà e 188 corsi di laurea, attira una buona percentuale di studenti «autoctoni», soprattutto, e stranieri. Complessivamente la Toscana accoglie il 7,3% degli studenti iscritti alle università italiane, venendo dietro solo a Lombardia, Lazio, Campania, Emilia Romagna e Sicilia.

Il sistema universitario toscano funge quindi come un buon «attrattore di cervelli», in quanto capace di richiamare una considerevole quota di studenti iscritti negli atenei nazionali. È altrettanto in grado il sistema produttivo regionale di impiegare utilmente la forza lavoro formata negli atenei toscani?

Tabella 5
LA CAPACITÀ ATTRATTIVA DEI SISTEMI UNIVERSITARI REGIONALI
Valori %, A.A. 2003/2004

	Iscritti della regione	Iscritti da fuori regione	Totale iscritti	Iscritti nella regione sul totale iscritti in Italia
Emilia Romagna	52,5	47,5	100,0	9,0
Umbria	55,2	44,8	100,0	2,1
Marche	58,4	41,6	100,0	3,2
Molise	59,8	40,2	100,0	0,5
Friuli V.G.	64,0	36,0	100,0	2,2
Trentino A.A.	67,2	32,8	100,0	0,9
Abruzzo	70,6	29,4	100,0	2,9
TOSCANA	72,0	28,0	100,0	7,3
Lazio	76,1	23,9	100,0	13,4
Lombardia	78,5	21,5	100,0	13,4
Veneto	79,1	20,9	100,0	5,8
Basilicata	81,7	18,3	100,0	0,4
Liguria	84,6	15,4	100,0	2,0
Piemonte	85,6	14,4	100,0	5,1
Sicilia	91,7	8,3	100,0	8,7
Campania	92,9	7,1	100,0	11,5
Puglia	93,5	6,5	100,0	6,0
Valle d'Aosta	94,6	5,4	100,0	0,0
Calabria	95,7	4,3	100,0	2,9
Sardegna	99,3	0,7	100,0	2,6
ISCRITTI IN ITALIA	78,8	21,2	100,0	100,0

Fonte: elaborazioni IRPET su dati MIUR

Se passiamo ad analizzare i dati sui laureati per sistema universitario regionale, il quadro complessivo, senza sorprese, in gran parte riflette quanto visto per gli iscritti.

Relativamente alla Toscana, in essa si laurea il 7% del complesso dei laureati negli

atenei italiani. Occorre osservare come i laureati provenienti dalla Toscana siano il 5,6% del complesso dei laureati in Italia (Tab. 6).

Tabella 6
I LAUREATI NEI SISTEMI UNIVERSITARI REGIONALI
Valori %, A.A. 2003/2004

	Totale laureati nelle università della regione		Totale laureati per residenza	
	Valori assoluti	Valori %	Valori assoluti	Valori %
Piemonte	16.388	6,1	17.445	6,5
Valle d'Aosta	30	0,0	559	0,2
Lombardia	46.966	17,5	40.657	15,1
Trentino A.A.	2.390	0,9	3.497	1,3
Veneto	20.517	7,6	21.496	8,0
Friuli V.G.	7.346	2,7	5.853	2,2
Liguria	5.581	2,1	6.558	2,4
Emilia Romagna	26.736	9,9	16.684	6,2
TOSCANA	18.815	7,0	14.999	5,6
Marche	7.985	3,0	7.189	2,7
Umbria	5.230	1,9	4.302	1,6
Lazio	34.141	12,7	27.810	10,3
Abruzzo	8.670	3,2	7.795	2,9
Molise	1.121	0,4	1.970	0,7
Campania	23.356	8,7	25.733	9,6
Puglia	12.800	4,8	20.275	7,5
Basilicata	751	0,3	3.166	1,2
Calabria	6.187	2,3	11.661	4,3
Sicilia	17.255	6,4	19.619	7,3
Sardegna	6.556	2,4	7.850	2,9
Stranieri			3.703	1,4
TOTALI	268.821	100,0	268.821	100,0

Fonte: elaborazioni IRPET su dati MIUR

Il sistema universitario toscano, nel 2004, ha quindi portato ben 18,815 persone a concludere il loro percorso di studi con la laurea universitaria (il 57% di questi sono donne), di cui il 70% con residenza in Toscana ai quali si aggiungono altri 1,482 toscani che si laureano fuori regione. Complessivamente i toscani laureati nel 2004 sono, quindi, 15,000. Quanti di questi, o del più alto numero di laureati in Toscana, trovano un impiego nel sistema produttivo regionale?

2. Un sistema produttivo con un basso impiego di manodopera istruita

I dati Excelsior del 2005 -che attraverso indagini svolte dalle CCIAA forniscono le previsioni di assunzione per le aziende toscane del settore privato- evidenziano la scarsa domanda di laureati proveniente dal sistema produttivo regionale.

L'indagine, d'altro canto, non tiene conto delle previsioni di assunzione di collaboratori, che recentemente costituiscono una forma di impiego molto diffusa per l'accesso di giovani, anche laureati, al mercato del lavoro.

Un'altra limitazione della fonte Excelsior consiste nel fatto che non viene analizzata la domanda di lavoro proveniente dal settore pubblico, che notoriamente impiega una quota maggiore di soggetti con elevata istruzione rispetto al settore privato, anche se da qualche anno, in virtù del blocco delle assunzioni tuttora operante, il pubblico impiego non offre consistenti possibilità di assorbimento dell'offerta di lavoro di laureati.

Le indagini come Excelsior, volte a valutare la domanda di lavoro delle imprese, non tengono, altresì, conto della possibilità di impiego dei laureati in forma autonoma (tramite attività imprenditoriali o di libera professione), anche se nella fascia di età 25-34 le occupazioni dei laureati di tipo autonomo sono solo poco più di un terzo

delle occupazioni totali. Occorre inoltre tener presente che una parte di coloro che annualmente concludono gli studi universitari non cerca lavoro, a causa di scelte personali o al fine di perfezionare gli studi.

Alla luce di tali elementi, è necessario leggere con cautela i dati provenienti da Excelsior, sapendo che questi forniscono solo una parte degli sbocchi professionali dei laureati. Per il 2004 le previsioni di assunzioni delle imprese toscane erano pari soltanto a 3.180, che rapportati al numero dei laureati dello stesso anno porta ad un «tasso di impiego» nel settore privato toscano di questi soggetti inferiore al 17%. Verificando la consistenza di questi dati per le altre regioni emerge come il fenomeno non sia solo toscano: a fronte di un numero di soggetti che conclude gli studi universitari in Italia pari a circa 269 mila unità nel 2004, per lo stesso anno la domanda di lavoro delle aziende private italiane risulta essere pari ad appena 57 mila. Da ciò emerge, tuttavia, quanto bassa sia la capacità di impiego dei laureati nel sistema produttivo privato toscano anche a fronte di ciò che avviene in sistemi produttivi regionali con cui si è soliti confrontare la nostra regione.

La lettura dell'indicatore «tasso di impiego», infatti, non ci fornisce le concrete chance occupazionali dei laureati in Toscana; esso ci indica, piuttosto, quanta parte dei nuovi laureati (in quanto portatori di una specifica professionalità) è richiesta dal nostro sistema produttivo. Dato ciò appare forse più utile non considerare tale dato in senso assoluto, quanto piuttosto in senso differenziale rispetto al valore che esso assume in sistemi produttivi «forti», caratterizzati da un alto impiego di laureati all'interno del mercato del lavoro: in tale ottica è possibile desumere dalla tabella 7 come il «tasso di impiego» della Toscana sia circa la metà di quello della Lombardia e del Piemonte (che nell'indagine Excelsior è trattato congiuntamente alla Valle d'Aosta) e comunque sensibilmente inferiore a quello del Veneto, del Trentino Alto Adige, della Liguria e dell'Emilia Romagna.

Tabella 7
LAUREATI E DOMANDA DI LAUREATI NEL SETTORE PRIVATO PER REGIONE, 2004
Valori assoluti

	Laureati Val. ass.	Domanda di laureati Val. ass.	«Tasso di impiego» %		Laureati Val. ass.	Domanda di laureati Val. ass.	«Tasso di impiego» %
Piemonte - Valle d'Aosta	16.418	5.160	31,4	Lazio	34.141	8.530	25,0
Lombardia	46.966	15.210	32,4	Abruzzo	8.670	1.070	12,3
Liguria	5.581	1.500	26,9	Molise	1.121	150	13,4
Trentino A.A.	2.390	740	31,0	Campania	23.356	3.110	13,3
Veneto	20.517	4.310	21,0	Puglia	12.800	1.810	14,1
Friuli V.G.	7.346	1.260	17,2	Basilicata	751	120	16,0
Emilia Romagna	26.736	5.460	20,4	Calabria	6.187	930	15,0
TOSCANA	18.815	3.180	16,9	Sicilia	17.255	1.970	11,4
Umbria	5.230	390	7,5	Sardegna	6.556	700	10,7
Marche	7.985	1.460	18,3	ITALIA	268.821	57.060	21,2

Fonte: elaborazioni IRPET su dati EXCELSIOR 2005

La difficoltà di impiego di forza lavoro laureata si manifesta in modo ancora più evidente per la Toscana analizzando i dati relativi alla composizione delle previsioni di assunzione per titolo di studio.

Dalla tabella 8 emerge la bassa richiesta di personale altamente istruito che caratterizza la nostra regione. Per il 2004, fatto 100 il totale di manodopera richiesta, la domanda di laureati è pari all'8% circa, contro una quota doppia di diplomati (16,4%)

e con una percentuale di titolari del titolo dell'obbligo scolastico addirittura pari al 35%.

Con riferimento ai sistemi produttivi delle altre regioni, a fronte di una quota di assunzioni previste di laureati dell'8% in Toscana, si registrano un 14% per il Lazio, un 13% per la Lombardia e scarti significativi anche con Piemonte ed Emilia Romagna e in generale un valore medio nazionale del 9% circa. Sempre a partire dalle informazioni raccolte presso le imprese tramite l'indagine Excelsior, emerge che la domanda di laureati si concentra su tre sole categorie: quelle con competenze tecnico-ingegneristiche, quella con competenze economiche, ed infine quella con competenze scientifiche. Una ulteriore conferma dello scarso rilievo assegnato all'istruzione formale da parte del sistema produttivo privato toscano emerge dalla composizione della domanda di lavoro per specifici profili professionali, che si rivolge quasi esclusivamente a basse qualifiche.

Tabella 8
PREVISIONI DI ASSUNZIONI PER TITOLO DI STUDIO PER REGIONE, 2004

	Laurea	Istruzione professionale e tecnica (3-4 anni)	Qualifica professionale regionale	Nessun titolo (scuola dell'obbligo)	TOTALE
Lazio	14,0	10,0	6,0	36,2	100,0
Lombardia	12,8	13,4	4,5	34,0	100,0
Piemonte - Valle d'Aosta	10,0	16,1	6,3	35,5	100,0
Emilia Romagna	9,0	13,9	7,4	35,1	100,0
Marche	8,6	14,0	7,1	38,9	100,0
Liguria	8,5	14,7	5,6	37,0	100,0
TOSCANA	7,6	16,4	7,8	34,6	100,0
Friuli V.G.	7,4	19,7	9,2	32,9	100,0
Veneto	7,3	15,0	7,1	36,1	100,0
Abruzzo	6,5	12,9	5,0	46,1	100,0
Campania	6,5	11,5	7,1	38,7	100,0
Calabria	6,0	13,1	6,7	44,9	100,0
Puglia	5,7	14,4	6,2	42,5	100,0
Sicilia	5,6	11,3	7,3	43,2	100,0
Molise	4,4	13,4	5,5	46,2	100,0
Trentino A.A.	4,1	13,7	9,0	43,0	100,0
Sardegna	3,9	12,3	6,2	43,4	100,0
Umbria	3,3	13,8	5,3	41,9	100,0
Basilicata	1,9	17,1	7,6	43,7	100,0
ITALIA	8,8	13,7	6,4	37,5	100,0

Fonte: elaborazioni IRPET su dati EXCELSIOR 2005

Le competenze richieste dal mondo produttivo toscano non sono quindi specialistiche. Tutto ciò a testimonianza della struttura produttiva toscana, caratterizzata dalla presenza di piccole e piccolissime imprese incapaci di assorbire manodopera altamente istruita. Excelsior ci fornisce, quindi, informazioni importanti circa le esigenze della domanda di lavoro rivolta *specificatamente* ai laureati.

Come evidenziato in precedenza, tuttavia, i dati sin qui presentati offrono solo uno spaccato delle prospettive occupazionali dei nuovi laureati in Toscana. In virtù di ciò passiamo ad analizzare i dati provenienti dall'Indagine sulle Forze di Lavoro che ci consente di stabilire tassi di occupazione e disoccupazione dei laureati in Toscana. Occorre, ciò nondimeno, mettere in evidenza alcuni limiti di questa base informativa ai fini dell'analisi che stiamo conducendo.

In primo luogo i dati sulle Forze di Lavoro per la Toscana ci forniscono informazioni sui soggetti (occupati e disoccupati) che operano sul mercato del lavoro toscano indipendentemente dal luogo in cui hanno compiuto i loro studi. Inoltre,

la lettura dei tassi di occupazione e disoccupazione non fornisce informazioni circa occupazione del soggetto e congruità rispetto al titolo di studio posseduto, per cui un alto tasso di occupazione per i soggetti laureati potrebbe non coincidere con una «buona» occupazione di tali soggetti, il cui titolo di studio potrebbe quindi risultare sovradimensionato rispetto all'occupazione svolta.

Per avere informazioni accurate circa la transizione scuola-lavoro dei laureati in Toscana è necessario svolgere indagini longitudinali che seguano le coorti di laureati e che tengano conto di tutte le informazioni rilevanti: luogo di studio e caratteristiche degli studi effettuati, luogo di lavoro e sue caratteristiche principali². In mancanza di tale base informativa analizziamo le performance generali dei laureati nel mercato del lavoro Toscano, prescindendo dal periodo di conclusione degli studi universitari.

3. Le difficoltà dei laureati nel mercato del lavoro toscano

I dati Istat sulle forze di lavoro mostrano che in Toscana i giovani laureati sperimentano nella fase iniziale del percorso professionale difficoltà di accesso al lavoro maggiori di coloro che hanno assolto al solo obbligo scolastico.

Nella nostra regione, i tassi di disoccupazione per i laureati tra i 25 ei 29 anni, quindi all'ingresso nel mondo del lavoro, sono pari al 17%, mentre per i soggetti della stessa classe di età in possesso di licenza media inferiore e di licenza media superiore sono pari, rispettivamente, a 7,3% e 7,8% (Tab. 9).

Tabella 9
TASSI DI DISOCCUPAZIONE PER TITOLO DI STUDIO E FASCE DI ETÀ. TOSCANA E ITALIA
Media 2001-2003

		15-19	20-24	25-29	30-34	35-39	40-44	45-49
TOSCANA	Obbligo	16,8	11,1	7,3	5,4	4,3	4,5	3,3
	Diploma	37,5	16,8	7,8	3,9	2,9	2,3	1,8
	Laurea		23,4	16,7	5,9	3,6	1,5	0,6
	TOTALE	21,7	14,8	8,6	4,8	3,7	3,3	2,4
ITALIA	Obbligo	33,9	24,8	15,5	11,4	9,2	7,7	6,3
	Diploma	38,8	26,2	13,4	7,5	5,1	3,8	2,5
	Laurea		25,8	20,6	8,6	3,6	1,7	0,8
	TOTALE	35,2	25,6	15,0	9,2	6,8	5,3	4,1

Fonte: elaborazioni IRPET su dati ISTAT

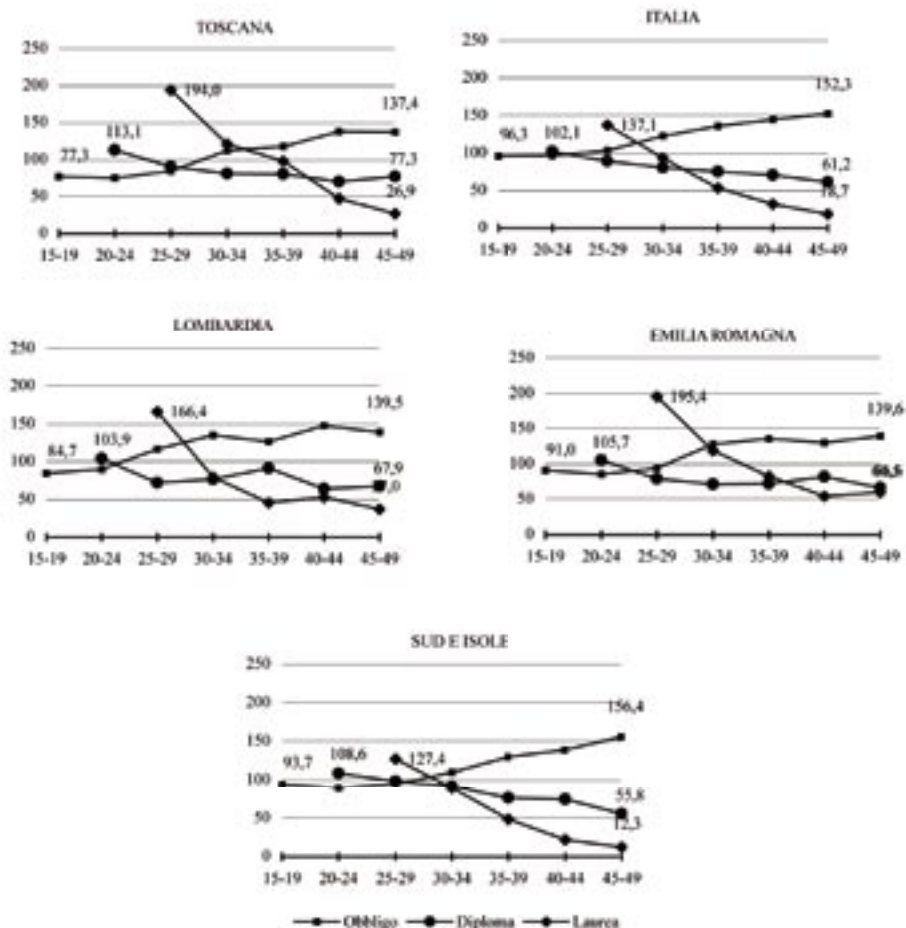
Ancora una volta, il confronto con le altre regioni pone i laureati che cercano lavoro in Toscana in una posizione di svantaggio. Per la stessa fascia di età, la 25-29, il tasso di disoccupazione dei laureati in Lombardia è la metà di quello toscano, è del 13% circa in Veneto e del 10% in Emilia Romagna. Il dato nazionale, pari al 20,6%, sconta un tasso di disoccupazione nel sud Italia vertiginoso, pari al 40%.

Lo svantaggio dei laureati all'ingresso nel mercato del lavoro emerge in modo evidente se analizziamo le differenze fra tasso medio di disoccupazione e quello per titolo di studio ed età (Graf. 10). Per la fascia di età 25-29, quella di ingresso dei laureati, il differenziale tra tasso di disoccupazione medio e tasso di disoccupazione dei laureati è del 37% a livello medio nazionale, del 27% nel meridione, del 66% in Lombardia e del 94% in Toscana; mentre il differenziale tra il tasso medio e quello dei

diplomati all'ingresso nel mercato del lavoro, vale a dire nella fascia 19-24, è del 2% a livello nazionale, del 9% nel meridione, del 4% in Lombardia e del 13% in Toscana.

Grafico 10

TASSO DI DISOCCUPAZIONE PER TITOLO DI STUDIO E CLASSE DI ETÀ SU TASSO DI DISOCCUPAZIONE MEDIO PER CLASSE DI ETÀ, 2001/2003



Fonte: elaborazioni IRPIT su dati ISTAT

Occorre, tuttavia, osservare che, come noto, l'investimento formativo ha rendimenti crescenti nel corso della vita professionale. Ad esempio, tra i 35 e 49 anni la disoccupazione colpisce prevalentemente le persone dotate della sola istruzione dell'obbligo, mentre l'infruttuosa ricerca di lavoro da parte dei laureati si abbassa rapidamente raggiungendo livelli frizionali: in Toscana il tasso di disoccupazione dei laureati è 3,6% per la classe 35-39, 1,5% per la 40-44 e solo 0,6% per la 45-49.

Sempre con riferimento alle performance dei laureati nel mercato del lavoro toscano, informazioni rilevanti sono quelle sulla tipologia di occupazione: la lettura di questi dati (presentati in tabella 11) ci porta a ridimensionare parzialmente l'allarme lanciato in precedenza, sulla base dei dati Excelsior, circa le prospettive occupazionali dei laureati

nella nostra regione. Se è vero che una parte consistente dei laureati ha come prima occupazione un lavoro alle dipendenze, che per quanto riguarda il settore privato offre opportunità «mirate» al titolo di studio solo per pochi, più di un terzo dei laureati ha un primo impiego non dipendente. In particolare, il 27% tra i 25 e i 34 anni e quasi il 30% tra i 35 e i 44 anni hanno un'occupazione di tipo autonomo (imprenditoriale o di libera professione), mentre ben il 10% nella prima fascia di ingresso trova impiego tramite contratti di collaborazione, che negli ultimi anni costituiscono sempre più la modalità preferenziale di accesso all'impiego.

Tabella 11
LAUREATI OCCUPATI PER FASCE D'ETÀ. TOSCANA, 2004

	25-34	35-44
Dipendente	62,4	66,7
Collaboratore	10,4	3,9
Autonomo	27,2	29,4
TOTALE	100,0	100,0

Fonte: elaborazioni IRPET su dati ISTAT

Tuttavia, occorre osservare che mentre l'impiego autonomo quasi sempre dipende da una scelta dell'individuo, l'impiego in forma di collaborazione, come testimoniato anche da recenti studi Irpet per la Toscana, raramente corrisponde ad una scelta progettuale del lavoratore, ma piuttosto all'impossibilità di trovare impiego con altre modalità contrattuali.

4. Come superare il *mismatch*?

In conclusione, ci sono numerose evidenze della distanza esistente fra le competenze richieste dal sistema produttivo toscano e quelle offerte dai giovani laureati in cerca di lavoro. Il problema può essere visto sotto due diverse angolazioni.

Da un lato è possibile imputare le colpe del *mismatch* alle istituzioni scolastiche di base e all'università. Queste ultime, si argomenta, forniscono conoscenze non utilizzabili sul mercato, sfornando così figure di diplomati e laureati di cui il sistema economico non avverte la necessità. Ciò che conta, prosegue questa argomentazione, è invece il sapere contestuale che può essere messo a frutto nella produzione e che in quello stesso ambito si qualifica. Discende da questa lettura -come soluzione al citato *mismatch*- l'esigenza di ripensare i contenuti (più sapere contestuale che formale), le cadenze (la formazione continua lungo l'intero arco di vita) e le modalità di rapporti tra i diversi sistemi cognitivi: la scuola e l'università, la formazione professionale e il sistema delle imprese.

Tale lettura, tuttavia, appare almeno in parte discutibile. Essa, insieme ad altre motivazioni, costituisce il fondamento della forte spinta impressa recentemente dalla riforma del così detto 3+2, all'avvicinamento delle conoscenze impartite dal sistema universitario verso le esigenze delle aziende. È opinione largamente diffusa, non solo nell'ambiente accademico, che tale specializzazione e «contestualizzazione» degli studi abbia portato ad un netto scadimento della preparazione di base dei laureati.

Tale debolezza nei così detti «fondamentali» induce a dubitare fortemente anche delle competenze specifiche acquisite. Il famoso insegnamento del latino a scuola fornisce utili indicazioni in tal senso: è pur vero che nella vita la conoscenza del latino non è immediatamente spendibile, ma i buoni vecchi professori da sempre sostengono che imparare il latino costituisca un buon viatico per imparare bene l'italiano, la matematica e quindi tutte le altre materie; al contrario, gli studenti che manifestano un'insufficiente conoscenza del latino difficilmente conseguono risultati brillanti negli altri insegnamenti.

Il fatto è che l'università dovrebbe cercare di fare meglio ciò che è naturalmente deputata a fare: a livello nazionale e internazionale gli atenei che conseguono i rating migliori sono quelli che forniscono agli studenti solide basi non specialistiche.

Il nostro convincimento è che il sistema universitario non debba essere l'unico attore deputato a somministrare conoscenze contestuali e, soprattutto, che tale tipo di insegnamenti non diventi preponderante nell'offerta formativa accademica, sebbene essa non debba essere ridotta a contenuti puramente formali. Importante in tale contesto è il ruolo della formazione professionale di livello superiore e in generale delle strutture e delle occasioni di formazione durante tutto l'arco della vita, il tanto invocato *life-long learning*.

Tuttavia, risolvere i nodi del sistema formativo potrebbe non bastare e con questo veniamo alla seconda angolazione secondo cui leggere il problema del *mismatch* prima citato. Un altro elemento fondamentale di tale *mismatch* risiede, infatti, nelle caratteristiche del sistema produttivo regionale. Quest'ultimo appare concentrato su settori di mercato a bassa innovazione, che necessitano non tanto dell'acquisizione di nuove conoscenze (il sapere formale), quanto della capacità di saper sfruttare quelle già esistenti (il sapere codificato). Il sistema produttivo toscano, caratterizzato dalla presenza di piccole e piccolissime imprese incapaci di assorbire manodopera altamente istruita, pone la nostra regione un po' in ritardo rispetto alle regioni più sviluppate del paese circa l'impiego di capitale umano qualificato.

Analizzando, infatti, i dati nazionali relativi all'incidenza dei laureati sul totale degli occupati, emerge un differenziale negativo della Toscana di mezzo punto percentuale: a fronte di un'incidenza per l'Italia del 12,7%, in Toscana la quota di laureati sul totale degli occupati è pari al 12,2% (Tab. 12).

Tabella 12
INCIDENZA DEI LAUREATI SUL TOTALE OCCUPATI PER SETTORE
Media 2001-2003

	Agricoltura	Industria	Commercio	Turismo	Servizi	TOTALE
Piemonte e Valle d'Aosta	3,1	5,0	5,0	2,7	21,0	11,2
Lombardia	4,5	5,9	5,8	3,9	23,9	12,8
Trentino A. A.	2,3	3,8	4,1	1,4	19,9	10,0
Veneto	2,3	4,1	5,1	2,9	21,3	10,2
Friuli V.G.	1,8	4,5	5,7	1,7	21,0	11,6
Liguria	1,4	8,3	5,2	3,0	22,5	14,1
Emilia Romagna	3,6	5,9	5,9	1,9	24,6	12,8
TOSCANA	4,4	4,0	5,4	4,3	23,3	12,2
Umbria	6,7	4,3	5,2	4,3	23,7	12,7
Marche	1,8	3,7	7,1	2,5	25,4	11,9
Lazio	2,8	7,3	4,3	1,9	24,4	16,2
Abruzzo	3,6	4,2	5,4	2,6	23,1	12,2
Molise	1,7	3,8	4,8	3,2	23,1	12,0
Campania	1,0	4,2	4,8	1,6	23,2	13,3
Puglia	1,0	3,3	3,9	2,9	24,5	12,1
Basilicata	2,3	3,1	3,7	1,6	21,1	10,1
Calabria	1,5	4,3	4,1	3,2	25,0	13,8
Sicilia	1,7	3,4	3,7	2,0	24,7	13,8
Sardegna	2,3	3,3	3,8	1,9	21,0	11,4
ITALIA	2,4	4,9	5,0	2,7	23,3	12,7

Fonte: elaborazioni IRPET su dati ISTAT

Scendendo al dettaglio settoriale, risulta evidente come lo scarto sia del tutto imputabile all'industria, in cui la quota di laureati è il 4%, contro il 5% della media nazionale.

Eccettuato il terziario, per il quale i valori toscani sono pienamente allineati a quelli medi italiani, nell'agricoltura, nel commercio e nel turismo l'incidenza dei laureati sul complesso degli occupati è in Toscana superiore ai dati medi nazionali.

Con una certa approssimazione, è possibile stimare che se la Toscana avesse una struttura produttiva simile a quella della Lombardia, l'industria assorbirebbe un numero addizionale di laureati rispetto alla struttura attuale di circa 4.200 unità, che tuttavia considerando un tempo di turnover di circa trenta anni, porterebbe ad un impiego di 140 laureati in più l'anno: valori, questi, che non inciderebbero molto sull'attuale assetto produttivo regionale.

Tuttavia, dando uno sguardo al futuro, i recenti scenari prospettati per la nostra regione indicano un aumento della terziarizzazione del sistema produttivo, con crescite elevate per le produzioni industriali ad alta intensità di lavoro qualificato (farmaceutica, chimica), a danno delle produzioni tradizionali.

In conclusione, è necessario, quindi, che si creino le condizioni per cui l'accresciuta offerta di lavoro qualificato trovi un adeguato sbocco nella domanda del sistema produttivo, attraverso politiche orizzontali che favoriscano gli investimenti in ricerca e sviluppo e la formazione continua. Solo così si supererà il circolo vizioso per cui l'insufficienza di manodopera qualificata perpetua un modello di specializzazione obsoleto che a sua volta scoraggia l'investimento in capitale umano.

Quanto visto mette in luce i difetti sia del sistema che «produce» forza lavoro istruita, il sistema universitario e formativo in generale, sia del sistema che «utilizza» forza lavoro istruita, il sistema produttivo. Da un lato emerge, infatti, la debolezza del sistema universitario nel fornire solide conoscenze di base su cui impiantare conoscenze

specialistiche in merito alle quali occorre ripensare anche alla luce di una più fruttuosa interazione fra formazione professionale superiore e sistema produttivo; dall'altro, la modesta presenza di imprese, soprattutto, e settori, in misura minore (anche se per poter affermare con precisione una simile tesi occorrono studi accurati sul sistema produttivo regionale), in grado di attivare ed utilizzare conoscenze altamente qualificate.

In entrambe le direzioni le istituzioni regionali e locali possono giocare un ruolo rilevante. Solo una società ad elevato contenuto di capitale umano, è infatti in grado di svilupparsi -non solo in termini strettamente economici- e di fronteggiare le sfide poste dalla competizione globale.

NOTE

¹ Da questi calcoli sono esclusi gli studenti italiani che studiano all'estero.

² L'indagine che più si avvicina a tali standard è quella realizzata dal consorzio AlmaLaurea (che tuttavia esclude i laureati dell'ateneo di Pisa).

START UP INNOVATIVE E PROBLEMI DI FINANZIAMENTO

ADA CARLESI

Dipartimento di economia aziendale 'E. Gianni', Università di Pisa

1. Nuova impresa e innovazione

Ormai da diversi anni si è preso coscienza, sia a livello italiano che europeo, della necessità di una forte innovazione dei sistemi produttivi, innovazione che passa anche in larga misura dalla nascita di nuove imprese innovative, per cercare, da un lato, di colmare il *gap* che ci separa da altre economie sviluppate, quali il Giappone e gli USA, dall'altro di soffrire meno la concorrenza dei nuovi paesi emergenti.

C'è a tale riguardo da considerare che, nonostante alcuni paesi europei presentino una dinamica nascita di nuove imprese-cessazioni abbastanza simile a quella presente negli USA, nel caso europeo sembra essere presente un deciso 'minor dinamismo imprenditoriale' che può essere chiaramente individuato considerando due aspetti in particolare:

1. le nuove imprese statunitensi nascono piccole per una sorta di test del mercato e poi si espandono molto rapidamente¹
2. nel caso europeo molti progetti di nuova imprenditorialità non riescono neanche ad arrivare al test di mercato in quanto la loro attuabilità è messa in dubbio prima di essere verificata in tale sede.

Risulta in effetti profondamente diverso tra Europa e Nord-America l'atteggiamento del sistema economico e sociale verso un eventuale fallimento delle iniziative: secondo una ricerca di Eurobarometro, poco meno del 50% dei cittadini europei ritiene che non dovrebbe essere avviata un'impresa se è presente un rischio di fallimento dell'iniziativa, contro un 25% che ha la stessa convinzione negli USA: è logico dedurre le conseguenze di tale atteggiamento sulle possibilità di nascita di nuove imprese innovative.

Per quanto concerne più in particolare la situazione italiana, sembra essere presente una significativa propensione alla nascita di imprese², anche se risulta abbastanza contenuto il *trend* di sviluppo negli anni immediatamente successivi alla nascita. In effetti, il gruppo delle imprese 'self-employment', rappresentato da imprese mono-cellulari alla nascita tende, secondo i dati forniti dall'Osservatorio Unioncamere, a rimanere senza dipendenti anche ad un anno dalla nascita e rappresenta, quantitativamente, ben il 73% di tutte le nuove imprese nate nel primo anno di osservazione, che è il 1998. Nettamente staccato da questo primo aggregato, come importanza sul totale, è il gruppo delle cosiddette 'gazzelle' (11% del totale delle imprese nate) che è l'unico a far registrare

incrementi occupazionali abbastanza significativi già alla fine del primo anno di attività; esiste poi un segmento di imprese 'stabili' per quanto concerne l'occupazione assorbita (10% circa del totale costituite in larga maggioranza da micro start-up con 2-3 addetti e da un 2% di imprese che già nascono strutturate, che vengono da Unioncamere definite 'robuste') ed un ultimo segmento (i 'gamberi', pari a circa il 6% del totale) che mostrano già, alla fine del primo anno di attività, dei segnali di involuzione.

Per quanto concerne le possibilità che queste nuove imprese hanno di contribuire all'innovazione del sistema, al di là della considerazione dei settori in cui esse tendono a nascere e che sono in primis rappresentati dal commercio, dall'agricoltura, caccia e silvicoltura e dal settore delle costruzioni, l'indagine sopra indicata fa notare come l'andamento del primo anno di vita condizioni pesantemente le strategie successivamente messe in atto dalle imprese, per cui strategie aggressive di innovazione del prodotto/servizio offerto sono messe di solito in atto solo dalle tipologie che non devono preoccuparsi di 'sopravvivere', e quindi da una percentuale piuttosto limitata delle nuove imprese, riconducibile teoricamente al 13% circa del totale (11% delle 'gazzelle' e 2% delle 'robuste').

2. L'intensità del vincolo finanziario alla nascita di imprese innovative

Nel settore delle nuove imprese innovative, il vincolo finanziario³, inteso come impossibilità di reperire i finanziamenti necessari nella quantità e nella qualità necessarie, ha poi una importanza relevantissima: secondo i risultati di un'indagine Eurobarometro sugli ostacoli alla costituzione di un'impresa in ambito europeo, esso rappresenta in effetti il vincolo più rilevante, con una percentuale di intervistati che l'hanno indicato come ostacolo principale pari al 76% del totale. Se osserviamo al riguardo i dati disaggregati per paese ed effettuiamo un confronto tra i risultati dell'indagine svolta nel 2001 e quella del 2002, ci rendiamo conto che le situazioni sono abbastanza differenziate:

1. in primo luogo si può osservare che, a fronte di una situazione media a livello dell'Europa al 2002, che vede il vincolo finanziario considerato come il fattore di ostacolo più importante alla nascita dell'impresa da una percentuale di intervistati pari al 76%, alcuni paesi si distinguono per un valore della percentuale decisamente più elevato, in particolare la Grecia e l'Italia con percentuali rispettivamente pari all'89 ed all'88%, contro altri paesi, quali l'Olanda, la Finlandia ed il Regno Unito che si caratterizzano per importanza dello specifico vincolo decisamente minori (58%, 62% e 63% rispettivamente);
2. il confronto 2001-2002, evidenzia che i singoli paesi si sono mossi evidentemente in modo differenziato per cercare di contenere l'importanza di questo vincolo che risulta nettamente in diminuzione nel Regno Unito (-10 punti percentuali), in Svezia (-8 punti) ed in Spagna (-4 punti), a fronte di un altro gruppo di paesi, nei quali esso risulta invece in crescita, fra cui anche il nostro Paese, che fa registrare un aumento di due punti nella relativa

percentuale di importanza.

In definitiva, se consideriamo insieme il dato dei singoli paesi rispetto alla media e l'andamento dello stesso negli ultimi due anni, la situazione, nel nostro paese, sembra essere particolarmente critica, in quanto ad una percentuale di importanza del vincolo finanziario alla nascita dell'impresa tra le più elevate in assoluto, fa anche riscontro un peggioramento della situazione ad esso relativa nell'ultimo anno considerato.

In effetti, scendendo ad esaminare più specificamente la situazione italiana, per quanto concerne in particolare le nuove imprese ci si rende conto che esse, nella maggior parte dei casi, nascono sottocapitalizzate: secondo i dati forniti dall'Osservatorio Unioncamere, già in precedenza citato, quasi l'80% nasce con un capitale proprio inferiore ai 25.000 euro e tanto più nascono piccole e con capitali limitati, tanto più risultano disinformate in merito alle diverse possibilità di finanziamento potenzialmente esistenti sul mercato.

3. *Venture capitalists* e *business angels*: possibilità e limiti di un loro ruolo portante nel finanziamento delle nuove imprese innovative

Da molti anni ormai si discute, sia a livello mondiale, sia, anche se con un certo ritardo rispetto agli altri, nel nostro Paese, sul ruolo che i cosiddetti investitori istituzionali nel capitale di rischio potrebbero avere nel favorire, tramite la loro opera, l'innovazione dei sistemi economici. La bibliografia, in particolare per quanto concerne uno degli operatori di tale tipo, i *venture capitalists*, è molto vasta ed è ormai ben nota la logica che ispira la loro attività finalizzata essenzialmente all'ottenimento di elevati *capital gains* dagli investimenti effettuati⁴, così come sono noti i vantaggi che la presenza di un *venture capitalist* può generare nell'impresa partecipata⁵ anche al di là di quelli puramente finanziari relativi sia all'apporto di capitale che alla funzione di garanzia verso altre categorie di finanziatori.

A nostro parere, comunque, nel caso italiano il *venture capital*, per le sue caratteristiche operative, a prescindere dalle ben note difficoltà di mercato che ancora esistono per un suo più deciso sviluppo, non può e probabilmente non potrà neanche per gli anni a venire svolgere un ruolo significativo nel finanziamento delle piccole/nuove imprese innovative. In effetti, i dati più recenti a disposizione sull'attività svolta da questa tipologia di operatori, rafforzano decisamente questa convinzione: il *venture capital* in Italia, sembra aver perso interesse sia verso i settori di impresa più innovativi che verso gli investimenti di taglio limitato e caratterizzati da alto livello di rischio, quali quelli nelle prime fasi di vita delle imprese. D'altro lato bisogna ricordare che un investitore professionale formalizzato, quale il *venture capitalist*, va incontro a costi non indifferenti nella fase di valutazione e selezione degli investimenti che rendono problematico il conseguimento di un tasso di rendimento di livello accettabile su investimenti di piccolo taglio, in nuove/piccole imprese, sia tenendo conto dei relativamente limitati *capital gain*, in valore assoluto, che essi di solito, a parte casi emblematici, possono generare, che dei tempi necessariamente lunghi per lo smobilizzo dell'investimento (anche in

questo caso, salvo casi particolari). Da tutto quanto sin qui detto si può desumere che il venture capital, singolarmente inteso, non sembra, al momento attuale, poter operativamente rappresentare uno strumento base nel finanziamento dell'innovazione nelle nuove/piccole imprese, pur avendone le potenzialità.

Negli ultimi anni, accanto agli operatori professionali nel capitale di rischio, quali appunto i venture capitalist, si è creato un mercato informale dominato dai cosiddetti *business angels*⁶. Si deve in primo luogo osservare che tale mercato informale risulta ancora caratterizzato da una elevata opacità di funzionamento, con dati sulla sua reale consistenza che risultano, in larga parte dei casi, frutto di stime. È comunque opinione diffusa che l'ampiezza di tale mercato sia decisamente consistente e, cosa che a noi più direttamente interessa, l'operatore business angel sembra particolarmente interessato ad investimenti in nuove/piccole imprese: ad esempio, negli USA, in cui anche i venture capitalists sono significativamente attivi nel campo del finanziamento delle nuove iniziative imprenditoriali, si valuta che i business angels apportino circa la metà dei fondi reperiti da queste imprese a titolo di capitale di rischio⁷. È stato inoltre stimato che la disponibilità di capitali per questo tipo di investitori sia molto ampia, pari a quasi tre volte l'importo già investito a livello mondiale. In effetti c'è da considerare che i business angels, per la loro matrice, in larga parte di tipo imprenditoriale o manageriale tenderebbe, a differenza del venture capitalist, con matrice più 'bancaria' ad accettare anche un livello di rischio molto elevato in piccole nuove imprese che a suo giudizio possono presentare elevate prospettive di crescita. In effetti la fase di valutazione e selezione delle iniziative da finanziare, specie nel caso di nuove imprese innovative, risulta complicata dalla scarsità o, in molti casi, dall'assenza di informazioni significative in merito alle possibilità di redditività dell'iniziativa, che non sono, spesso, oggetto di 'reticenza' da parte dell'imprenditore, per il semplice fatto che nemmeno egli le possiede. D'altronde, come già è stato fatto notare da alcuni autori, se l'impresa nuova/innovativa potesse dimostrare con dati tangibili la redditività dei suoi investimenti, verrebbe meno la stessa funzione degli operatori istituzionali nel campo del capitale di rischio⁸.

Nel caso italiano, le notizie sui *business angels* e sulla loro operatività sono comunque abbastanza limitate: una prova indiretta della loro rilevanza può essere individuata nel fatto che anche nel nostro Paese si sta progressivamente incrementando, negli anni a noi più vicini, la presenza di network di *business angels*, che hanno come obiettivo quello di rendere più 'trasparente' tale mercato e di agire come una sorta di intermediario per favorire l'incontro tra domanda ed offerta.

I problemi che possiamo individuare, alla luce di quanto sin qui detto, riguardo alla possibilità che *venture capitalist* e *business angel* possano assumere un ruolo portante nel finanziamento delle nuove/piccole imprese innovative, possono essere riassumibili essenzialmente in due:

1. il *venture capital* sembra sempre più allontanarsi dalla nuova impresa

innovativa per ragioni collegate essenzialmente all'incertezza ed al rischio che la caratterizzano ed al fatto che l'investimento medio nelle nuove/piccole imprese risulta in molti casi ben al disotto del taglio minimo di investimento ritenuto necessario per generare rendimenti accettabili, considerando anche i costi associati alle fasi pre-investimento;

2. i *business angels* risultano ancora una sorta di pianeta 'quasi inesplorato', presentando, però, al contempo, per le caratteristiche che li contraddistinguono, delle potenzialità di finanziamento nel comparto di imprese oggetto del presente lavoro, decisamente elevato; il loro ruolo risulta, comunque, abbastanza limitato anche dall'ottica abbastanza 'localistica' che sta alla base delle loro scelte di investimento.

Senza interventi che mutino profondamente l'attuale stato di cose, a nostro giudizio, il ruolo giocato da questi due tipi di operatori nel supporto all'innovazione del nostro sistema economico, tramite l'investimento in nuove/piccole imprese innovative, non potrà cambiare in modo significativo. Non stiamo in questo caso facendo riferimento a interventi, quali quelli di tipo fiscale, che funzionino da incentivazione all'operatività di questi due tipi di operatori che, pur utili a creare migliori situazioni di contesto, non possono a nostro giudizio essere da soli sufficienti per raggiungere l'obiettivo di innovazione del sistema economico, in quanto non vanno ad incidere in misura significativa sul livello di rischio dell'investimento e sull'incertezza che lo caratterizza, pur agendo sulla redditività netta dello stesso. Pensiamo piuttosto che, nel caso di nuove imprese fortemente innovative ambedue i tipi di operatori potrebbero assumere un ruolo decisamente più incisivo nel supporto all'innovazione del sistema economico, se fossero inseriti all'interno di network che, avendo come obiettivo quello di supportare, con competenze diverse, le nuove imprese nella fase più delicata della loro vita, potessero creare, anche tramite la collaborazione tra organismi pubblici e privati, le condizioni per una diminuzione del rischio percepito dell'investimento e per uno start-up più solido delle nuove iniziative.

NOTE

¹ Il maggior dinamismo imprenditoriale presente negli USA, rispetto all'Europa, risulta evidente se consideriamo ad esempio che «...sono stati necessari vent'anni per sostituire un terzo delle 500 imprese elencate da Fortune nel 1960, contro quattro anni per quelle elencate nel 1998. Otto delle 25 maggiori imprese americane di oggi inoltre non esistevano o erano molto piccole nel 1960. In Europa tutte le grandi imprese del 1998 erano già grandi nel 1960.». Si veda al riguardo [1] p. 11.

² Secondo dati forniti dall'Osservatorio Unioncamere, presentati nei primi mesi del 2003, nel nostro paese, sono nate in media, nel periodo 1998-2000, circa 233.000 imprese per anno. I dati si riferiscono alle nascite effettive in quanto i dati di natalità dei Registri Imprese delle CCIAA, sono stati depurati eliminando le trasformazioni di forma giuridica, i subentri e le scissioni. Si veda al riguardo [2].

³ Sul concetto di vincolo finanziario alla nascita, si veda, tra gli altri [3].

⁴ Per approfondimenti sul mercato del private equity, si rinvia, all'interno della copiosa produzione esistente, ad alcuni lavori recenti, tra i quali, in particolare [4] [5] [6].

⁵ Già in un nostro precedente lavoro abbiamo fatto notare che esistono vantaggi per l'impresa collegabili alla presenza di un venture capitalist, al di là di quelli puramente finanziari. È stato infatti dimostrato che: a) le imprese finanziate dai venture capitalist si caratterizzano per una attività brevettuale più sviluppata rispetto alle altre imprese innovative in cui tali operatori non sono presenti e la 'qualità' dei loro brevetti risulta decisamente migliore; b) le imprese in cui sono presenti i venture capitalist si qualificano per una attività innovativa decisamente elevata: esse, in effetti, riescono ad introdurre nuovi prodotti sul mercato ad una velocità tripla rispetto alle altre imprese innovative c) la presenza del venture capital fa sì che le imprese risultino meglio gestite e si qualificano per un management più affidabile, sempre rispetto a quelle che hanno seguito un percorso di finanziamento 'tradizionale' Per approfondimenti si vedano [7] per un commento su risultati di due indagini svolte nel Massachusetts e nella Silicon Valley, [8] [9].

⁶ Una prima generica definizione del business angel lo caratterizza come un investitore privato, di solito dotato di buone competenze manageriali (ex-imprenditore, ex-manager e simili), che apporta capitale di rischio e le sue competenze manageriali all'interno di imprese nuove o comunque innovative di piccole dimensioni.

⁷ Al riguardo si veda, in particolare [10]. L'autore mette in evidenza come in Paesi, quali la Danimarca e l'Australia, in cui il venture capital risulta meno attivo nel finanziamento delle iniziative, i fondi apportati alle nuove imprese da finanziatori 'informali' arrivano a rappresentare oltre il 90% del totale dei finanziamenti complessivamente ottenuti a titolo di capitale di rischio. Non sono purtroppo disponibili, almeno secondo le nostre conoscenze attuali, dati riferiti alla realtà italiana.

⁸ Si veda al riguardo [11].

BIBLIOGRAFIA

- [1] Libro Verde, *L'imprenditorialità in Europa*, Bruxelles 2003.
- [2] Unioncamere, *Rapporto dell'Osservatorio sulla demografia delle imprese*, 2002.
- [3] Carlesi, A., *Il problema finanziario nell'economia della nuova impresa*, Giappichelli, Torino 1990.
- [4] AIFI, Capitali per lo sviluppo, *Un'analisi del mercato internazionale del private equity e del venture capital*, IlSole 24 Ore, Milano 2001.
- [5] Gervasoni, A., Sattin, F., *Private equity e venture capital*, Guerini e Associati, Milano 2000.
- [6] AIFI, *Capitale di rischio per lo sviluppo: le nuove frontiere*, Quaderno AIFI, 7, 1999.
- [7] Carlesi, A. (a cura di), *Finanza per l'innovazione*, Angeli, Milano 2003.
- [8] Kortum, S., Lerner, J., Does Venture capital spur innovation?, *Rand Journal of Economics*, 31, 2000.
- [9] Hellmann, Y., Puri, M., The interaction between product market and finance strategy: the role of venture capital, *Stanford University*, Research Paper 1561, 1999.
- [10] Aernoudt, R., *Formal and informal venture capital: a planetary perspective in Entrepreneurial & Business Angel Financing*, Eban, Agosto 2001.
- [11] Sandri, S., Il venture capital come strumento di finanziamento delle piccole imprese, *Piccola Impresa/Small Business*, 2, 1994.

LA MOBILITÀ PER MOTIVI DI STUDIO E DI LAVORO DEI LAUREATI TOSCANI*

ANDREA CAMMELLI

Direttore di AlmaLaurea, Dipartimento di Scienze statistiche, Università di Bologna

In un momento in cui la «fuga dei cervelli» dall'Italia è al centro del dibattito nazionale ed europeo, interrogarsi sui flussi interni al paese significa considerare il fenomeno della mobilità geografica dei laureati nella sua complessità e completezza. Si deve alla regione Toscana la lungimiranza dell'aver proposto un confronto aperto sulla propria capacità di trattenere o "esportare" le migliori e più qualificate risorse umane. Nel tentativo di rispondere a questa esigenza il Consorzio Interuniversitario AlmaLaurea, da dodici anni al servizio delle Università, delle imprese e di tutti coloro che affrontano i temi degli studi universitari, dell'occupazione e della condizione giovanile, ha realizzato una specifica indagine sulla mobilità per motivi di studio e di lavoro dei laureati Toscani.

Pur con alcune limitazioni che verranno riportate in seguito e pur con le cautele necessarie nell'affrontare un fenomeno complesso, si evidenzia dalla lettura dei risultati una tendenza del sistema universitario toscano a non farsi scappare i suoi 'cervelli'. La regione Toscana, infatti, non solo forma quasi tutti i laureati toscani, ma attrae un quarto dei giovani dalle altre regioni. L'indagine restituisce la fotografia delle loro scelte: dove studiano, dove lavorano dopo la laurea. Con un approfondimento sui laureati nelle materie scientifiche, per capire come in un settore in crisi di vocazioni in realtà ci siano molti giovani che puntano sul sistema formativo toscano e che nella regione trovano possibilità di lavoro.

1. La mobilità per motivi di studio

La ricerca ha preso in esame quasi 18mila laureati pre e post riforma. Si tratta di tutti i laureati del 2003 negli Atenei toscani (16.601 giovani, di cui 12.072 residenti in Toscana) e dei giovani laureati in altri Atenei ma residenti in Toscana (1.368).

Ci sono più giovani che scelgono la Toscana per studiare di quanti invece lasciano la regione per fare l'Università altrove. Il saldo migratorio che risulta è positivo: +23,5%. La Toscana si conferma, così, ai primi posti nella classifica delle regioni che attraggono studenti universitari dopo l'Emilia Romagna (+59%) e il Lazio (35%).

Grafico 1: Regioni che attraggono e che esportano studenti

Fonte: elaborazioni su dati MIUR

I giovani dottori degli Atenei toscani che hanno conseguito il titolo fuori dalla loro Provincia di residenza sono il 39% contro il 26% della media nazionale. La maggiore mobilità interna era ovviamente attesa, se si considera la presenza di Università solo in quattro province sulle dieci della regione (Arezzo, Firenze, Pisa e Siena). Chi risiede nella stessa provincia in cui studia è il 33,5% (contro il 51% a livello nazionale). D'altra parte sono invece pochissimi i giovani toscani che vanno a studiare fuori regione. Quelli infatti che studiano in Toscana rappresentano il 90% contro il 78% del complesso dei laureati italiani che studia nella stessa regione di residenza.

Nell'analisi tra regioni che attraggono e regioni che "esportano" laureati, si evidenzia che i flussi più cospicui di giovani che vengono a studiare in Toscana non provengono da regioni contigue. La Toscana attrae laureati soprattutto dalla Puglia (3,9%), dalla Calabria (3,8%), dalla Liguria (3,1%) e dalla Sicilia (2,6%). Segue il Lazio (2,1%), che è tra le regioni contigue quella con la più alta percentuale di laureati "ceduti" alla Toscana, mentre i laureati emiliano-romagnoli che studiano negli Atenei toscani rappresentano appena l'1,2%. Al contrario, la Toscana "esporta" i suoi laureati soprattutto nel Lazio e in Emilia Romagna, dove tra l'altro è presente una sede universitaria in ogni provincia, ciascuna con circa il 3% di tutti i laureati toscani. Una quota rilevante sceglie infine di conseguire la laurea in Umbria e in Lombardia.

La stessa analisi approfondita per gruppi di corsi di laurea ci dice che praticamente tutte le aree disciplinari attraggono studenti¹. In testa alla classifica troviamo Architettura (+91%), come ci si poteva aspettare vista la peculiarità e la tradizione di questo percorso di studi presso l'Ateneo di Firenze, e il gruppo Scientifico (+65%). Seguono i gruppi

Giuridico (+34%), Letterario (+30%), Medico (+26%), Ingegneria (+25%), Agrario (+22%) e gli altri sino al Gruppo Insegnamento (+3%).

Grafico 2: Gruppi di corsi di laurea che attraggono o che "esportano" studenti



Fonte: elaborazioni su dati MIUR

2. Mobilità per motivi di lavoro

Dove lavorano i laureati toscani? Grazie alla banca dati AlmaLaurea è possibile seguire i movimenti geografici dei laureati per motivi di lavoro dopo il conseguimento del titolo. Si scopre così che i laureati toscani trovano impiego principalmente in regione, almeno nell'immediato, in quanto il lavoro "sotto casa", freschi di laurea, rappresenta il primo passo per poi costruire carriere più stabili e definitive. Il tessuto economico della Toscana dunque dimostra, almeno nel primo approccio al mondo del lavoro, di avere una forte capacità attrattiva rispetto ai propri laureati. È bene però ricordare subito alcune limitazioni che riguardano questa analisi. L'indagine ha riguardato complessivamente 20.170 laureati italiani pre-riforma che hanno conseguito il titolo nella sessione estiva del 2003 in 27 Atenei aderenti ad AlmaLaurea. I giovani sono stati intervistati a un anno dalla laurea². Tra questi, i laureati residenti in Toscana sono 1.890: 1.768 hanno studiato in Regione, nei soli Atenei di Firenze e Siena presi in esame, mentre 122 hanno studiato fuori. In questo contesto, va considerata la mancanza del collettivo dei laureati dell'Università di Pisa, uno dei tre poli accademici della Toscana, che pesa per circa un terzo sul complesso dei laureati toscani. Inoltre per fare affidamento a una documentazione più ampia, dunque più attendibile, si è deciso di focalizzare l'attenzione ai soli neolaureati. Per una analisi compiuta si dovranno prevedere ulteriori indagini nel lungo periodo, ovvero anche a tre e cinque anni dalla laurea³.

Per definire le dimensioni della mobilità dei laureati Toscani per lavoro, occorre premettere il quadro di riferimento generale sulla loro condizione occupazionale. Si ricorda che in questo caso, per definire gli occupati, è stata adottata la definizione Istat delle Forze Lavoro, che comprende anche chi svolge attività di formazione retribuite. I

risultati premiano i laureati toscani rispetto alla media nazionale. Ad un anno dalla laurea lavora il 71% contro il 68,5% a livello nazionale. A cinque anni dal conseguimento del titolo gli occupati sono il 92% contro il 90,5% a livello nazionale.

Il lavoro, a un anno dalla laurea, è stabile per il 41%⁴ dei laureati toscani, un valore analogo alla media nazionale. Prevale chi è assunto a tempo indeterminato (26,2%) contro chi svolge un lavoro autonomo (14,9%). Il lavoro atipico coinvolge il 47,9% dei laureati toscani. Se si fa riferimento all'indagine nazionale, la precarietà tende naturalmente a diminuire nel tempo, a tre e a cinque anni dalla laurea, a favore del lavoro stabile. I laureati Toscani risultano, infine, di gran lunga impegnati nel settore privato rispetto a quello pubblico.

Tabella 1: Tipologia dell'attività lavorativa dei laureati 2003 residenti in Toscana

	laureati residenti in Toscana	totale laureati AlmaLaurea
autonomo	14,9	11,6
tempo indeterminato	26,2	29,6
formazione lavoro/apprendistato	4,6	6,2
tempo determinato	18,2	21,0
collaborazione	27,1	23,1
altro atipico	2,6	2,5
senza contratto	5,4	5,2
non risponde	1,0	0,8
Totale	100,0	100,0

Fonte: AlmaLaurea

Tabella 2: Settore di attività dei laureati 2003 residenti in Toscana

	laureati residenti in Toscana	totale laureati AlmaLaurea
pubblico	23,3	21,2
privato (o a partecipazione statale)	76,3	78,7
non risponde	0,3	0,1
Totale	100,0	100,0

Fonte: AlmaLaurea

La ricerca di un lavoro quanto sposta i giovani laureati da un confine regionale a un altro? A un anno dalla laurea risiede e lavora in Toscana il 90% dei laureati sul totale dei residenti. Chi risiede in Toscana, ma lavora fuori rappresenta il 10%. Solo l'1,3% non è residente, ma lavora in Regione. Si conferma dunque, come si è detto, la capacità del territorio di assorbire le sue forze lavoro formate ai livelli più alti. Tra le spiegazioni, sta l'intreccio tra una migliore condizione economica del territorio e una più elevata qualità della vita delle sue province. Uno studio sulla mobilità per lavoro dei laureati in Italia⁵, condotto sempre su dati AlmaLaurea, consente di definire la Toscana tra le regioni che "acquistano" laureati, al secondo posto dopo l'Emilia Romagna. Di questi, più della metà sono giovani che hanno scelto la Toscana per studiare e poi si sono fermati.

3. I laureati toscani nelle discipline scientifiche

La particolare attenzione posta da più parti e l'interessamento dello stesso MIUR nei confronti delle lauree scientifiche in crisi di vocazioni⁶ ha stimolato un approfondimento sul tema della mobilità dei laureati toscani in queste discipline. I laureati dell'area scientifica del 2003 presi in esame dalla ricerca sono 1.725. Si tratta dei dottori pre e post riforma del gruppo Chimico, Geo-biologico e scientifico, che a sua volta comprende i laureati di corsi quali Astronomia, Fisica, Informatica e Matematica. Tra questi sono 1.667 i laureati negli Atenei toscani (481 non residenti in Toscana) e appena 58 i laureati in altri Atenei fuori regione. Anche in questo caso il saldo migratorio è più che positivo: +34%. Al punto che la Toscana è seconda solo all'Emilia Romagna (+50%) per numero di laureati nelle discipline scientifiche formati in regione.

Se è vero che la quota di chi studia nelle università toscane provenendo da altre province è più elevata della media nazionale, tanto più questo fenomeno si riscontra per i laureati nelle discipline scientifiche (il 37% risiede in una provincia diversa da quella degli studi contro il 28% della media nazionale dei laureati in Scienze). I laureati nelle discipline scientifiche toscani che hanno concluso gli studi nella propria regione rappresentano il 95%. Una media pressoché confermata in tutte le province, con valori più bassi solo nei capoluoghi di "confine": i laureati di Massa Carrara guardano anche all'ateneo di Genova, quelli di Arezzo sono sulla direttrice per Roma, quelli di Prato risentono della vicinanza con Bologna.

I valori sulla condizione occupazionale dei laureati nelle discipline scientifiche fanno necessariamente riferimento alla definizione Istat delle Forze lavoro vista la maggiore vocazione di questi corsi al proseguimento dopo la laurea della formazione, dal dottorato di ricerca alle scuole di specializzazione ai tirocini⁷. Secondo, dunque, la definizione adottata, l'81% dei laureati toscani nelle discipline scientifiche nel 2003 lavora a distanza di un anno dalla laurea. La media nazionale è del 74%. A cinque anni dalla laurea i laureati toscani nelle discipline scientifiche che lavorano sono il 92%, la media nazionale è dell'89%.

Pur con le cautele ricordate sopra, anche in questo caso si conferma la capacità attrattiva della Toscana. A un anno dalla laurea abita e lavora in Toscana il 98% dei laureati nelle discipline scientifiche sul totale dei residenti in Toscana. Chi risiede in Toscana, ma lavora fuori rappresenta appena l'1,7%. Insignificante (0,9%) la quota di chi non è residente, ma lavora in regione.

In generale, e in conclusione, le performance lavorative di buon livello dei laureati in materie scientifiche rimandano a un approfondimento più esteso sul valore delle lauree scientifiche, soprattutto quelle definite in crisi di vocazioni. Il problema in Italia non sembra essere tanto l'ingresso nel mondo del lavoro dei laureati di questi percorsi, quanto piuttosto il loro numero ridotto. L'Italia, rispetto al contesto internazionale, sconta un ritardo sul numero di laureati formati. La questione di fondo, piuttosto che l'occupazione dei laureati attuali, sembra essere la loro occupabilità il giorno in

cui fossero divenuti un numero tale da non essere più assorbiti dal sistema produttivo italiano che continua a investire poco in ricerca e in innovazione.

NOTE

* Il testo è tratto dall'intervento al convegno *La Toscana al bivio: fuga di cervelli o attrattore di intelligenze?*, svoltosi a Firenze il 18 ottobre 2005 nell'ambito di Pianeta Galileo.

¹ Il gruppo Educazione fisica comprende il corso in Scienze Motorie finalizzato al conseguimento della laurea per i diplomati Isef aperto solo in alcuni Atenei. I numeri dei laureati sono dunque limitati. Così per il gruppo Difesa e sicurezza che comprende i corsi in Scienze strategiche attivati solo nelle Università di Modena e Torino.

² Cfr. [2].

³ Si tenga presente che l'annuale Rapporto AlmaLaurea sulla condizione occupazionale dei laureati coinvolge i laureati a uno, tre e cinque anni dalla laurea in diversi Atenei a seconda dell'anno di adesione degli stessi al Consorzio.

⁴ Il lavoro stabile è individuato dalle posizioni lavorative dipendenti a tempo indeterminato e da quelle autonome propriamente dette (imprenditori, liberi professionisti e lavoratori in proprio). Il lavoro definito atipico racchiude il contratto dipendente a tempo determinato, il contratto di collaborazione (comprendente la collaborazione coordinata e continuativa; quella occasionale e il contratto a progetto), il lavoro interinale e il contratto di associazione in partecipazione.

⁵ Cfr. Viesti [3].

⁶ Si veda il D.M. 23 ottobre 2003, *Fondo per il sostegno dei giovani e per favorire la mobilità degli studenti*, che prevede, fra l'altro, il rimborso delle tasse e dei contributi dovuti dagli studenti immatricolati ai corsi di laurea afferenti alle classi: Scienze matematiche, Scienze e tecnologie fisiche, Scienze e tecnologie chimiche, Scienze statistiche.

⁷ Cfr. Cammelli [1].

BIBLIOGRAFIA

- [1] Cammelli A., Physics from school to the job market. The Italian job market in physics, *Giornale di Fisica*, 47 n. 1, 2006, pp. 129-139, consultabile su internet www.almalaurea.it/universita/altro/fisica2005.
- [2] Cammelli A., VII Rapporto AlmaLaurea sulla condizione occupazionale in Consorzio Interuniversitario AlmaLaurea (a cura di), *Lavorare dopo la laurea. Caratteristiche e percorsi occupazionali*, Il Mulino, Bologna 2005.
- [3] Viesti G., *La mobilità geografica per lavoro dei laureati in Italia*, Consorzio Interuniversitario AlmaLaurea (a cura di), *Lavorare dopo la laurea, op. cit.*

