

SIMMETRIA E FISICA*

ELENA CASTELLANI

Dipartimento di Filosofia, Università di Firenze

1. Il concetto di simmetria

La simmetria ha oggi una posizione del tutto centrale nella descrizione, spiegazione e previsione dei fenomeni naturali. Dalla chimica alla biologia, dalla fisica microscopica alla cosmologia, la ricerca scientifica ricorre in modo rilevante a considerazioni, principi e metodi basati su proprietà di simmetria. Nella fisica delle particelle elementari, in particolare, l'applicazione di principi di simmetria e il correlato uso delle tecniche della teoria dei gruppi di simmetria hanno raggiunto una tale rilevanza che le teorie fisiche fondamentali possono essere considerate come vere e proprie "teorie di simmetria".

Ma in che senso, innanzitutto, la simmetria è usata oggi nella scienza? Il termine *simmetria* può essere inteso in diversi modi. Nel linguaggio ordinario, il termine è normalmente usato per indicare una certa "armonia di proporzioni" oppure una determinata "relazione d'uguaglianza" tra più elementi. Queste due accezioni comuni rispecchiano, di fatto, l'esistenza di due principali nozioni di simmetria: una *nozione antica*, che è quella dei Greci e dei Latini ed è strettamente legata ai concetti di proporzione e armonia; e una *nozione moderna*, che comincia a definirsi all'inizio del XVII secolo a partire dal concetto di distribuzione regolare di elementi uguali nello spazio: dal primo significato di "rapporto d'uguaglianza tra parti contrapposte", a quello di "invarianza rispetto a operazioni di scambio tra parti uguali", per arrivare, infine, alla definizione più generale di "invarianza rispetto a un gruppo di trasformazioni"¹. Quest'ultima definizione in termini gruppali è alla base della particolare rilevanza assunta dalla simmetria nella scienza contemporanea. La natura grupale della simmetria – più precisamente, il fatto che le operazioni di simmetria formano un *gruppo di trasformazioni* – ha infatti reso possibile l'estensione dei risultati e delle tecniche della teoria dei gruppi alle considerazioni relative a situazioni di simmetria: uno sviluppo che si è rivelato straordinariamente fecondo nella scienza e in particolare nell'indagine fisica del nostro secolo.

Nel senso di invarianza rispetto a un gruppo di trasformazioni, la simmetria può essere riferita sia a configurazioni familiari come le figure dello spazio ordinario, sia a configurazioni più astratte come le relazioni ed espressioni di natura matematica. Nella fisica, è come proprietà di "oggetti" di questo secondo genere, e più precisamente come proprietà delle equazioni fondamentali delle teorie fisiche – le equazioni dinamiche co-

* Lezione/incontro tenuta a Firenze il 18 novembre 2009, presso l'Auditorium del Consiglio Regionale della Toscana, nell'ambito dell'edizione 2009 di *Pianeta Galileo*.

munemente note come “leggi della natura” – che la simmetria è diventata un concetto fondamentale. Sulle simmetrie delle leggi fisiche, o semplicemente *simmetrie fisiche*, si fonda in buona parte l’attuale visione del mondo fisico e dei suoi ultimi costituenti: sono queste le simmetrie la cui presenza nella nostra descrizione della natura richiede una spiegazione o, se si vuole, una interpretazione.

2. I diversi tipi di simmetrie fisiche

Nella fisica contemporanea, le proprietà d’invarianza delle leggi fisiche sono postulate attraverso *principi*, noti comunemente come “principi di simmetria” o “principi d’invarianza”. Il primo principio a essere stato esplicitamente formulato come principio d’invarianza è il *principio della relatività speciale*, attraverso il quale Einstein stabiliva, nel 1905, l’invarianza delle leggi fisiche rispetto a cambiamenti di sistemi di riferimento inerziali, vale a dire rispetto alle trasformazioni del cosiddetto “gruppo di Lorentz inhomogeneo” (noto anche come “gruppo di Poincaré”). Dai primi lavori di Einstein sulla relatività alle più recenti teorie quantistiche dei campi, la storia dell’applicazione dei principi di simmetria all’indagine fisica coincide in larga parte con la storia della stessa fisica teorica: basti pensare alla formulazione della *relatività generale*, all’introduzione delle *simmetrie quantistiche* (in seguito all’estensione della teoria dei gruppi di simmetria all’ambito della meccanica quantistica), e all’elaborazione delle *teorie di gauge*, le teorie di campo fondate sulle cosiddette “simmetrie di gauge” e attraverso le quali si descrivono, oggi, le particelle fondamentali e le loro interazioni.

Allo stato attuale della conoscenza fisica, le simmetrie utilizzate nelle teorie fondamentali sono dei seguenti tipi:

- le simmetrie *spazio-temporali*: simmetrie spazio-temporali di tipo “continuo”, come quelle postulate nella teoria della relatività, e simmetrie dello spazio e del tempo “discrete”, come la simmetria di *riflessione spaziale* (o *parità*) e la simmetria di *inversione temporale*;
- la simmetria di *coniugazione di carica* o simmetria tra particelle e antiparticelle;
- la *simmetria di scambio* tra particelle dello stesso tipo (le cosiddette “particelle identiche”), collegata alle statistiche quantistiche di Bose-Einstein e Fermi-Dirac;
- le *simmetrie interne unitarie*: simmetrie relative a spazi “interni” (cioè di natura diversa dallo spazio-tempo), descritte nei termini dei gruppi SU(N) di trasformazioni unitarie, di natura globale o locale (le simmetrie interne locali sono note anche come *simmetrie di gauge*);
- la *supersimmetria*, o simmetria di scambio tra particelle bosoniche e particelle fermioniche, la cui versione locale è nota come *supergravità*;
- le *simmetrie di dualità*, al cuore delle teorie di stringa.

Le simmetrie spazio-temporali continue hanno radici lontane nel pensiero scientifico: l'omogeneità (simmetria di traslazione) e l'isotropia (simmetria di rotazione) dello spazio, al pari dell'uniformità del tempo (simmetria di traslazione temporale), sono proprietà presupposte in molte delle teorie sulla natura elaborate dal XVII secolo in poi; le osservazioni di Galileo sull'equivalenza, per le esperienze di meccanica, tra gli stati di quiete e gli stati di moto uniforme non sono altro che una prima formulazione dell'invarianza delle leggi della fisica rispetto alle trasformazioni di velocità uniforme. Le simmetrie spazio-temporali hanno inoltre un carattere universale, nel senso che valgono (o devono valere) per tutte le leggi della natura; il che è anche connesso al fatto che queste simmetrie delle leggi fisiche sono allo stesso tempo simmetrie della struttura spazio-temporale degli eventi fisici.

Non hanno invece un carattere così generale gli altri tipi di simmetrie successivamente postulate nella fisica contemporanea. Si tratta di simmetrie senza precedenti nella storia della fisica, introdotte nell'ambito dell'indagine sul mondo atomico e subatomico essenzialmente ai fini della spiegazione di determinati fenomeni e, spesso, sulla base di analogie esistenti con situazioni di simmetria già note. Sono per la maggior parte simmetrie che valgono solo per specifiche forme d'interazione fisica, e per questo chiamate *simmetrie dinamiche*, secondo la denominazione proposta da Eugene Wigner per distinguerle dalle simmetrie dello spazio-tempo o *simmetrie geometriche* [7, pp. 17-27, 31-36, 42-45].

Tutte queste forme di simmetria hanno un determinato significato e uno specifico ruolo nei contesti fisici in cui sono applicate. Ciò non implica, tuttavia, che non si possano individuare degli aspetti comuni – in particolare, delle *funzioni* comuni – nella loro applicazione all'indagine dei fenomeni naturali.

3. Le funzioni delle simmetrie fisiche

Tra le funzioni delle simmetrie fisiche, la più evidente e conosciuta è senz'altro la *funzione classificatoria*. La simmetria, nel suo senso moderno, è strettamente legata a nozioni come quelle di equivalenza, classe e gruppo. La possibilità che ne deriva di classificare oggetti sulla base delle loro proprietà di simmetria è all'origine delle prime forme di applicazione esplicita della nozione nella scienza moderna: dalle classificazioni delle forme dei cristalli – gli oggetti naturali che più si distinguono per l'evidenza e la ricchezza delle loro proprietà di simmetria – allo sviluppo di una vera e propria “teoria della simmetria”, come può essere chiamato la classificazione sistematica di tutti i possibili tipi di configurazioni simmetriche².

Per quanto riguarda le simmetrie fisiche, un esempio paradigmatico di questa funzione classificatoria è rappresentato dalla classificazione delle *particelle elementari* attraverso lo studio delle *rappresentazioni irriducibili* dei gruppi di simmetria fondamentali (dove il carattere irriducibile delle rappresentazioni corrisponde a quello elementare delle particelle). Come venne dimostrato dal fisico Eugene Wigner in un suo noto lavoro del 1939, le particelle elementari possono essere poste in corrispondenza con

le rappresentazioni irriducibili dei gruppi di simmetria delle teorie che ne descrivono il comportamento: con la conseguente possibilità di derivare, in questo modo, le proprietà che caratterizzano in modo essenziale il tipo (o la classe) di particelle considerate, cioè quelle proprietà invarianti o “intrinseche” come la massa, lo spin o la carica elettrica, che nel formalismo quantistico sono espresse dai “numeri quantici”.

Quando la classificazione, in base a simmetrie, è tale da includere tutte le proprietà essenziali per caratterizzare un certo tipo di oggetto fisico (per esempio, tutti i numeri quantici necessari per caratterizzare un certo tipo di particella), si può anche parlare di una *funzione definitoria* delle simmetrie fisiche. Non si tratta, in sostanza, di nient'altro che della possibilità di definire entità sulla base di come si trasformano sotto l'azione di determinati gruppi, una procedura molto comune in campo matematico. Tale funzione definitoria si rivela di particolare utilità nel caso di oggetti come le particelle della microfisica, cioè oggetti che sono lontani dalla nostra esperienza quotidiana e ai quali non si applica la concezione classica di oggetto fisico.

Le simmetrie sono spesso usate come vincoli nelle teorie fisiche, e in questo senso possono svolgere una *funzione normativa*. L'assunzione di principi di simmetria comporta infatti condizioni molto forti sulla descrizione dei sistemi fisici e del loro comportamento: dalle restrizioni sulla forma delle equazioni dinamiche alle «regole di selezione» (come sono chiamati i vincoli sulle possibili transizioni tra stati), ai vincoli sulle modalità di trasformazioni degli stessi enti fisici. Questa funzione normativa si rivela particolarmente utile quando ad essere soggette a tali vincoli siano 'entità' ancora da determinare: le condizioni di simmetria, in tal caso, ci permettono di ricavare quali sono, tra tutte le possibili, le entità permesse (quali sono, per esempio, le transizioni permesse o le forme consentite delle equazioni dinamiche). In alcune situazioni si arriva addirittura a una *funzione determinante* delle simmetrie fisiche, nel senso che è possibile determinare del tutto la forma di un'equazione sulla base dei soli vincoli di simmetria: come succede, per esempio, nel caso di sistemi fisici che non sono soggetti a interazione.

Le numerose e significative conseguenze che derivano dall'assunzione di principi di simmetria offrono una chiave di spiegazione per molti fenomeni fisici. Le stesse condizioni di simmetria sopra ricordate – condizioni sulle equazioni dinamiche e sulle loro soluzioni – forniscono già un esempio in questo senso: la presenza di vincoli dovuti a simmetrie fornisce una spiegazione del perché certi fenomeni possono (o non possono) accadere. Il risultato di maggior rilievo su cui si fonda questa *funzione esplicativa* delle simmetrie fisiche è la connessione che può essere stabilita tra le simmetrie delle equazioni dinamiche e le *leggi di conservazione* della fisica³. Sulla base di questo risultato e altri “strumenti concettuali” come il *principio di gauge*, il meccanismo della *rottura spontanea della simmetria* e le tecniche di *unificazione* dei gruppi di simmetria, le simmetrie fisiche acquistano un grande potere esplicativo: basti pensare che la struttura della tavola periodica degli elementi, la forma degli spettri atomici e nucleari e le stesse modalità d'interazione degli ultimi componenti della materia possono essere tutti spiegati, in un certo senso, come conseguenze di principi di simmetria.

Il trattamento “gruppale” delle simmetrie fisiche, con la conseguente possibilità di un’unificazione di simmetrie diverse tramite l’unificazione dei corrispondenti gruppi di trasformazioni, fornisce un adeguato supporto tecnico a un’importante funzione che da sempre ha accompagnato l’uso delle simmetrie nella descrizione della natura e cioè la *funzione unificatrice*. Questa funzione, alla quale è generalmente legata anche una *funzione semplificatrice* delle simmetrie, si esplica sia sul piano della “metafisica influente” delle teorie sia sul piano della elaborazione formale. Ciò è ben illustrato da uno dei programmi dominanti dell’attuale ricerca fisica: il programma di unificazione delle forze della natura attraverso l’unificazione dei corrispondenti gruppi di simmetria, che si fonda appunto sulla possibilità d’interpretare tutte le teorie d’interazione fisica come teorie di simmetria locale. L’antica idea dell’unità della natura viene così riproposta, con gli strumenti della teoria dei gruppi e nel linguaggio della teoria dei campi, nella forma di una descrizione unitaria dei fenomeni fisici fondamentali, la cosiddetta «Teoria del Tutto».

Le simmetrie fisiche possono assumere, in vari casi, un valore decisamente euristico. Si è visto come, sulla base di considerazioni di simmetria, sia possibile prevedere l’occorrenza o meno di certi fenomeni e, più in generale, l’evolversi di determinate situazioni fisiche; e come, di conseguenza, gli stessi principi di simmetria assumano una funzione di guida per la formulazione di nuove equazioni dinamiche o leggi fisiche. Ma la *funzione euristica* delle simmetrie fisiche non si esaurisce qui: si pensi alla possibilità di prevedere l’esistenza di nuovi oggetti fisici – particelle che compongono la materia e campi d’interazione – che segue, in qualche modo, dall’assunzione di simmetrie nella descrizione fisica. L’esistenza di nuove particelle può essere inferita, per esempio, dalla presenza di posti vacanti negli schemi di classificazione fondati su proprietà di simmetria, come successe nel 1962 con la previsione della particella Ω^- a partire dallo schema di classificazione per gli adroni noto come *Via dell’Ottetto*. Questa stessa classificazione adronica, inoltre, è all’origine della famosa ipotesi dell’esistenza dei *quark*. Oltre alle classificazioni, alla possibilità di prevedere nuove entità fisiche hanno condotto anche sviluppi teorici fondati sulle simmetrie fisiche come, per esempio, l’interpretazione delle teorie d’interazione come *teorie di gauge* (con la conseguente introduzione di nuovi campi di gauge per mediare certe tipi d’interazione) e il conseguente programma di unificazione delle forze della natura: come illustra in modo esemplare la previsione nel 1967 delle particelle W e Z^0 (poi effettivamente osservate nel 1983) nel contesto della teoria di gauge proposta per l’unificazione delle interazioni debole ed elettromagnetica e nota come *modello di Weinberg e Salam*.

Infine, per la rilevanza che hanno assunto nelle teorie fisiche contemporanee, le simmetrie consentono un nuovo punto di vista per discutere tradizionali problemi della riflessione filosofica sulla scienza. Questioni come quelle relative alla struttura delle teorie fisiche, alle relazioni tra teorie e alla natura del progresso scientifico possono essere tutte riformulate, in parte, prendendo in considerazione il ruolo dei gruppi di simmetria e dei rapporti inter-gruppali.

4. L'interpretazione delle simmetrie fisiche

Le diverse e importanti funzioni descritte testimoniano la rilevanza assunta dalla simmetria nella fisica contemporanea. Ma perché la simmetria può occupare una posizione così centrale nella nostra descrizione della natura? La rilevanza delle simmetrie fisiche sembra richiedere una spiegazione. La simmetria non è altro che una suggestiva idea, che ricorre nel pensiero scientifico e che grazie agli strumenti della teoria dei gruppi ha trovato la sua adeguata traduzione nel formalismo matematico delle teorie fisiche, o c'è qualcosa di più? L'efficacia delle "tecniche di simmetria" nella fisica è dovuta solo alla potenza dei metodi e strumenti della teoria dei gruppi, o riposa anche su altre ragioni?

Nella letteratura, si trovano due principali gruppi di risposte a questo genere di domande: a) risposte di natura fisico-matematica, come quelle che giustificano il successo dei metodi di simmetria sulla base di puri risultati matematici, o quelle che spiegano le simmetrie delle equazioni dinamiche come conseguenze di altri aspetti delle leggi fisiche; e b) risposte di natura più generale, che prendono in considerazione anche gli aspetti filosofici del problema dell'interpretazione delle simmetrie fisiche. Da questo punto di vista più generale, la domanda che si pone in relazione alle simmetrie fisiche è in sostanza la seguente: le simmetrie sono proprietà che si trovano nel mondo fisico o si tratta solo di efficaci "strumenti concettuali" attraverso i quali ci orientiamo nello studio dei fenomeni naturali? In breve: le simmetrie fanno parte della natura o appartengono alle teorie? Corrispondentemente, si possono individuare due tipi principali di posizioni: le posizioni che attribuiscono le simmetrie al mondo fisico, che si possono chiamare *interpretazioni di tipo realistico*, e le posizioni secondo cui le simmetrie stanno dalla parte delle teorie, che si possono chiamare *interpretazioni di tipo epistemico*.

4.1 Le interpretazioni di tipo realistico

Secondo le interpretazioni di tipo realistico, le simmetrie fanno parte della natura, cioè rappresentano proprietà che si riscontrano effettivamente nel mondo fisico, e questa è la vera ragione del successo delle "teorie di simmetria" nella fisica contemporanea.

Una delle principali motivazioni per le posizioni di tipo realistico sulle simmetrie è la possibilità d'interpretare le invarianze delle leggi della natura come proprietà della struttura del mondo fisico. Ciò vale innanzitutto nel caso delle invarianze delle leggi fisiche rispetto alle trasformazioni spazio-temporali continue, cioè nel caso delle simmetrie postulate dalla teoria della relatività. Tali simmetrie delle leggi, infatti, possono essere tutte messe in corrispondenza con caratteristiche di simmetria della stessa struttura spazio-temporale del mondo fisico: si tratta, in altre parole, di proprietà della geometria del mondo fisico, e per questo chiamate "simmetrie geometriche"⁴. Di un'interpretazione geometrica in senso lato – tramite il ricorso a spazi di natura diversa dallo spazio-tempo o "spazio esterno" – possono essere suscettibili anche altri tipi di simmetrie, dalle simmetrie "discrete" a quelle "interne": ma al prezzo di una concezione della realtà fisica che è di un carattere sempre più astratto e lontano da quanto noi possiamo più o meno direttamente esperire.

Se le simmetrie fanno parte della natura, esiste una precisa ragione per questa loro presenza e per il fatto che noi arriviamo a conoscerle o scoprirle? I sostenitori di una posizione realistica devono fare i conti con tali questioni. Le risposte che vengono date più comunemente si fondano su argomenti di natura biologico-evoluzionistica: come l'argomento (basato sul molto controverso "principio antropico") in accordo al quale le simmetrie devono esserci in quanto sono necessarie per l'esistenza stessa dell'uomo che le osserva, o l'argomento per cui noi possiamo scoprire le simmetrie della natura perché a questo ha portato l'evoluzione del nostro cervello in un universo che obbedisce alle leggi fisiche.

4.2 Le interpretazioni di tipo epistemico

Secondo le interpretazioni di tipo epistemico, le simmetrie fisiche hanno essenzialmente che fare con le modalità della nostra conoscenza dei fenomeni naturali: a) come condizioni sulla natura o addirittura la possibilità di tale conoscenza, o b) come espressione di limiti inerenti al nostro modo di procedere nell'indagine dei fenomeni naturali.

a) L'interpretazione di tipo epistemico più comune è quella centrata sulla connessione tra *simmetria* e *oggettività*. Anche in questo caso, il punto di partenza è costituito da considerazioni relative alle simmetrie spazio-temporali. Nello spirito della teoria della relatività, l'invarianza delle leggi fisiche rispetto alle trasformazioni spazio-temporali esprime l'invarianza rispetto a cambiamenti dei sistemi di riferimento o osservatori. Su questa base, è piuttosto naturale porre le invarianze spazio-temporali in rapporto con un criterio di *oggettività* (nel senso ristretto di *validità intersoggettiva*) della descrizione fisica: le leggi attraverso cui descriviamo l'evoluzione dei sistemi fisici hanno valore oggettivo in quanto non cambiano da un osservatore all'altro. L'antica e comune idea che ciò che è oggettivo non debba dipendere da fattori contingenti (come, per esempio, la particolare prospettiva dell'osservatore) viene così ad essere riformulata nei seguenti termini: oggettivo è ciò che è invariante rispetto al gruppo di trasformazioni dei sistemi di riferimento, oppure, parafrasando il fisico e matematico Hermann Weyl, «oggettività significa invarianza rispetto al gruppo di simmetria dello spazio-tempo» [6, p. 136].

Le simmetrie spazio-temporali possono essere messe in rapporto con una condizione ancora più forte per quanto riguarda la conoscenza fisica. Secondo la concezione sviluppata in particolare da Wigner, le simmetrie spazio-temporali possono assumere il significato di prerequisiti per la possibilità stessa di conoscere le leggi della natura. Come Wigner sostiene a più riprese nelle sue riflessioni sulle simmetrie fisiche, se le correlazioni tra gli eventi fisici variassero a seconda della posizione o orientazione del sistema di riferimento, oppure da istante a istante, sarebbe impossibile la stessa fisica come *scienza* [5, p. 29]. I principi di simmetria acquistano così il significato di "superleggi", che forniscono «struttura e coerenza alle leggi della natura esattamente come le leggi della natura forniscono struttura e coerenza all'insieme degli eventi» [5, p. 17]. Questa struttura gerarchica della conoscenza fisica – dagli eventi alle leggi della natura e dalle leggi della natura ai principi d'invarianza – è per Wigner legata a un fattore

d'ignoranza: poiché non siamo onniscienti, ci serviamo di principi regolativi sia per gli eventi sia per le loro leggi. Mentre per Wigner il significato dei principi di simmetria come condizioni di possibilità per una descrizione del mondo fisico in termini di leggi è dunque *relativo* allo stato attuale della nostra conoscenza, non manca chi ha voluto conferire un valore *assoluto* a tale significato, attribuendo ai principi di simmetria spazio-temporali lo statuto di principi trascendentali o principi a priori della conoscenza fisica.

Che le simmetrie fisiche siano collegate a una condizione di validità intersoggettiva della conoscenza fisica o a un prerequisito per la possibilità stessa d'una descrizione fisica in termini di leggi, in entrambi i casi si tratta di posizioni fondate sull'equivalenza dei sistemi di riferimento spazio-temporali per la formulazione delle leggi della natura. Ma che senso vengono allora ad avere queste posizioni nel caso di simmetrie che non sono di natura spazio-temporale e che quindi non possono essere messe in relazione con l'equivalenza dei sistemi di riferimento?

b) Una interpretazione di tipo epistemico che, a differenza delle precedenti, può valere per tutte le diverse forme di simmetria è quella che riconduce le simmetrie fisiche alla presenza di *fattori irrilevanti* nella nostra descrizione della natura. All'origine di questa interpretazione è ancora la connessione tra le nozioni di simmetria ed equivalenza, ma intesa, questa volta, nel suo senso più generale. infatti nella natura stessa della nozione di simmetria di esprimere una situazione di equivalenza (indistinguibilità, indifferenza) tra un dato numero di elementi: gli elementi di un insieme con proprietà di simmetria che sono trasformati l'uno nell'altro dalle operazioni di simmetria sono tra loro equivalenti (rispetto al contesto considerato). Nella fisica, è piuttosto usuale interpretare la presenza di elementi equivalenti corrispondente a una situazione di simmetria in termini di *irrilevanza*: per cui, ad esempio, l'equivalenza dei punti dello spazio (simmetria di traslazione spaziale) viene posta in relazione con l'irrilevanza, per la descrizione fisica, di una "posizione assoluta", oppure, per prendere un caso meno familiare, l'equivalenza tra particelle microscopiche dello stesso tipo (espressa dalla "simmetria di scambio") viene interpretata nel senso dell'irrilevanza, per la fisica quantistica, di una distinzione tra le cosiddette "particelle identiche". In quest'ottica, le simmetrie fisiche vengono quindi ad essere collegate ai limiti o alle peculiarità del nostro modo di procedere: nel descrivere il mondo fisico introduciamo – in genere per ignoranza – degli elementi irrilevanti (relativamente al contesto considerato), che poi, utilizzando le simmetrie e gli strumenti matematici ad esse legate, riusciamo a individuare come tali e ad eliminare dalle teorie. Come diceva il fisico Paul Adrien Maurice Dirac: «le leggi fondamentali [della natura] controllano un sostrato del quale non ci possiamo formare un'immagine mentale senza introdurre fattori irrilevanti. La formulazione di queste leggi richiede la matematica delle trasformazioni» [3, p. VII].

L'irrilevanza (per la descrizione fisica) di una distinzione tra gli elementi equivalenti di una situazione di simmetria può anche essere intesa nel senso della impossibilità di osservare, di fatto, una differenza tra gli elementi equivalenti. Da questo punto di

vista, la presenza di simmetrie viene ad essere posta in relazione al carattere *non osservabile* di determinate grandezze: simmetrie come per esempio quelle di traslazione e rotazione spaziale vengono a corrispondere all'impossibilità di osservare, nell'ordine, una posizione assoluta e una direzione assoluta; la simmetria di traslazione temporale viene a corrispondere all'impossibilità di osservare un istante assoluto; la simmetria di gauge dell'elettromagnetismo viene a corrispondere all'impossibilità di osservare la "fase" assoluta di un campo carico; e così via. Si arriva così all'interpretazione per cui «la radice di tutti i principi di simmetria consiste nell'assunzione dell'impossibilità di osservare determinate grandezze fondamentali», come afferma, per esempio, il fisico Lee [4, p. 178]. Corollario naturale di questa posizione è l'interpretazione della *rottura di simmetria* in termini di *osservabilità*: la scoperta della violazione (rottura) di una simmetria – come nel noto caso della scoperta della violazione della *parità* (simmetria destra-sinistra) da parte delle interazioni deboli sulla base di un lavoro del 1956 di Yang e dello stesso Lee – viene a indicare il fatto che un elemento prima ritenuto inosservabile può essere invece osservato.

Questa interpretazione in termini di (*non*) *osservabilità* ha il suo precedente storico nell'interpretazione della teoria della relatività come liberazione della fisica da entità non osservabili quali il moto, lo spazio e il tempo assoluti. L'idea di fondo è che gli elementi irrilevanti corrispondenti a una situazione di simmetria costituiscano una "struttura teorica superflua", la cui eliminazione non comporta differenze osservabili ed è quindi auspicabile. Tale concezione, per quanto possa sembrare naturale, si fonda tuttavia su una identificazione tra irrilevante e inosservabile che non è per nulla ovvia: una cosa è per esempio affermare che la particolare collocazione nello spazio del sistema di riferimento non è rilevante per la formulazione di una legge fisica, un'altra cosa è sostenere l'impossibilità di osservare, di fatto, una posizione assoluta.

5. Una questione aperta

Che cosa rappresentano, in definitiva, le simmetrie fisiche? Proprietà della natura, strumenti concettuali, l'espressione di condizioni di oggettività o di strutture teoriche superflue?

Come si è visto, nel riflettere sul ruolo e significato delle simmetrie nelle teorie fisiche contemporanee ci si trova a riflettere sulle metodologie, strategie e, in definitiva, sul significato stesso della scienza fisica. Da una parte, le simmetrie sono diventate uno degli ingredienti di base della ricerca fisica, acquistando una posizione centrale nell'elaborazione e controllo delle teorie fondamentali e fornendo lo strumento ideale per il programma di una progressiva unificazione teorica. Dall'altra parte, le simmetrie fisiche hanno anche un'importante funzione epistemologica. Sulla base del ruolo delle simmetrie, si aprono nuovi punti di vista per la discussione di tradizionali questioni della filosofia della scienza, come quelle dei rapporti tra le teorie o della natura degli oggetti fisici; ma, soprattutto, discutendo del significato delle simmetrie fisiche si arriva a trattare di questioni come la realtà o meno di ciò di cui parlano le teorie, i criteri di

oggettività e le condizioni di possibilità della conoscenza fisica, i limiti inerenti al nostro modo di procedere nella descrizione del mondo dei fenomeni e l'impossibilità di osservare determinate grandezze.

In definitiva: la questione interpretativa a cui danno origine le simmetrie fisiche non è facilmente risolvibile, ma questo perché coinvolge inevitabilmente una riflessione di carattere più generale sul significato e i metodi della stessa scienza fisica.

NOTE

¹ Per un'analisi più dettagliata di questi diversi significati assunti dal termine "simmetria" nel corso della sua storia, e in generale per una trattazione più approfondita degli argomenti presentati in questo lavoro mi permetto di rimandare a [1] e [2].

² Una notevole illustrazione di tutte le possibili classificazioni della teoria della simmetria è rappresentata da [5].

³ La connessione, sancita in forma esplicita nel 1918 da un noto teorema della matematica tedesca Emmy Noether, mette in rapporto le invarianze delle equazioni dinamiche rispetto a determinati gruppi di trasformazioni con la conservazione (invarianza nel tempo) di determinate grandezze: per cui, per esempio, all'invarianza dell'equazione dinamica rispetto alle traslazioni temporali è connessa la conservazione dell'energia, all'invarianza rispetto alle traslazioni spaziali è connessa la conservazioni dell'impulso, all'invarianza rispetto alle rotazioni è connessa la conservazioni del momento angolare.

⁴ Si pensi alla corrispondenza dell'invarianza delle leggi fisiche per traslazione delle coordinate spaziali con l'equivalenza di tutti i punti dello spazio (proprietà di omogeneità dello spazio), dell'invarianza delle leggi fisiche per rotazioni spaziali con l'equivalenza di tutte le direzioni (isotropia dello spazio), dell'invarianza per traslazioni temporali con l'equivalenza degli istanti di tempo (uniformità del tempo). Le trasformazioni di velocità uniforme possono anch'esse essere interpretate in termini geometrici, e precisamente come operazione di rotazione, ma in uno spazio quadridimensionale: lo spazio-tempo di Minkowski.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Brading, K., Castellani, E. (a cura di), *Symmetries in physics. Philosophical reflections*, Cambridge University Press, Cambridge 2003.
- [2] Castellani, E., *Simmetria e natura. Dall'armonia delle figure all'invarianza delle leggi*, Laterza, Roma-Bari 1999.
- [3] Dirac, P. A. M., *The Principles of quantum mechanics* [1930], Oxford University Press, Oxford 1958.
- [4] Lee, T. D., *Particle physics and introduction to field theory*, Harwood, New York 1988.
- [5] Shubnikov, A. V. , Koptsik, V. A., *Symmetry in science and art*, Plenum Press, London 1974.
- [6] Weyl, H., *La simmetria*, Feltrinelli, Milano 1962 (ed. originale *Symmetry*, Princeton University Press, Princeton 1952).
- [7] Wigner, E. P., *Symmetries and reflections*, Indiana University Press, Bloomington 1967.