
LEZIONE GALILEIANA

CRITICA DELLA REGIONE INFORMATICA NELLE SCIENZE DELLA NATURA*

GIUSEPPE LONGO**

Dépt. d'Informatique, CNRS et École Normale Supérieure, Parigi

Cercheremo in questo testo di mettere brevemente in evidenza alcuni principi costitutivi di quella particolare forma di conoscenza che ci è data dalla macchina digitale, il moderno computer, nel suo rapporto con la matematica, da cui si origina, ed alle scienze della natura (fisica e biologia). La tesi di fondo è che la ricchezza, storica e concettuale, della teoria che ha permesso la realizzazione pratica di questa straordinaria macchina è lungi dall'esser «neutra» o «trasparente» rispetto al reale. In particolare, in relazione alle strutture causali e alle rotture-di-simmetrie che le generano – strutture centrali dell'intelligibilità della Natura –, la macchina digitale ne propone di proprie. Questo permetterà di accennare a una distinzione fra «imitazione» e «modellizzazione», nell'attività di simulazione o formalizzazione e di mettere in evidenza limiti e potenzialità della simulazione digitale.

1. Dall'alfabeto alla macchine

La novità straordinaria con cui ci confrontiamo oggi è una macchina frutto di un percorso storico-evolutivo molto articolato. Questa macchina non c'era «prima», nello stesso modo in cui 300 milioni di anni fa non c'erano i mammiferi sulla faccia della terra. Nella dinamica sempre costitutiva di novità del sistema evolutivo emergono i mammiferi – nulla di miracoloso, solo una vicenda molto complessa che mescola invarianza e variabilità, continuità e cambiamento, in parte aleatori, in parte ancora non ben classificabili nelle attuali categorie fisiche di determinazione. In modo analogo, se non più complesso, si sviluppa la storia umana e, al suo interno, con una continuità/discontinuità che è ricca di pratiche comuni, del linguaggio, della cultura simbolica, si arriva a questa macchina, il calcolatore digitale, che sta cambiando il mondo. Essa è il punto attualmente massimo di un percorso tutto particolare che inizia certo con il linguaggio ma risente soprattutto della nascita e lo sviluppo dell'alfabeto: la macchina digitale è in primo luogo una macchina alfabetica, poi è logica e formale. In breve, è un'invenzione tanto straordinaria quanto contingente alla nostra cultura, marcata dalla nascita dell'alfabeto, dalla razionalità cartesiana, dalla logica di Frege, dai formalismi di Hilbert.

Poniamoci dunque il problema di considerare che impatto ha tale macchina nella costruzione di conoscenza; infatti, la macchina non è neutrale, impone a chi la usa una storia ed una logica, uno sguardo organizzatore dei fenomeni. Gli atteggiamenti più deleteri sono quelli ingenui nei confronti della novità che l'evoluzione e la storia ci danno (o che ci diamo in essa): il non saper vivere nel proprio sapere, il non saper cogliere l'originalità del proprio sapere e proiettare indietro l'ultima nostra invenzione, ricca di storia umana, come se fosse già nel mondo, o ne fosse un'immagine fedele. Ed andar dicendo: l'universo tutto è un grande calcolatore digitale oppure... ogni processo, fisico, biologico, è un calcolo. Ovvero, la teoria di Turing è «completa» e «massimale»: persino l'attività di una cellula o il quantum computing le è riducibile. È pretendere, aristotelicamente, di avere la «Teoria Definitiva».

Purtroppo, questo atteggiamento ingenuo è stato spesso assunto, nel corso della storia. Tre o quattromila anni fa, quale era la tecnologia più avanzata? ... il realizzare vasi con l'argilla. Allora l'uomo ha detto di essere stato creato da Dio con l'argilla, plasmata all'uopo, proprio come l'uomo fa i vasi (più un piccolo soffio vitale). Nel Seicento e nel Settecento la tecnologia più avanzata era costituita dagli orologi, i meccanismi con ingranaggi e pulegge ... allora l'uomo ha detto che Dio aveva creato l'universo, il vivente in particolare, nello stesso modo in cui egli costruiva le macchine, i meccanismi ad orologeria. Invece, gli ingranaggi erano originalissimi, in alcun modo presenti, con ruote dentate e molle, nel mondo, tanto meno nel vivente, e bisognava coglierne l'originalità per effettuare la svolta successiva, la nascita delle macchine della grande industria, ingranaggi mossi dalla forza del vapore, che cambieranno, arricchendoli immensamente, i nostri modi di vita. E si smette allora di realizzare ballerine meccaniche, pianisti e giochini (deliziosi peraltro) che tentavano di rappresentare l'uomo, gli animali, i pianeti.

In Informatica si può osservare un processo storico analogo. Abbiamo costruito questa macchina assolutamente originale e subito si ripetono i soliti atteggiamenti ingenui: Dio ha fatto il mondo così ... il cervello, il genoma, l'evoluzione sono come questa macchina, ovvero programmi, algoritmi e *digit*. La prima volta, i pupazzi di argilla, l'idea è molto poetica, la seconda un po' meno, la terza si rasenta il ridicolo. E soprattutto non si coglie l'originalità di questa straordinaria scienza e tecnologia che, organizzando a suo modo – ed immagine – il nostro sguardo sui fenomeni, ci aiuta e ci indirizza nel fare conoscenza. La macchina, come ed ancor più degli altri strumenti nel passato, segna profondamente il nostro rapporto alla scienza, come l'alfabeto o la stampa hanno trasformato e segnato le nostre società, il nostro stesso modo di costruire conoscenza. Non mi soffermerò a lungo su tutti i temi trattati (v. i riferimenti, scaricabili) ed accennerò solo allo sguardo che l'informatica ci propone, impregnato da un efficacissimo organizzare la conoscenza in caselle, in *bit*, in *pixel*, in un discreto esatto e, in alcuni casi, assoluto, senza smoothness, senza sfumature, senza *gestalt* e senza *aleas*. O meglio, con al più imitazioni importantissime, ma forzate ed estranee alla sua logica, di componenti siffatte del mondo e della conoscenza.

Vorrei quindi ritornare brevemente su come le radici di questa macchina siano antichissime: nell'alfabeto. In primo luogo, proprio come con l'alfabeto 6.000 - 5.000 anni fa, oggi, con la *discretizzazione* informatica della conoscenza, abbiamo fatto un'altra invenzione di enorme rilievo. Pensate all'originalità di questi primi gruppi in Mesopotamia, i gruppi altamici, che frantumarono il flusso linguistico, un canto parlato continuo, annotando alcuni *pitch* sonori come prime consonanti. Inizia con ciò un percorso culturale ben diverso da quelli inerenti alla scrittura geroglifica, ideogrammatica, dove tramite il disegno si propone un concetto, si evoca un'intera immagine, una situazione, un sentimento. L'alfabeto invece è discreto, suddivide il continuo del linguaggio in atomi *insignificanti*, in bits, le lettere. Questo è un passaggio di astrazione straordinaria compiuto dall'uomo, un modo di rappresentare l'interazione linguistica che assolutamente non esisteva prima e che marcherà la cultura umana, come (ri-)costruzione del significato a partire da segni elementari e semplici, senza significato, in sé astrattissimi, quindi. Inoltre, ed è cruciale, si ricostruisce il significato tramite il suono: l'alfabeto è fonetico. Il senso è dato dalla riproduzione del suono, non dall'evocazione di un'immagine o di un concetto, un'immensa rivoluzione. In termini informatici, il fonema è il compilatore dell'alfabeto e produce il significato. L'evocazione del concetto o dell'emozione, del dio, tramite il disegno, il geroglifico o l'ideogramma, si fa in silenzio. L'ideogramma/segnale stradale impone il senso, un ordine, un divieto, nell'immediatezza visiva di una evocazione significativa: si capisce, si agisce subito, senza produrre suoni, neppure mentali. Se l'indicazione che sbarra, per dire, la svolta a destra con segno evocatore, è invece scritta, come spesso in USA, pronunciamo (è indispensabile) almeno nella nostra mente le parole *no right turn*. Produrre un fonema, solo mentale nella lettura silenziosa, è necessario per arrivare ad un significato e tutti sappiamo la difficoltà del primo sillabare infantile, necessariamente ad alta voce, per imparare (sembra che solo nel III o IV secolo si sia inventata la lettura silenziosa: prima l'uomo occidentale leggeva sempre ad alta voce). La notazione musicale moderna percorrerà la stessa strada ed il musicista esperto sente nella mente la musica che legge, anche in silenzio, come noi alfabetizzati sentiamo le parole significative, perché risuonanti.

2. L'elementare e il complesso

Con questi miei cenni al ruolo dell'alfabeto ho ripreso le osservazioni dettagliate e profonde di Herrenschildt, a Parigi, e Sini, e la sua scuola, a Milano, nonché di altri autori, pure citati in [6]: la frantumazione alfabetica orienterà la cultura umana in una maniera molto forte; vediamo, in breve, come e perché essa ha a che vedere con l'Informatica.

L'alfabeto è di straordinaria efficacia, e, come delle «rotaie» per forza e direttiva, canalizza, organizza il pensiero, la struttura della conoscenza. In primo luogo, esso introduce una forma originaria di dualismo: *qui* la notazione, *là* il significato, da raggiungere per mezzo del fonema, ma ben indipendenti (nell'ideogramma il significato

è immanente al disegno). Poi, si afferma la concezione per cui, per capire il mondo, bisogna frantumarlo in componenti *elementari* e *semplici*. Democrito denota gli atomi con lettere alfabetiche: l'universo è costruito a immagine della nostra invenzione, cioè dell'alfabeto, e si forma per composizioni di componenti elementari e semplici, indivisibili, come le lettere.

Ancora oggi il genoma è annotato con lettere alfabetiche. Entrambi, gli atomi o il genoma, si combinano fra loro e, *voilà*, il *pop out*, dell'oggetto fisico, del fenotipo, del comportamento; così come componendo e mettendo insieme le lettere, tramite il fonema, emerge il significato. E l'uomo proietta, ancora una volta, questo modo di ricostruire e raccontare il mondo, nell'assoluto: dice che Dio (o l'Evoluzione) ha inventato il mondo e la vita nel modo in cui egli costruisce il senso con la scrittura alfabetica, giustapponeendo segni senza significato. Di nuovo, l'alfabeto è efficacissimo e straordinario, ma non è uno strumento neutro, impone per la sua forza i paradigmi che saranno all'origine della scienza occidentale ed ancor oggi sono rivisitati nella scienza contemporanea. In particolare, dicevo, propone il paradigma che Descartes più di ogni altro ha innalzato a punto centrale del conoscere: le componenti elementari della costruzione di conoscenza devono essere molto semplici, anelli indecomponibili di una catena razionale, il ragionamento «cartesiano». E le lettere in sé sono indecomponibili (elementari) e molto semplici, non hanno significato, ma messe insieme producono il significato, che può essere molto complesso.

Tale è l'approccio alla scienza di Democrito, dicevo, ma anche, insisto, di Aristotele, di Descartes: l'intelligibilità è data dallo scomporre l'universo in atomi e il discorso sull'universo in anelli *elementari* e *semplici*. È la scomposizione massimale, atomica, degli elementi che rendono il mondo intelligibile e il discorso rigoroso. Così lavorano Galileo e Newton; e tutta la scienza moderna costruisce conoscenza, con incredibile efficacia, a partire dall'elementare e semplice. È stata molto più produttiva di qualsiasi altra scienza (penso ai cinesi, ad esempio) soprattutto, ma non solo, nel fare macchine. Gli orologi si fanno così: si prendono ingranaggi e pulleggie semplici e si fanno degli oggetti composti, complessi, incredibilmente complessi come sapevano fare gli orologiai europei del Settecento. E così i computer: le porte logiche ed le componenti elementari sono semplicissime, i linguaggi di programmazione sono composti di atomi linguistici *elementari* e *semplici* e con essi si fanno sistemi e programmi di immensa complessità.

Tuttavia, oggi, ci troviamo di fronte una enorme difficoltà, una nuova sfida di conoscenza: nei due campi che più degli altri sono all'avanguardia, sul fronte difficile del conoscere, la biologia e la microfisica, *l'elementare risulta molto complesso*; questa è la grande sfida alla nostra comprensione, per noi così alfabetizzati. Proprio perché siamo culturalmente nati con l'alfabeto, ci troviamo di fronte a un modo difficilissimo dell'intelligibilità. Si dà infatti il caso che le corde (o stringhe) e i fenomeni di non separabilità e di non località propri della fisica quantistica sono di estrema *complessità* e riguardano componenti *elementari* della materia. E allora, il nostro proiettare l'alfabeto sul mondo, le lettere-atomi di Democrito, improvvisamente trova un ostacolo, per

ora, insormontabile (in breve: non sappiamo capire la microfisica in termini classici o relativistici). Lo stesso nell'analisi del vivente: la cellula, componente elementare del vivente (se la si taglia è morta, non è più vivente), è molto complessa e va colta nella sua unità.

Alcuni biologi (Gould, fra i tanti) dicono che una cellula eucariota è «complessa» come un elefante. In effetti, all'interno vi si trovano le stesse cascate proteiche, lo stesso tipo di produzione di energia (mitocondria, metabolismo...), una strutturazione in organi ed organelli assolutamente analoga a quanto avviene in un metazoo. Un aspetto della complessità, quella oggettiva, è cioè simile nell'elefante e nella cellula eucariota. Un animale è certo più complesso di una cellula dal punto di vista fenotipico, ma questa è un'altra nozione di complessità (morfologica).

La nuova sfida, la complessità dell'elementare, è un muro concettuale per la nostra peraltro efficacissima scomposizione alfabetica e digitale del mondo: facciamo e faremo fatica a superarlo. Proprio come in microfisica, dove manca l'unità con il «campo» classico o relativistico, così facciamo fatica ad unificare il «campo» del vivente (che peraltro non abbiamo ancora ben definito) con le attuali teorie biochimiche, con le teorie che prendono le macro-molecole e le basi per parole ed alfabeto. Una riflessione a riguardo, grazie anche, per dualità, all'informatica digitale, può forse aiutarci.

3. Imitazioni e modelli

Torniamo allora al digitale. È dunque la forza della cultura alfabetica che ci ha dato, come sua ultima espressione, questa macchina, il computer, il massimo dell'invenzione umana, alfabetica e 'cartesiana'. È alfabetica, dicevo, innanzitutto perché tutto vi si scompone in 0,1, alfabeto di base molto semplice, in cui ancora una volta l'elementare è semplice, semplicissimo, per poi diventare molto complesso, per composizione. Ed è 'cartesiana' perché è il luogo massimale del dualismo cartesiano, realizzato dall'idea di Turing del '36 di dividere il software dall'hardware. Le macchine elettromeccaniche che esistevano allora e sono rimaste in uso fino agli anni '50, non avevano un *software* distinto dall'*hardware*. Vi si implementava, per dire, la moltiplicazione e questa rimaneva scritta negli ingranaggi, le sue regole erano iscritte nell'*hardware*, costruito ad hoc. Erano concepite come gli orologi di duecento anni prima, solo più complesse.

L'idea di Turing, che in questo ha alcuni predecessori, è di distinguere nettamente, matematicamente, nella sua Macchina astratta, l'*hardware*, materiale fisico *multi-purpose*, dal *software*. Nasce allora la teoria della programmazione, del tutto indipendente dall'*hardware*, dall'elettronica specifica. Idea essenziale a riguardo e che rende l'Informatica possibile, è la portabilità del *software*, nella sua indipendenza dall'*hardware*: si scrive un programma, lo si porta dall'una all'altra macchina e funziona. Lo si può vendere. Esiste un mestiere, che ho praticato a lungo, quello del logico matematico in teoria della programmazione, che è totalmente indipendente dall'analisi dell'*hardware*.

Naturalmente, per chi è monista come me, questo non ha nulla a che vedere con

il mondo, tanto meno con il vivente: è piuttosto l'immagine moderna del dualismo cartesiano anima-corpo, con tanto di metempsicosi (il trasferire programmi e sistema operativo da un computer, morente, ad un altro), che ha gran successo in Intelligenza Artificiale ed in brutti film di fantascienza. Ma riconosco che tale paradigma è ricco di conoscenza, iniziata con la costruzione, dicevo, dell'alfabeto, forse la prima esperienza veramente dualista dell'uomo: segno insignificante e significato, ben distinti. E ricordo ancora Aristotele. Aristotele accenna una teoria della memoria e del ragionamento basata sull'alfabeto in cui, sostiene, lo svolgersi del ragionamento è come il marcarsi, l'imprinting di «segni alfabetici nel corpo, come su una tavoletta di cera»¹. Credo che la macchina «di Turing» andrebbe chiamata «di Aristotele-Turing»: sono i segni alfabetici che consentono il ragionamento, con la loro dinamica puramente formale, indipendente dal significato, il pensiero è nelle *stampe mobili di segni*. È questo il modello alfabetico del ragionamento di Aristotele e Turing: le lettere che si muovono e si stampano nella materia (vivente, come sulla cera), o sul nastro di una Macchina di Turing, prototipo del computer moderno. E da ciò si arriva alla macchina che rappresenta tutto, tramite il ragionamento cartesiano, atomista, susseguirsi di lettere senza significato.

Questo modo di intendere l'intelligenza umana (ed animale) canalizza lo sguardo sul reale con efficacia immensa, ma è *biased*, ha cioè un pregiudizio molto forte, risultante da una parte dai suoi aspetti di dualismo (feroce direi) e dall'altra dal proporre l'intelligibilità solo e sempre tramite la riduzione all'elementare massimalmente semplice, sequenze di segni/atomi ultimi e semplicissimi, senza significato. Di nuovo, questo è stato un paradigma ricchissimo per la conoscenza fisico-matematica, in particolare, ma un paradigma che oggi sbatte contro il muro di questo *elementare molto complesso*, non alfabetico, che incontriamo in fisica quantistica e in biologia, ricco dell'intricazione e delle circolarità causali proprie a questi due ambiti fenomenali.

La prima conseguenza da trarre da queste considerazioni è un invito a molta prudenza, nell'uso del computer come strumento di intelligibilità. Non bisogna cioè fare come alcuni colleghi, anche in scienze naturali, che prendono per buono tutto quello che vedono sullo schermo digitale, i modelli che la macchina permette. Oggi la ricchezza della simulazione digitale è tale da meritare un'analisi fine, anche epistemologica, proprio per fare meglio e di più.

Vorrei notare che Turing stesso introduce al riguardo una fine, ma implicita distinzione fra «imitazione» e «modello», intuendo, dopo il 1948, un limite intrinseco alla sua macchina, che, nel '50, dirà «laplaciana». Per capire cosa intendesse, prendiamo un esempio classico, il doppio pendolo. Si tratta di un oggetto fisico fortemente sensibile alle condizioni iniziali. Se lo andate a cercare su Google, troverete alcune pagine di una trattazione matematica nel continuo, due equazioni, molto informative, che ne determinano il movimento: due asticelle attaccate con uno snodo, due pesi... matematicamente due sole variabili, una sola legge, la gravitazione, eppure il caos. Dal punto di vista dell'intelligibilità, chi conosce i sistemi non-lineari capisce subito che quell'artefatto è molto sensibile ai dati iniziali (al matematico lo possono dire i

cosiddetti coefficienti di Lyapounov del sistema). Se si lancia il pendolo su certi valori iniziali, inevitabilmente nell'*intervallo* della misura fisica possibile, e poi lo si rilancia, nello stesso intervallo, quello dell'osservabilità, una variazione, una fluttuazione al di sotto dell'osservabile (ovvero non misurabile, la fluttuazione termica ad esempio, che è sempre presente) basta a far fare al doppio pendolo un percorso completamente diverso. Il doppio pendolo, macchina perfettamente deterministica (è determinata da due sole equazioni!) è sensibile a minime variazioni: un tipico sistema determinista caotico, come ce ne sono tantissimi².

Si osservi invece la simulazione informatica³. Si vedono allora benissimo traiettorie dense: grazie alla simulazione, si può far oscillare il pendolo abbastanza a lungo e si può osservare che esso tende a percorrere tutto lo spazio delle traiettorie possibili. Questo è un aspetto del caos. Tuttavia, quando si preme «restart» (si rilancia il pendolo sugli stessi dati iniziali), esso ripercorre esattamente la stessa traiettoria. Questo, invece, con un pendolo fisico, vero, è assolutamente impossibile. Se si ha a disposizione un buon pendolo, sufficientemente insensibile all'attrito, ma materiale, non virtuale, la fluttuazione termica, come dicevo, che è inerente al processo fisico, basta a farlo andare su un'altra traiettoria, se reinizializzato. Quindi quella imitazione egregia che ci dice tante cose, utilissime, in realtà cosa ci propone?

Da una parte, ci mostra la densità delle traiettorie, tipica del caos deterministico, ma dall'altra ci fa perdere una informazione essenziale: in un sistema dinamico non-lineare accade innanzitutto che, reinizializzato, il sistema non percorre mai la stessa «traiettoria». E questo per motivi «di principio» inerenti alla fisica (moderna): la misura fisica è sempre un intervallo e la variazione (inevitabile), al di sotto della misura, basta a dare, ben presto, evoluzioni diverse. L'analisi delle equazioni nel continuo fa *capire* tale aspetto aleatorio del caos, mentre l'imitazione computazionale lo fa perdere totalmente: solo trucchi ed imbrogli (pseudo-sincronizzazioni con orologi distanti, generatori pseudo-aleatori introdotti ad hoc) possono imitare, ma non modellizzare il fenomeno fisico. Ovvero possono ingannare l'osservatore della realtà virtuale, come Turing spera di ingannare l'osservatore del gioco dell'imitazione uomo/machina/donna, ma non proporre un «modello» fisico-matematico della possibile *struttura causale* del fenomeno fisico, come vorrei spiegarvi.

Per chi ha un po' di sensibilità fisico-matematica è quasi comico vedere una simulazione informatica in cui, dando gli stessi valori numerici di inizializzazione, un doppio pendolo ripercorre *esattamente* la stessa traiettoria, poiché ciò non ha senso fisico. Questa è imitazione, direbbe appunto Turing. Attenzione infatti: tale termine che ho usato in un paio di articoli⁴ in realtà è suggerito da Turing, che dopo il '48 inizia ad interessarsi ai sistemi dinamici, e smette di dire che la sua macchina è un cervellone e, nel '50, scrive un articolo su come si possa imitare con la sua macchina un comportamento umano (il gioco dell'*imitazione* fra la macchina e... una donna: si possono distinguere nel dialogo tramite telescrivente? – a Turing non piacevano molto le donne, era omosessuale). Nel '52 pubblica invece un articolo sulla morfogenesi,

proponendo un originalissimo sistema non-lineare di azione-reazione dinamica, in cui dà quel che chiama *modello* del fenomeno fisico in questione. Ovvero, cerca di cogliere o proporre una struttura della determinazione, tramite equazioni che descrivono l'interazione causale nel processo di azione-reazione.

Spero che la distinzione, implicita in Turing e che io ho qui tematizzato, possa essere utile a capire meglio quel che si fa grazie alla macchina digitale: quindi ci torno.

Un modello (fisico-matematico) è un tentativo di esprimere una struttura possibile della causalità fisica. Ad esempio, Newton considera il moto (pianeti e gravi) e scrive delle equazioni, fra cui $f = ma$, che ne rendono intelligibile la dinamica. Ovvero, fa una proposta di conoscenza. Per noi, non si tratta di un assoluto (come era per Newton), ma di una proposta, formidabile, che, in questo caso, è la seguente: la forza *causa* un'accelerazione, con la massa come coefficiente di proporzionalità. Propone cioè, con le sue equazioni, una struttura della causalità, *esplicativa* e che in effetti permetterà di dedurre, fra l'altro, le orbite di Keplero. E da lì in poi si sono sviluppati rapporti estremamente interessanti e fruttiferi tra fisica e matematica. Si è imparato a fare proposte organizzative del mondo fisico in termini matematici, come mai prima.

Chi si occupa soprattutto di metafisica (come Newton) pensa che questa sia la realtà in sè; chi è più laico, dice piuttosto: questa è una *costruzione di conoscenza*, con tutta l'oggettività della scienza moderna, ma con gli strumenti concettuali e pratici che le son propri, quindi con la sua dinamicità, con il suo evolvere. Nella relatività di Einstein, quella relazione causale è profondamente modificata ed in un certo senso, si inverte: è l'accelerazione lungo una geodetica in varietà riemanniane curve, semmai, che, producendo un campo, induce una forza; una *simmetria formale*, l'equazione, è rotta in modi diversi (rovesciata, in un certo senso), cambiando l'intelligibilità (e la fisica). Ecco due grandi successi del rapporto fra fisica e matematica, della modellizzazione matematica di fenomeni fisici⁵.

L'imitazione è un'altra cosa e Turing lo dice benissimo: l'imitazione è una costruzione che non pretende di rendere intelligibile il fenomeno, esplicitandone (o, meglio, proponendo per esso) una struttura causale (o, meglio, le simmetrie e le rotture di simmetria). L'imitazione *somiglia*, può anche essere indistinguibile, ma non assume nessun impegno riguardo alla causalità, alla intelligibilità fisica di ciò che si osserva ed imita.

Ad esempio, se voi lanciate i dadi o, meglio, una moneta, avrete una serie di 0,1; potete poi *imitare* il processo, la sequenza, con un generatore di numeri aleatori sul computer. Avrete una imitazione in questo senso: la distribuzione di probabilità degli 0 ed 1 è analoga, indistinguibile per una sequenza di ragionevole lunghezza.

Si può dire che questa è un'ottima imitazione, ma essa non ha nulla a che vedere con la modellizzazione del lancio di una moneta. Perché l'uno è un processo di un sistema deterministico, il lancio della moneta, estremamente sensibile alle condizioni al contorno, alla minima variazione dei parametri in gioco, dunque un altro esempio paradigmatico, anche se un po' diverso dai precedenti, di caos deterministico, e un

paradigma dell'aleatorio per l'altissima sensibilità delle condizioni al contorno. L'altro, lo pseudo-generatore di numeri aleatori in un computer, è un sistema pure deterministico, ma non caotico: il generatore di numeri aleatori che avete sul computer è un programma di una riga, una regoletta, che moltiplica seno e coseno, poi fa un taglio sul *round-off*, sull'arrotondamento, inerente alla macchina, e produce una serie di 0 e 1, distribuiti *apparentemente* a caso. Ma il processo non è affatto casuale, non vi è nulla di propriamente aleatorio, come nel lancio del tutto imprevedibile di una moneta: se voi pigiate «restart», lasciando tutti i parametri identici (cosa ben possibile, anzi la più facile), quella presunta successione casuale viene riprodotta identica, secondo la legge/determinazione aritmetica iscritta nel programma, che si svolge nel discreto. Il processo è laplaciano e perfettamente predittibile, in particolare perché iterabile. Non riuscirete mai ad iterare una stessa successione di 0 e 1, con una seconda sequenza di lanci di una stessa moneta: le strutture causali sono profondamente diverse, anche se l'imitazione è ottima.

La differenza sostanziale risiede nel fatto che la base di dati digitale è *esatta*, ha la topologia naturalmente discreta, ovvero l'accesso ad essa avviene bit per bit, ben separati. La misura fisica è invece, e per *principi* fisici, sempre un intervallo, ben rappresentato dalla matematica del continuo (dove la topologia discreta non è certo «naturale»). Nei sistemi deterministici caotici, una fluttuazione/variazione al di sotto dell'intervallo della misura, dunque inaccessibile, induce evoluzioni del sistema radicalmente diverse. Questo, osserva anche Turing nel '50, è teoricamente *evitabile* nella macchina a stati discreti da lui inventata – e lo è anche in pratica: l'iterazione e la portabilità funzionano⁶.

3.1 Modelli, processi ed imprevedibilità

La nozione di dinamica caotica è una nozione *matematica*, ovvero⁷ si può dare una precisa definizione di sistema dinamico caotico, determinato da una o più equazioni o, più direttamente, da una funzione di evoluzione (un endomorfismo di uno spazio metrico o topologico) con le proprietà elencate⁸. L'*imprevedibilità* invece si dà nell'interfaccia fra un processo fisico e la matematica: perché si possa parlare di *imprevedibilità*, bisogna che qualcuno cerchi di *pre-dire*, in linea di massima con la matematica, l'evoluzione di un fenomeno (fisico, tipicamente).

Un processo in sé non è imprevedibile, senza un tentativo di dire o pre-dire con un qualche sistema matematico; né, d'altra parte, un sistema di funzioni o una funzione matematica, in sé, è imprevedibile. Anzi, teoremi importanti dimostrano che ogni problema di Cauchy, una classe amplissima di equazioni differenziali, o, più in generale, ogni sistema ragionevole di equazioni (o funzioni) esprimibili e che ha soluzioni, ne ha di calcolabili. Ed in effetti bisogna proprio cercare con il lanternino per trovare un sistema di equazioni a coefficienti calcolabili, ovviamente, con soluzioni non calcolabili⁹. Ovvero, restando all'interno della matematica, si *calcola* e, se si hanno buoni teoremi di esistenza (ed unicità, se possibile) di soluzioni, si predicano evoluzioni, *punto per punto*,

ogni volta che si forniscano input calcolabili al sistema dato.

La matematica si scrive in linguaggi finitari ed effettivi, persino quando parla di infinito: è molto difficile, si procede con astuzie diagonali o poche altre per dare, matematicamente, un numero, una funzione, non calcolabile. Il problema è appunto nel significato della matematica, ovvero nel rapporto con il processo che si intende formalizzare/modellizzare. O, meglio, nella *misura* che permette di passare dal processo fisico al sistema matematico. Quando essa è un intervallo, non si può fornire al modello matematico un valore esatto, tanto meno un numero intero o calcolabile e, nelle dinamiche non-lineari, l'intervallo input viene «mescolato» ed (esponenzialmente) esteso nell'evoluzione (temporale in generale) rendendo il sistema matematico che modella, calcolabile ovviamente, inadatto a predire l'evoluzione del processo fisico, modellizzato. Ciò non toglie che importantissime informazioni *qualitative* rendano la formalizzazione di grande interesse (come geometria dei sistemi dinamici).

Per riassumere, non ha senso parlare di imprevedibilità di un sistema matematico, anche caotico, se non in relazione a un (presunto) processo fisico da questo modellizzato: è quest'ultimo che sarà (relativamente) imprevedibile; la matematica invece è (quasi sempre) calcolabile. Esistono poi sistemi e processi deterministi e prevedibili, ovvero laplaciani: si possono classificare come tali i processi la cui modellizzazione è ben espressa da sistemi lineari, anche continui, oppure da sistemi le cui basi di dati pertinenti sono discrete. In entrambi i casi, il problema della misura non ha conseguenze importanti (linearità: l'intervallo non viene «mescolato») o non si pone (il discreto: ogni dato è ben separato ed accessibile).

Nel secondo caso, la differenza – insisto e riassumo – è dovuta alla natura *esatta* della base di dati discreta, *digit* accanto a *digit*, ben separati fra loro, senza problema della misura; la sua topologia «naturale» (e questa parola ha senso matematico) è quella discreta, essa isola ogni punto dall'altro e permette di accedervi con esattezza. Non solo, ma l'iterazione, che è poi una forma di predizione, è un principio costitutivo dell'Informatica, figlia dell'Arithmetica Formale: la ricorsione primitiva, di Herbrand e Gödel, nel '30-'31, quando nascono le prime idee sulla calcolabilità, è iterazione (più l'*updating* di un registro); la portabilità del software è pure questione di iterazione: si vuole poter rilanciare identicamente un programma, pagato salatamente, perché faccia e bene sempre esattamente la stessa cosa – e guai se non lo fa! Invece, la misura fisica (classica e relativistica) non è un numero intero, ma è sempre un intervallo, che meglio rappresentiamo con la topologia «euclidea» nel continuo: una fluttuazione/variazione al di sotto di tale intervallo, dunque inaccessibile, *causa*, in sistemi deterministici non-lineari o caotici, evoluzioni diverse. E nelle dinamiche non-lineari quel che più interessa è proprio il ruolo della variazione, se possibile al di sotto dell'osservabile. Ovviamente queste due diverse strutture matematiche costruiscono immagini diverse del mondo; entrambe efficacissime, per i loro scopi, ma profondamente diverse.

Chi non fa la distinzione ed identifica quel processo fisico e la sua matematica, un doppio pendolo o il lancio di una moneta che capiamo meglio come dinamica

nel continuo, con l'imitazione computazionale discreta, fosse anche arricchita di belle immagini virtuali di una moneta che rotola, perde l'intelligibilità di entrambi i processi. E non riesce a far meglio. Come allora «far meglio» ed introdurre dell'aleatorio in una macchina a stati discreti? Le reti ed i sistemi concorrenti permettono imitazioni migliori dell'alea: una rete di macchine a stati discreti, il *web* tipicamente, o un sistema di processi *concorrenti* (che concorrono ad uno stesso processo ed a priori non sincronizzati da un orologio newtoniano assoluto e comune), distribuiti nello spazio, sono appunto immersi nello spazio-tempo che meglio intendiamo con la matematica del continuo. Gli sfasamenti spazio-temporali, persino di tipo relativistico se la rete è distribuita sulla faccia della Terra, presentano fenomeni propri di «dinamiche continue». Tuttavia, ovviamente, se si simula con l'aleatorio di reti o della concorrenza l'aleatorio *locale* dovuto alla fluttuazione termica in un doppio pendolo, si migliora enormemente l'imitazione discreta, ma, appunto, si continua a fare imitazione: non si coglie cioè quel che consideriamo *causa*, locale, inaccessibile alla misura, della variazione aleatoria. Ma già si fa meglio, importando nel discreto, che itera, l'aleatorio classico o relativistico dello spazio-tempo, che non itera.

Si osservi, per inciso, che Turing per due volte nell'articolo del '50 dice «la mia macchina è laplaciana» poiché, in essa, la determinazione implica la predittibilità – anche nelle macchine concrete insiste. E qui riprendiamo: la predizione è possibile, se non altro tramite l'iterazione, anche se trucchi ed astuzie, non inerenti alla teoria del calcolo sia sequenziale sia concorrente, possono ben imitare l'aleatorio. Invece il suo sistema per la morfogenesi del '52 è profondamente non-laplaciano – ed è la sua proprietà più importante, sottolinea Turing: la dinamica delle forme varia sempre, è deterministica ed imprevedibile, perché altamente sensibile alle condizioni al contorno.

Poiché più sopra ho parlato di microfisica, vorrei allora osservare che oggi si può arricchire un computer con dell'aleatorio proprio della Meccanica Quantistica, modificando così ancor più profondamente la natura di questi nostri calcolatori digitali, deterministici in senso laplaciano. Ovvero: oggi è possibile migliorare l'imitazione computazionale dell'aleatorio classico (i dadi, la moneta), con forme di aleatorio «intrinseco» grazie alla fisica quantistica. Si può comprare a Ginevra una scatoletta che produce 0,1 secondo lo *spin up* e lo *spin down* di un elettrone. In questo caso la teoria standard dice: la probabilità è «intrinseca», poiché è conseguenza teorica della misura quantistica, che è sempre un valore di probabilità, e del principio di indeterminazione proprio della fisica quantistica. Dal punto di vista dell'analisi della sequenza di 0 ed 1, la distribuzione di probabilità è analoga. Ma la differenza è radicale rispetto sia al calcolatore digitale classico, sia al lancio della moneta (le probabilità quantistiche sono «intricate» [2]). Si tratta allora di tre strutture della casualità diverse che possono al più somigliare per imitazioni reciproche possibili, ma null'altro.

4. Il calcolo, la fisica ed il vivente

Spero che tutto quanto abbiamo appena accennato, la natura dualistica ed alfabetica di queste macchine straordinarie, la specificità del loro regime causale, «laplaciano» come dice Turing, la differenza fra imitazione computazionale e modello fisico-matematico, aiuti a cogliere il ruolo immenso ma singolare dell'informatica nelle scienze.

Quando si vedono degli uomini che si muovono o delle cellule che si sviluppano in un contesto virtuale, spero che sia chiaro perché sembrano subito un po' strani. La dinamica delle immagini, il senso estetico direi, lo fa intuire di primo acchito: essi, al fondo, iterano e questo dà il senso di qualcosa di ... anti-estetico. Infatti sapete benissimo che, se fate *restart*, rifaranno esattamente gli stessi gesti, gli stessi identici movimenti (quando mai una folla di comparse o di monocellulari in normale agitazione, se li fate ripartire nel loro brodo di cultura, farebbe esattamente le stesse traiettorie, gli stessi identici movimenti?). Il creatore di realtà virtuale astuto, se glielo chiedete, imiterà la variazione fisica (ed animale) con trucchi vari (generatori pseudo-aleatori economici, classici, o sfasamenti temporali in *multi-tasking* e concorrenza), ma spesso non ci pensa ed il *restart* lo lascia di stucco. E non È questione, qui, di vivente e «volontà» o *similia*: ho visto di recente bellissime immagini virtuali di palline che si scontrano - ma... pigiato il tasto di *restart*, hanno ripercorso esattamente le stesse traiettorie, gli stessi urti, identici. Provate a far correre ed urtarsi un nugolo di palline, vere, fisiche: osserverete ogni volta una dinamica diversa (il programmatore ha subito migliorato l'imitazione in questione, con dell'aleatorio di rete).

Bisogna allora stare attenti, perché quel che cerco di raccontare è un problema evocativo, dell'immaginazione, di grande rilievo: si tratta del gioco fra rappresentazione, modello ed imitazione delle dinamiche, al cuore dell'intelligibilità scientifica e, direi, umana. Per non parlare poi dei movimenti umani che non sono palline e si complicano di una serie di altri elementi causali, come in tutto il vivente. Questo, per l'intelligibilità, è un problema enorme, non totalmente analizzato. La simulazione computazionale costa molto meno del fare un esperimento; così, tanti fisici rinunciano a fare esperimenti e lavorano solo ad implementazioni. La simulazione della turbolenza, che è un caso estremo di caos, permette di risparmiare sulle camere a vento e la sua stessa iterabilità è una ricchezza: il giudizio a vista, qualitativo, dell'esperto può richiedere più iterazioni per apprezzare il comportamento di un'ala d'aereo o una fusoliera; e piccole variazioni indotte danno un buon apprezzamento della sensibilità della dinamica (ma non si riesce ad analizzare ala e fusoliera assemblati: il virtuale in tal caso si allontana troppo dal fenomeno, troppo complesso).

Il dibattito in fisica al riguardo si sta approfondendo, con intelligenza: teoremi di stabilità o di *shadowing* (la traiettoria fisica o continua «segue» quella virtuale), in alcuni casi, pochi, esplicitano quel che ci insegnano le simulazioni discrete, le analogie e le differenze rispetto a processi che capiamo meglio con l'analisi del continuo non-lineare.

Per riassumere, nell'imitazione computazionale si può avere un distacco, molto originale, dal mondo, una possibile ricchezza, se viene ben capito: il mondo digitale è una straordinaria invenzione, di rilievo quanto ed in continuità con l'alfabeto, come dicevo. Ma dobbiamo saper stare nel nostro sapere, cogliere la sua originalità rispetto alla storia precedente o il modo in cui il nostro sapere ogni volta ci ripropone, diverso, uno sguardo sul mondo; come l'alfabeto, che non c'era prima della sua audacissima invenzione, il computer è una proposta totalmente originale dell'uomo, plasma il nostro modo di costruire la conoscenza, lo marca con la sua propria logica costitutiva, il suo proprio *regime causale*.

Siamo in grado oggi di costruire, per imitazione, strutture assolutamente fantastiche che, se del tutto statiche, sono veri modelli. Tuttavia, dev'essere chiaro che ogni volta che c'è un pò di dinamica, l'imitazione può differire totalmente dalla modellizzazione. Basta qualche elemento di una dinamica non-lineare o un po' di umano (o animale). Infatti, nelle dinamiche fisiche (e biologiche) interessa anche, e molto, la variazione; in particolare, la variazione al di sotto dell'osservabile, che modifica rapidamente anche i processi osservabili. Il computer, che ha un unico livello «intrinseco» di osservabilità, quello dell'arrotondamento digitale, proprio della sua struttura di dati discreta, non sa cogliere tale variazione che è quel che più conta nelle dinamiche sensibili, e per questo esso può iterare in maniera sempre identica.

Nell'imitazione del vivente il problema è particolarmente acuto. Se si fa l'animazione virtuale del vivente, si ha subito l'impressione di qualcosa che non va, come dicevo, perché la *variabilità* è al cuore del vivente, proprio come l'iterazione identica è al centro del calcolo digitale. Quel che conta nel vivente è che una cellula non è mai identica a una cellula madre; poi, selezione darwiniana. A livello cognitivo, mai un'azione è identica ad un'azione precedente, simile semmai, prossima, mai identica. Il divario in questo caso è particolarmente marcato, anche rispetto alla nozione fisica di variazione, poiché la variabilità include l'individuazione del vivente (la sua «specificità» rispetto alla «genericità» dell'oggetto sperimentale fisico [1]).

Sebbene nel vivente esista un frammento chimico molto rigido di memoria filogenetica, il DNA, esso è solo una componente della dinamica ontogenetica: insieme all'RNA ed alle interazioni non-lineari reciproche, è all'origine delle cascate proteiche che han luogo durante la mitosi, la meiosi e la embriogenesi, in una delle dinamiche più complesse e meno capite che si conoscano. Il DNA è una componente importantissima, ovviamente, dal punto di vista ereditario, ma, dalla struttura della cellula al contesto epigenetico, molto altro contribuisce all'ontogenesi; in particolare, una miriade di dinamiche irripetibili ed irreversibili, che sono al cuore della variabilità del vivente. Anche in questo caso il presunto alfabeto democriteo e la nozione di programma sono assolutamente insufficienti (*causalmente incompleti*, cfr. [6]) per capire la dinamica biologica, in cui, si diceva, processi non reversibili e non iterabili contribuiscono in modo essenziale a produrre la variabilità ontogenetica e filogenetica, senza le quali non ci sarebbe evoluzione, né, quindi, vita.

E qui vorrei insistere su una ulteriore distinzione e precisazione, che riguarda la difficoltà, più generale, di rendere intelligibile il vivente con i nostri, attuali strumenti matematici. La matematica è una scienza degli invarianti e delle trasformazioni che le preservano. Si comincia dalle rotazioni, traslazioni ed omotetie di Euclide che preservano le simmetrie, fino ai gruppi di trasformazioni ed i loro invarianti di Klein, come classificazioni delle diverse geometrie riemanniane (euclidea, ellittica, iperbolica). La Teoria (matematica) delle Categorie lo spiega bene, individuando oggetti (invarianti) e trasformazioni che li preservano (morfismi, funtori, trasformazioni naturali). La matematica del discreto, e quindi l'informatica, aggiunge a questo l'invarianza per iterazione, sorta di simmetria per traslazione temporale. Che dire quando si applica la matematica, così costruita, all'analisi del vivente? Dove trovare altrettanta stabilità concettuale e fisica? A livello fenomenico, il vivente esiste proprio per proprietà opposte, si diceva: accanto la «stabilità strutturale», la variabilità è forse l'invariante principale, senza di essa niente «deriva filogenetica», ovvero niente evoluzione. E neppure ontogenesi, con la variabilità e l'irrepetibilità dei processi pertinenti. La stabilità strutturale non ha le caratteristiche dell'invarianza matematica, malgrado i tentativi di René Thom di coglierla con gli strumenti della Teoria delle Singolarità (ed i successi nell'analisi della morfogenesi di alcuni organi, nella filotassi in particolare).

Lo sforzo che alcuni stanno facendo, compreso nel mio minuscolo gruppo di ricerca, è di individuare invarianti propri al vivente e poco descritti dalle attuali teorie fisico-matematiche. Ne parliamo nel libro citato, dove si mette l'accento su grandi invarianti temporali persino inter-specifici, nonché su una nozione derivata dalla fisica, ma impropria per le dinamiche fisiche note, quella di «stato critico esteso». Il vivente, congetturiamo e cerchiamo di esprimere con rigore, starebbe in una situazione «matematicamente singolare» – nel senso tecnico, usualmente puntuale in matematica, ed invece *estesa*, nel suo caso, ad uno spazio di misura non nulla, un intervallo spazio-temporale.

5. Ma... i processi naturali calcolano?

Facciamo di nuovo un passo indietro nella storia. Negli anni '30, a partire dai lavori di Herbrand e Gödel, numerosi sistemi formali per la calcolabilità hanno permesso di rendere rigorose le intuizioni dei padri fondatori della Logica Matematica (Peano e Hilbert fra gli altri): la certezza deduttiva della matematica è nella sua *potenziale meccanizzabilità*. Si trattava allora di associare alla deduzione formale, così chiaramente definita da Hilbert e dalla sua scuola, un'adeguata nozione matematica di *calcolo effettivo* o «potenzialmente meccanizzabile»; questo nell'ambito di sistemi basati sull'Aritmetica, che Frege e Hilbert avevano messo al cuore del progetto fondazionale e per buoni motivi: la crisi profonda che aveva sconvolto le certezze geometriche dello spazio euclideo.

Negli anni successivi, Church, Kleene ed altri proposero ulteriori sistemi logico-formali atti a cogliere questa nozione originariamente informale, la 'deduzione effettiva'. Tuttavia la svolta, premonitrice dell'Informatica, avviene negli anni '35-36: allora

Turing inventa la sua «macchina» astratta e Turing e Kleene dimostrano l'equivalenza dei diversi formalismi per il calcolo effettivo, tutti estensioni funzionali od insiemistiche dell'Aritmetica, ovviamente. Ma perché la Macchina di Turing (MdT), al di là della dimostrata universalità (invarianza) dei sistemi di calcolo, avrà un ruolo così importante negli sviluppi successivi dell'Informatica? In fondo, alcuni degli altri formalismi sono migliori, da molti punti di vista, e più interessanti dal punto di vista matematico.

Il lambda-calcolo di Church, ad esempio, possiede interessantissimi «teoremi propri» (Church-Rosser, Normalizzazione...) che correlano con rigore la nozione di calcolo a quella di prova formale – scopo di questi lavori (la prova certa è un calcolo effettivo, si diceva). La MdT invece non ha propri teoremi interessanti e se è utilizzata in dimostrazioni, di complessità ad esempio, ci si affretta a provare che esse sono indipendenti dal formalismo di calcolo scelto (modulo traduzioni «semplici»). Ma il sistema di Turing esprime meglio di chiunque altro cosa è il calcolo effettivo: è una scrittura-riscrittura del *numero* e delle stesse *regole* per il calcolo. La «Logical Computing Machine» – come la chiama l'autore nel '36 – scrive o cancella 0 od 1, sposta a destra o sinistra di un passo una testina di lettura-scrittura su di un nastro, cambiando ad ogni passo stato interno, sulla base di un insieme finito di istruzioni (ecco la distinzione, già menzionata, fra *hardware*, nastro e testina, e *software*, le istruzioni: scrivi-cancella, sposta a destra-sinistra, cambia stato).

Ispirato da Gödel, Turing codifica con 0 ed 1 le stesse istruzioni del calcolo: sul nastro si possono scrivere e *modificare* le istruzioni stesse. Una macchina sul cui nastro sono scritti istruzioni ed input ed è programmata per applicare le prime ai secondi, la Macchina Universale, sarà il modello dei moderni compilatori e sistemi operativi, in breve dell'Informatica ancora attuale. Per questo il suo rilievo matematico e pratico: l'esplicitazione del calcolo nelle sue componenti elementari e semplici, come trasformazione del numero e dei programmi sui numeri, anche essi codificati come numeri. E questo perché il *calcolo è la scrittura-riscrittura del numero*.

Che senso ha allora chiedersi se questo tavolo, una cascata, un fulmine, un grave che cade, un doppio pendolo, una corrente elettrica, un albero che cresce, una dinamica quantistica... un qualsiasi processo naturale, calcolano? Per farli calcolare bisogna, in primo luogo, decidere dove è l'input (quando inizia il calcolo) e dove termina (l'output), quindi associare a essi dei numeri. Ovvero, bisogna associare quegli stati/istanti prescelti a dei numeri con la *misura* fisica. Dai tempi di Poincaré e di Planck, torno a ricordare, abbiamo capito che questo processo, la misura, è di enorme rilievo in fisica: l'evoluzione di una dinamica caotica può *casualmente* dipendere da fluttuazioni o variazioni al di sotto della misura possibile; l'indeterminazione quantistica, una proprietà della misura, ha cambiato la microfisica. Credo che bisogna senz'altro dire, in prima approssimazione, che

nessun processo naturale calcola.

Siamo noi che con un percorso che va dall'invenzione del numero, radicata certo

su pratiche pre-umane, animali, del «piccolo-conteggio», quindi della scrittura del numero e di quella alfabetica che sola ha permesso di concepire la codifica numerica di lettere insignificanti (nei numerosissimi trattati di guerra cinesi non esiste ovviamente criptografia, presente già in Cesare o nella Kabalà biblica: al più si evocava un concetto al posto di un altro, per confondere il nemico non informato del gioco di ambiguità) siamo arrivati a questo capolavoro di dualismo cartesiano alfa-numerico che è la MdT.

Poi, siamo stati in grado di trasferire questa invenzione logico-matematica in macchine fisiche, in processi artificiali del tutto originali, che hanno la rara qualità, ottenuta con grande intelligenza grazie a valvole e transistor, diodi e chip, di evolvere a *stati discreti*. Così, ad ogni istante l'accesso ai dati è esatto, la misura è certa (e facile), non presenta i problemi delle dinamiche continue, come già osserva Turing, con lucidità rara, nel suo articolo del '50 (solo degli Intelligenti Artificiali potevano non cogliere il punto); né quelli dei processi quantistici. In breve, per «far calcolare» processi non laplaciani, dinamici o quantistici, bisogna effettuare misure e questo è una questione nodale in entrambe le teorie pertinenti. Il problema, enorme, della computazione quantistica (*Quantum Computing*) è proprio che *ciò che si calcola non è quel che si misura*; ovvero, l'evoluzione di un sistema, descritta ad esempio con le equazioni di Schrödinger e dunque calcolabile, avviene in spazi di Hilbert a valori complessi ed i calcoli formali, le somme ad esempio che esprimono la sovrapposizione quantistica, si effettuano sul campo dei numeri complessi; la misura, come valore di probabilità, avviene invece sul campo dei numeri reali, prendendo i moduli dei valori complessi e perdendo così la struttura stessa dell'intricazione. Sta qui la barriera concettuale che rende ancora non attuale l'uso numerico dei fenomeni di sovrapposizione o intricazione quantistica: siamo cioè ancora teoricamente lontani dall'ottenere, dopo la misura, risultati numerici (reali) che utilizzino appieno la non-separabilità quantistica (l'apporto originale della computazione quantistica).

È ovvio che alcuni processi, laplaciani ad esempio, permettono un'associazione facile ed efficace di numeri al processo e che quindi si può dire che essi «calcolano»; o che in chimica i processi d'interazione molecolare possono essere esaustivamente descritti da sistemi a «stati discreti» (atomo per atomo), tanto da rendere gran parte della chimica teorica un vero «sistema di riscrittura alfabetico». Ciò non toglie che il problema della misura, sfida della fisica moderna ed audacia inventiva dell'Informatica a stati discreti, che può non preoccuparsene al suo interno, è quel che dà un senso preciso ad elucubrazioni altrimenti vaghe sul calcolo e sulla natura: per associare un processo fisico ad un calcolo (numeri input/output), bisogna passare per la misura.

Ed è uno dei motivi dello scarso successo dei calcoli analogici. Nato prima della calcolabilità sul discreto alla Turing, l'Analizzatore Differenziale di V. Bush al M.I.T. era, ad esempio e sin dal 1931, uno splendido sistema di integrazione analogica (un po' come una superficie «calcola» l'integrale di una curva): fu poi sviluppato come il GPAC (*General Purpose Analog Computer*) da Shannon, nel 1944. Ma, di nuovo, l'approssimazione della misura, la scarsa efficacia del processo continuo soggiacente,

l'incertezza della iterabilità e portabilità, ne han bloccato gli sviluppi. E questo accompagnato, probabilmente, da altri motivi: l'efficacia della tecnologia digitale (la sua compressibilità e codificabilità svariata: come portare in analogico su un cavetto telefonico l'equivalente di 20 mb fornendo così TV digitale, Internet e telefono illimitato?), ma anche, forse, il pregiudizio aritmetico-linguistico. La certezza matematica è nell'Aritmetica, dicono tutti i fondazionalisti a partire da Frege; la conoscenza è nel linguaggio, dicono Frege ed i filosofi analitici, soprattutto dal podio di Vienna; il linguaggio, frantumato nell'alfabeto, lo si codifica in Aritmetica (Gödel e Turing). Ed il circolo virtuoso-vizioso si instaura egemone, escludendo il resto: Aritmetica - Linguaggio - Macchina (aritmetica) e ritorno.

Per tornare infine all'alfabeto, pensare che i processi naturali calcolano è come credere che, parlando, produciamo sequenze di lettere. È una visione «a fumetti» del linguaggio; fumetti occidentali, poichè i bambini cinesi certamente pensano che gli uomini producano ideogrammi, ovvero concetti e suoni, parlando, come nei loro fumetti. Ma in effetti emettiamo un canto continuo, scomposto dai nostri audacissimi antenati altamici in una notazione musicale-alfabetica, che ha incatenato l'un l'altro, grazie al fonema, scrittura e canto. Impresa estremamente convenzionale, pur con profonde radici storiche. Provate a trascrivere un grido o canto animale: nelle quattro lingue che mi vengono in mente, l'abbaiar del cane si trascrive come bau-bau, arf-arf, bu-bu, wuf-wuf. Eppure, ho constatato, i cani abbaiano nello stesso modo nei quattro paesi in questione. La trascrizione del Keshua, lingua andina solo parlata, è stata un'impresa ardua e molto contestata: nella trascrizione in lettere latine (e perché non arabe od ebraiche? Solo contingenza storica...) si forzano fonemi tipicamente spagnoli, plasmando, forzando in rotaie e di fatto trasformando una lingua dalla musicalità, ovviamente, molto originale. No, non produciamo lettere parlando, proprio come i processi naturali non producono numeri né calcolano e la *mediazione della misura* è un nodo cruciale. Il coglier questo punto è essenziale per fare il meglio possibile con la nostra umana e straordinaria invenzione logico-matematica e poi fisica, la macchina aritmetica a stati discreti, il calcolatore elettronico-digitale. E forse, cominciare a pensare alla ... prossima macchina.

6. Interludio mnemonico

Dopo eccessi di evocazioni matematiche, vorrei confortare il lettore con cenni, brevi e più informali, alla *memoria*. È una iattura che si usi la stessa parola per la memoria animale (umana) e le basi di dati digitali. Infatti la differenza è abissale. Quel che più conta nella memoria umana (ed animale) è ... l'*oblio*. L'oblio è costitutivo dell'invarianza e, quindi, dell'astrazione concettuale, perché con esso si dimenticano i dettagli, *quel che non conta*.

Mi spiego. Noi non ricordiamo un'immagine, un evento, pixel per pixel, esattamente. Il nostro sguardo o comprensione è, già a monte, *intenzionale*, ovvero ha una *visé*, un obiettivo di comprensione, di lettura del mondo, sempre attivo, e seleziona quel che va

ricordato, quel che interessa. Il nostro sguardo sul mondo è sempre un'ermeneutica. La memoria, poi, evoca, fa rivivere, ricostruendo, ogni volta in maniera diversa, fosse anche di poco, l'immagine, l'evento, selezionando, interpolando, interpretando, calcando quel tratto e non quell'altro. Mai la memoria ci rende esattamente, pixel per pixel, il vissuto. E, così, la memoria contribuisce ad astrarre «quel che conta» e propone, costituisce, degli invarianti, ovvero dei tratti, dei gesti, delle *gestalt*, e, poi, dei concetti relativamente stabili, che il linguaggio e la scrittura contribuiscono a rendere comuni ed a stabilizzare ulteriormente, a rendere relativamente indipendenti da trasformazioni dell'ecosistema. E ricostruisce, appunto, dimenticando gli elementi relativamente irrilevanti, irrilevanti cioè per i nostri scopi, defalcando l'inutile. Così, riconosciamo un compagno di scuola 30 anni dopo per ... il sorriso, che è un movimento, per un inclinarsi della testa, una piega che si forma sotto gli occhi quando parla. Tutte dinamiche, tutte di rilievo per il nostro antico rapporto affettivo. Pixel per pixel, quel viso non ha più nulla in comune con l'altro di 30 anni prima: dei movimenti, selezionati come invarianti per noi, intenzionalmente significativi, sono tutto quel che resta. Ma ci basta, anzi è quel che conta: l'aver dimenticato il viso esatto, in tal caso, è fondamentale per riconoscere, perché quel viso ed i suoi dettagli non ci sono più. E questo è l'opposto della memoria digitale, che deve essere esatta: guai se, aprendo un *file* un anno dopo, una virgola fosse fuori posto, guai se ritrovando una pagina web lontana, essa risultasse *scrambled* da una imperfezione di memorizzazione o di comunicazione.

In informatica tutto si fa perché le basi di dati (e la comunicazione) siano esatte, pixel per pixel. Il web (internet), questa straordinaria «memoria» dell'umanità, potenzialmente a disposizione dell'umanità tutta, deve essere esatta: questa è la sua forza. Ovviamente anche il web è dinamico e «dimenticante»: siti compaiono e scompaiono, vengono cambiati. Ma questo per l'intervento umano: la rete di macchine, in sé, *deve* avere una memoria esatta, perfetta. L'opposto della dinamica intenzionale, selettiva, costitutiva e di significato ed invarianza, nella variabilità, nella dimenticanza attiva, che è la memoria animale, in cui l'oblio del dettaglio irrilevante contribuisce a costruire l'invariante che conta, l'intelligibilità stessa del mondo. L'interesse straordinario del web è proprio nel complementare, per la sua originalità di invenzione umana, a mio avviso importante almeno come l'invenzione della stampa, l'oblio e la dinamica della nostra memoria animale – memoria che già, nell'uomo, il linguaggio, la scrittura e la stampa hanno immensamente arricchito, contribuendo alla sua stabilizzazione.

7. Conclusione: questione di principi

In questa breve presentazione si è cercato di mettere in evidenza alcuni «principi» o elementi fondazionali che presiedono a grandi opzioni matematiche nell'intelligibilità dei fenomeni naturali. Considerato lo scopo della chiaccherata, orientata soprattutto all'Informatica, non si è potuto discutere con cura sufficiente del rapporto diretto e fecondissimo fra matematica e fisica, anche se esso era sempre sullo sfondo del raffronto. In particolare, si è appena accennato alla comunanza dei grandi principi di costruzione concettuale, fra fisica e matematica, che giustificano la ragionevolissima efficacia della matematica in fisica (sono, per così dire, «co-costituite»). E solo questa analisi permette meglio di cogliere i limiti della modellizzazione matematica o informatica in biologia, anche per andare avanti, forse con idee (e strutture concettuali) nuove.

L'individuazione di principi d'ordine o di simmetria, in matematica, o la messa in evidenza del ruolo pervasivo, in fisica, del principio geodetico, come facciamo in [1], va sviluppata proprio per cogliere quel che «c'è dietro» e che unifica o distingue interi rami del sapere, le scelte di metodo e strumenti, esplicite ed implicite, il costituirsi del loro significato o «l'origine», in senso spesso più concettuale che storico, ma anche storico. E questo semmai per *mettere in discussione* questi stessi principi, se necessario e se può portare a rendere intelligibili altri frammenti del mondo.

Certo, da un lato, capire che da Euclide a Riemann e Connes (il grande della geometria della Meccanica Quantistica contemporanea), principi comuni di costruzione, sulla base dell'accesso e la misura allo spazio (dal corpo rigido all'algebra matriciale di Heisenberg, cui fa riferimento Connes), ne fondano l'organizzazione geometrica, rafforza il senso di ciascuna delle teorie corrispondenti, pur cogliendo i cambiamenti radicali di sguardo che ognuno di questi approcci ha saputo proporre; nello stesso modo, mettere in evidenza che il principio geodetico può rendere intelligibile un percorso che va da Copernico e Keplero alle equazioni di Schrödinger (derivabili dall'ottimalità hamiltoniana, come le equazioni di Newton) fa cogliere, in un sol colpo d'occhio, la forza della proposta teorica in fisica moderna, nelle sue svolte successive. D'altro lato, l'operazione «fondazionale» che pure conta per noi è questa riflessione sui principi di ciascuna scienza; «fare un passo di lato», guardarli in prospettiva, anche per rimmetterli in discussione, in particolare nel rivolgersi ad altri ambiti scientifici.

È quel che facciamo, del resto, osservando, nel libro con Bailly, come la «traiettorie» filogenetiche (e, in parte, ontogenetiche) del vivente, non vanno più capite come «specifiche» (geodetiche) ma come «generiche» (dei possibili dell'evoluzione), mentre è piuttosto l'individuo vivente che è «specifico». In altri termini, in fisica l'oggetto (sperimentale) è generico (un grave, un fotone ... può essere rimpiazzato, nella teoria e nelle esperienze da qualsiasi altro) e segue «traiettorie» specifiche (geodetiche critiche), l'opposto in biologia. Questa è una dualità con la fisica che permette di cogliere la necessità di una teoria propria del vivente, che arricchisca i sottostanti principi fisici – che ovviamente pure partecipano della intelligibilità del vivente. È proprio l'analisi

fondazionale condotta nel libro che consente di sottolineare la forza ed i limiti del quadro teorico fisico-matematico, nonché informatico, il suo non esser assoluto, le frontiere della sua universalità. Un quadro quindi tutto da ripensare al di fuori dei suoi ambiti di costruzione storica: il felicissimo rapporto fra fisica e matematica.

Lo scopo di una analisi fondazionale non è certo, oggi, quello dei padri fondatori che cercavano certezze in periodi di grandi crisi dei fondamenti, in particolare di crollo dello spazio-tempo assoluto euclideo, uno scopo quindi fortemente giustificato cento anni fa (i filosofi logicisti ancora in giro rivelano piuttosto tratti psicotici nella loro ricerca delle «cetrezze incrollabili») e, poi, altrettanto giustamente messo in questione da tanti, compreso il secondo Wittgenstein. L'obiettivo è piuttosto quello di praticare un'«etica» della conoscenza, per andare avanti: il dovere di ogni ricercatore di esplicitare i grandi *principi organizzatori* del proprio sapere, di rifletterci criticamente, per fare meglio, soprattutto nel rivolgersi ad altri ambiti scientifici, dove possono essere insufficienti per capire o venir messi in discussione, anche radicalmente, come è accaduto sia in Relatività sia in Meccanica Quantistica. Questo è il senso dell'universalità dinamica propria del sapere scientifico, ben diversa da ogni forma di assoluto.

In particolare, bisogna fare attenzione a queste immagini straordinarie che propone la macchina a stati discreti: sono ricche di conoscenza, ma danno un'immagine del mondo profondamente ancorato ai principi della rappresentazione/riduzione alfabetica ed ancor più all'atomismo, al dualismo e all'iterabilità, oggi insufficienti a capire i processi fisici ed ancor meno quelli del vivente. Tuttavia la scienza contemporanea, con la sua ricchezza e forza, non potrebbe esistere senza la simulazione digitale e, in generale, senza l'apporto dell'Informatica: per questo bisogna sviluppare un'analisi scientifica di ciò che essa ci dice, esattamente, lasciando da parte, come furon rapidamente dimenticati i pupazzi meccanici di Vaucanson, miti di un Universo computazionale, cervelli-calcolatori digitali, «programmi» genetici ed altre proiezioni sui fenomeni dell'ultima tecnologia disponibile, lettura del mondo sempre più ridicola e meccanica con il suo iterarsi nei secoli.

NOTE

* Testo della *Lezione Galileiana* tenuta a Pisa il 25 ottobre 2006, per Pianeta Galileo. L'autore desidera ringraziare i promotori di questi incontri, un'occasione di scambio e di cultura, uno sforzo organizzativo notevole per promuovere la diffusione della scienza *in fieri*.

** cfr. <http://www.di.ens.fr/users/longo>.

¹ Si veda l'articolo di Cappuccio nel volume *Géométrie et Cognition* - le relative indicazioni bibliografiche sono reperibili sulla mia pagina web.

² La nozione di caos deterministico è matematicamente molto solida e ha... 110 anni (Poincaré), anche se le definizioni moderne datano dagli anni '60-'70. Esse si riassumono così: un sistema fisico deterministico (ovvero che consideriamo determinato o determinabile da un numero finito di equazioni, come un doppio pendolo, il sistema planetario, una moneta lanciata in un campo gravitazionale su una superficie matematicamente descrivibile...) è caotico quando è «topologicamente transitivo» (esistono orbite dense – ovvero che vanno ovunque consentito dai vincoli), ha un «insieme denso di punti periodici» ed è «sensibile alle condizioni iniziali», proprietà che possono essere descritte con rigore matematico (per inciso, tutti e tre i sistemi di cui sopra sono tali: anche il sistema solare, assicurano risultati recenti - si vedano i riferimenti più sotto). Dal punto di vista delle immagini, l'attrattore di un sistema non lineare anche in una dimensione (una equazione, come $x_{n+1} = 4x_n(1-x_n)$), evoca proprio quel che anche Platone chiamerebbe «caos» (sovrapporsi di linee o punti, ascillazioni «assurde»...). Non è quindi un ossimoro, malgrado molta volgarizzazione estremamente... volgare, bensì matematica solidissima. Grande strumento di intelligibilità, fa capire l'aleatorio classico (da distinguere da quello quantistico, si veda [2]), come determinazione che *non implica* la predittibilità (né l'iterabilità: un processo classico è aleatorio quando, iterato *nelle stesse condizioni iniziali*, non segue la stessa «traiettoria»); è la grande svolta rispetto alla congettura di Laplace, per il quale «la determinazione implica la predittibilità».

³ Un'eccellente implementazione è in <http://www.mathstat.dal.ca/~selinger/lagrange1/doublependulum.html>.

⁴ Scaricabili dalla mia pagina web.

⁵ In [1] si evidenzia il ruolo delle simmetrie e loro rotture nell'analisi della causalità fisica.

⁶ Si veda [5] per riferimenti ed ulteriori riflessioni.

⁷ Si veda la nota 4.

⁸ Si veda la nota 4.

⁹ Si veda il libro di Pour-El e Richards, citato in [3].

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bailly F., Longo G., *Mathématiques et sciences de la nature. La singularité physique du vivant*. Hermann, Parigi 2006 (l'introduzione e l'indice, in inglese e francese, sono scaricabili da <http://www.di.ens.fr/users/longo>, al pari di altri testi menzionati).
- [2] Bailly F., Longo G., Randomness and determination in the interplay between the continuum and the discrete, di prossima pubblicazione sulla rivista *Mathematical Structures in Computer Science*, 2007.
- [3] Hoyrup M., Kolcak A., Longo G. Computability and the morphological complexity of some dynamics on continuous domains, di prossima pubblicazione sulla rivista *Theoretical Computer Science*, 2007.
- [4] Longo G., Computer modelling and natural phenomena, *European Software Engineering Conference and ACM SIGSOFT Symposium*, September 1-5, Helsinki, 2003.
- [5] Longo G., Laplace, Turing and the 'imitation game' impossible geometry: randomness, determinism and programs in Turing's test, in *The Turing Test Sourcebook*, a cura di R. Epstein, G. Roberts e G. Beber, Kluwer, Dordrecht 2007. (versione francese su *Intellectica*, 35/2, 2002b, scaricabile dal sito su indicato).
- [6] Longo G., Tendero P.-E., L'alphabet, la Machine et l'ADN: l'incomplétude causale de la théorie de la programmation en biologie moléculaire, Atti del convegno su *Logique, informatique et biologie*, Nizza, 2005, di prossima pubblicazione presso De Boeck, Parigi 2007 (e, in italiano, su *Naturalmente*; una versione inglese, più breve, è pure scaricabile da sito su indicato).