

Democrito

Dice la Ragione: «Solo in apparenza una cosa è dolce o amara, solo in apparenza è calda o fredda, solo in apparenza ha un colore; in realtà esistono solo gli atomi e lo spazio vuoto.»

Rispondono i Sensi: «Povero intelletto! Tu che stai prendendo la tua evidenza da noi, stai cercando di spodestarci? La tua vittoria sarà la tua rovina!»

(Democrito, fr. 125)

Boltzmann

Se per spiegazione meccanica della natura intendiamo quella che poggia sulle leggi della meccanica usuale, dobbiamo allora dichiarare che è del tutto incerta la possibilità che l'atomismo del futuro continui ad essere una spiegazione meccanica della natura. Si può parlare, per lo meno in senso metaforico, di teoria meccanica, ma solo a condizione che si abbia sempre a che fare con il compito di stabilire le leggi più semplici possibili per la variazione nel tempo di molti oggetti singoli in un complesso che probabilmente ha tre dimensioni. . . . Che poi le leggi . . . debbano essere chiamate meccaniche o meno, è interamente una questione di gusto.

Critiche a Boltzmann

1. A partire dal 1872, anno della pubblicazione del primo lavoro di grande respiro di Boltzmann sulla spiegazione meccanica dell'irreversibilità, varie critiche sono state mosse alla spiegazione meccanica della natura.
2. È in qualche modo sorprendente che le critiche del passato e del presente non entrino nel merito dell'analisi, andando, per così dire, alla ricerca dell'eventuale errore tecnico, ma si limitino ad affermare che in qualche modo, da qualche parte, Boltzmann ha commesso un errore.
3. In effetti, chi entrò nel merito di alcune difficoltà dell'articolo del 1872 fu lo stesso Boltzmann, che, abbandonando alcune condizioni restrittive della formulazione originaria, negli anni successivi elaborò lo schema generale per la spiegazione dei processi naturali irreversibili sulla base di leggi microscopiche reversibili.

4. È interessante osservare che una situazione analoga si è venuta a creare con la teoria della selezione naturale di Darwin, che nel passato è stata spesso rifiutata sulla base di pregiudizi, e ancora oggi non è raro che qualcuno riprenda l'antica e del tutto immotivata argomentazione della circolarità della spiegazione dei processi biologici fornita da Darwin.
5. Analoga situazione si è venuta a creare in tempi molto recenti con la formulazione di Bohm del 1952 della meccanica quantistica: anche in questo caso le critiche non sono mai entrate nel merito, ma si sono limitate a stabilire che, sulla base di teoremi generali, in qualche modo, da qualche parte, Bohm aveva commesso un errore. I teoremi generali in questione sono i cosiddetti teoremi di non-esistenza delle variabili nascoste, che, alla luce del contro-esempio fornito dalla formulazione di Bohm, dimostrano solo l'insensatezza delle loro ipotesi.

6. L'obiezione alla spiegazione fornita da Boltzmann è principalmente un'obiezione di principio a *qualunque* spiegazione dei fenomeni irreversibili che si osservano in natura basata su leggi microscopiche reversibili, siano esse le leggi newtoniane per gli atomi o le leggi quantistiche per i quark o le corde supersimmetriche.
7. Si sostiene che poiché i processi naturali sono irreversibili, il processo che si ottiene per inversione del tempo, cioè con l'ordine dei fotogrammi invertito, non si realizza in natura; quindi c'è una contraddizione tra il carattere reversibile delle leggi microscopiche e quello irreversibile dei fenomeni naturali.
8. Questa obiezione fu per la prima volta sollevata da Loschmidt, amico fidato e mentore di Boltzmann. Ma la critica fu sposata anche da altri eminenti fisici e filosofi contemporanei di Boltzmann come Ernst Mach e Wilhelm Ostwald. A queste critiche Boltzmann rispose puntualmente, come risulta dal seguente passo:

Dal fatto che le equazioni differenziali della meccanica sono lasciate invariate da un cambiamento del segno del tempo, Herr Ostwald conclude che la visione meccanica del mondo non può spiegare perché i processi naturali si svolgono preferenzialmente in una definita direzione temporale. Mi sembra invece che questo punto di vista trascuri che gli eventi meccanici sono determinati non solo da equazioni differenziali, ma anche da condizioni iniziali. In diretto contrasto con Herr Ostwald, ho chiamato una delle più brillanti conferme della visione meccanica della Natura il fatto che questa fornisca una straordinariamente buona descrizione della dissipazione dell'energia, a patto che si assuma che il mondo incominciò in uno stato iniziale soddisfacente certe condizioni iniziali.

9. La fallacia dell'obiezione nasce da un completo fraintendimento del ruolo delle leggi fisiche nella spiegazione di ciò che accade nel mondo. Le leggi fisiche non ci dicono che cosa c'è nel mondo e come evolve, ma sono *sempre* del tipo: «date certe *condizioni iniziali* succede questo e questo».
10. Le leggi della fisica sono compatibili con una moltitudine di fatti possibili, ad esempio sono compatibili con una storia del mondo senza la Terra o il Sole o un mondo in cui nessuna molecola di DNA si è mai formata. C'è una quantità sterminata di processi fisici possibili che non si realizzano nell'universo in cui viviamo, e non si vede quindi perché ci debba essere una contraddizione tra il fatto che certi processi — come l'inversione temporale dell'espansione del gas — non si realizzano e il carattere reversibile delle leggi.

11. Non c'è nessuna contraddizione, e il fatto risulta ovvio se si tiene presente che *qualunque* spiegazione di fatti che accadono nel mondo si basa su *leggi fisiche* e *condizioni iniziali*. In altre parole, l'*explicans* si basa su due premesse differenti: *leggi universali* e *condizioni particolari*. A questo riguardo, è anche utile ricordare che non c'è nessuna ragione per la quale un dato processo, corrispondente ad una data condizione iniziale, abbia la simmetria delle leggi che lo governano; se così fosse, poiché le leggi della fisica sono invarianti per rotazioni, dovremmo essere tutti delle sfere.

12. Un'altra critica, quella di Zermelo, ebbe una certa risonanza anche grazie a Poincaré, che la diffuse e la sostenne presso matematici e fisici. Zermelo, indicò un'altra ragione per l'esistenza di soluzioni anti-termodinamiche: il teorema di ricorrenza di Poincaré, secondo cui la schiacciante maggioranza delle condizioni iniziali corrispondenti al macrostato iniziale ritorneranno prima o poi al macrostato di partenza. Zermelo argomentò che poiché il comportamento anti-termodinamico è tanto consistente con le leggi microscopiche quanto quello termodinamico, *nessuno* dei due può essere spiegato da queste leggi.

13. Secondo Prigogine, Boltzmann fu obbligato a concludere che l'irreversibilità postulata dalla termodinamica era incompatibile con le leggi reversibili della dinamica, una cosa che Boltzmann non si sognò mai di fare, come risulta chiaramente dalla sua risposta ad Ostwald. Contrariamente a quello che Prigogine ritiene, lo schema generale di Boltzmann regge alle obiezioni dei critici di ieri e di oggi. A questo riguardo è utile citare un passo della risposta di Boltzmann a Zermelo:

Ho ...enfaticizzato che dal punto di vista molecolare la seconda legge della termodinamica è meramente una legge statistica. L'articolo di Zermelo mostra che i miei scritti sono stati fraintesi; ...il teorema di Poincaré, che Zermelo spiega all'inizio del suo articolo, è chiaramente corretto, ma la sua applicazione alla teoria del calore non lo è. ...Perciò, quando Zermelo conclude dal fatto teorico che i [macro]stati iniziali del gas si ripresenteranno in futuro — senza avere calcolato quanto tempo questo richieda — che le ipotesi della teoria dei gas devono essere respinte oppure cambiate in maniera fondamentale, egli è come il giocatore di dadi che ha calcolato che la probabilità di una successione di cento 1 non è zero, e allora conclude che il dado deve essere truccato perché non ha ancora osservato tale successione!

14. La risposta di Boltzmann a Zermelo riecheggia le parole di Galileo: «Gli errori dunque non consistono né nell'astratto né nel concreto, né nella geometria o nella fisica, ma nel calcolatore, che non sa fare i conti giusti.» Boltzmann calcolò il tempo medio necessario al ritorno nel macrostato di partenza e trovò un valore dell'ordine di $10^{10^{23}}$; il lettore può facilmente rendersi conto che non è necessario specificare l'unità di misura, secondi, micro-secondi o anni, tanto non fa differenza. La spaventosa lunghezza di questo tempo è conseguenza dell'enorme numero di atomi che compongono un sistema macroscopico e questo tempo è di innumerevoli ordini di grandezza superiore all'età dell'Universo. Non c'è quindi contraddizione tra il teorema di Poincaré, un'indubitabile teorema di meccanica, e la spiegazione dell'irreversibilità fornita da Boltzmann, c'è semplicemente una totale discrepanza di scale temporali: da un lato le scale temporali rilevanti dei fenomeni irreversibili del mondo che ci circonda e a cui la spiegazione di Boltzmann si applica, dall'altro la scala irrilevante del tempo di ritorno di Poincaré.

15. Inoltre, il riferimento di Boltzmann al carattere statistico della seconda legge della termodinamica consiste in questo: esistono eccezioni al corretto comportamento termodinamico a cui corrisponde una diminuzione dell'entropia dell'universo, un insieme, per così dire, di *cattive condizioni iniziali* (che ad esempio potrebbero comportare un tempo di ritorno confrontabile con il tempo di rilassamento del sistema), ma queste eccezioni sono straordinariamente rare ed esigue, molto più rare della successione di cento 1 a cui Boltzmann fa riferimento. In effetti, gli argomenti di Loschmidt e Zermelo non fanno altro che mostrare che tale insieme di cattive condizioni iniziali *deve* esistere. Tuttavia, l'esistenza di questo insieme non costituisce un problema: affinché la visione meccanica della Natura «fornisca una straordinariamente buona descrizione della dissipazione dell'energia » non è necessario richiedere che tutti i microstati iniziali X_0 corrispondenti al macrostato iniziale evolvano nel macrostato finale di equilibrio corrispondente all'ultimo fotogramma. È sufficiente che questo sia vero per la schiacciante maggioranza delle condizioni iniziali.

16. Infine, per quel che riguarda il ruolo delle condizioni iniziali, c'è un'osservazione da fare, che va nella direzione opposta di chi assurdamamente vorrebbe che la simmetria delle leggi fosse anche una simmetria delle possibili storie del mondo che originano da una data condizione iniziale. Una volta capito che *qualunque* spiegazione si deve basare su leggi universali e condizioni iniziali, il vero problema è che sono troppe le cose che possono essere spiegate in termini di appropriate condizioni iniziali. Ad esempio, il fatto che una scimmia, battendo a caso sulla tastiera di un computer, possa riscrivere tutta la *Divina Commedia* di Dante, potrebbe essere spiegato in termini di condizioni iniziali appropriate. Ma questo ricorso innaturale alle condizioni iniziali non è presente nella spiegazione fornita da Boltzmann: è la *schacciante maggioranza* — e non una minoranza esigua o speciale — dei microstati associati al macrostato iniziale ad evolvere nella maniera termodinamica corretta.

Calcolo della spiegazione

1. ONTOLOGIA PRIMITIVA
2. LEGGI FISICHE
3. TIPICITÀ

Ontologia primitiva

1. La “spiegazione meccanica della natura”, nel senso di Boltzmann, suggerisce alcune considerazioni che riguardano il *ruolo* e la *natura ontologica* delle entità teoriche che compaiono in una teoria fisica.
2. Quando nuove entità teoriche sono introdotte in una teoria, l'importanza fisica di queste entità, il loro significato stesso, nella misura in cui la fisica è interessata, risulta dal loro *ruolo dinamico*, dal ruolo che giocano nell'evoluzione temporale delle entità o variabili dinamiche più primitive, più familiari e meno astratte. Per esempio, nell'elettrodinamica classica il significato del campo elettromagnetico deriva solamente dall'equazione della forza di Lorentz, cioè dal ruolo del campo nel governare l'evoluzione delle posizioni delle particelle cariche, con la specificazione delle forze, agenti su queste particelle, a cui il campo dà origine; mentre nella relatività generale una simile considerazione può essere fatta per il tensore metrico gravitazionale.

3. Chiameremo *ontologia primitiva* ciò che fundamentalmente esiste secondo la teoria: in meccanica classica, gli atomi, descritti ad ogni istante dalle loro posizioni nello spazio. È l'ontologia primitiva a fornirci l'immagine del mondo a livello fondamentale. Gli altri enti teorici che vengono postulati nella teoria svolgono il ruolo, in qualche modo ausiliario, di determinare la formulazione di una legge dinamica per l'evoluzione delle variabili primitive. Ad esempio, il ruolo della quantità di moto è primariamente quello di permettere la formulazione di una ben definita legge di evoluzione per la posizione e la stessa nozione astratta di stato, come punto nello spazio della fasi, acquista rilevanza fisica nella misura in cui la sua evoluzione nello spazio delle fasi determina nello spazio fisico tridimensionale l'evoluzione delle particelle che compongono il sistema, cioè la storia spazio-temporale della configurazione degli atomi.

4. Sembrerà strano che si sottolinei con così tanta enfasi questo fatto. Non si tratta forse di un'ovvietà che viene insegnata nel primo giorno di un corso elementare di meccanica? Non risale forse a Galileo e a Newton l'idea che la meccanica riguardi proprio le leggi per determinare le leggi orarie, cioè le storie dei corpi che si muovono nello spazio? La ragione per ribadire questa ovvietà è duplice: da un lato, per evitare i fraintendimenti riguardanti il significato dell'invarianza canonica (la simmetria tra posizione e impulso della meccanica hamiltoniana); dall'altro, perché è opinione diffusa che la meccanica quantistica ci abbia costretto ad abbandonare lo schema di Galileo e Newton secondo cui le leggi della fisica governano un mondo esterno oggettivamente dato e indipendente da noi; una delle interpretazioni più accreditate della meccanica quantistica sembra persino suggerire che il realismo scientifico tradizionale sia infantile e non scientifico.

5. Fu il fisico John Bell a sottolineare che una teoria fisica debba basata su *strutture spazio-temporali locali*, per le quali coniò il nome di *beables locali*. La terminologia di Bell è intraducibile in italiano: è un gioco di parole che nasce dall'abuso dei fisici della parola inglese *observable*, che significa osservabile, ciò che è osservabile e misurabile negli esperimenti. "Beable" sta per "be-able", ciò che potrebbe esistere, il che ci ricorda anche che la metafisica dovrebbe avere un carattere empirico, poiché ciò che esiste nel mondo fisico si deve basare sull'evidenza empirica. Sebbene il nome di Bell sia correttamente associato alla dimostrazione che la natura è non locale da un punto di vista filosofico è importante questa sua sottolineatura che qualunque spiegazione di ciò che accade nel mondo fisico debba essere ricondotta alle beables locali, cioè, nella nostra terminologia, all'ontologia primitiva della teoria.

6. Una precisazione. Per non appesantire la discussione abbiamo scelto di adottare una finzione puramente meccanica, secondo cui fissate tutte le posizioni degli atomi e le loro velocità ad un dato istante, la loro storia risulta completamente determinata. Abbiamo cioè implicitamente assunto che la legge dinamica possa essere completamente formulata in termini di posizioni e velocità degli atomi (e che qualunque interazione tra gli atomi possa essere espressa in termini di energia potenziale). Ma questo, a rigore, non è vero: se si fissano le posizioni e velocità ad un dato istante di N cariche elettriche, la loro storia *non* risulta determinata, occorre specificare anche il valore dei campi elettromagnetici. In altre parole, per potere esprimere in modo *semplice e naturale* la legge che regola il moto delle variabili primitive, cioè le posizioni delle cariche, è necessario introdurre altre variabili— i campi elettromagnetici — e specificare quali siano le loro leggi del moto.

Proprietà

1. Identifichiamo una proprietà macroscopica con una caratteristica di ciò che esiste fondamentalmente secondo la teoria, cioè la storia spazio-temporale della sua ontologia primitiva. Riguardando le storie possibili come “individui”, consideriamo una proprietà \mathcal{P} che una storia può avere; l'insieme di storie che godono di questa proprietà rappresenta, estensionalmente, la proprietà stessa.
2. Poiché l'informazione riguardante la storia è codificata da un punto nello spazio delle fasi (le condizioni iniziali della storia), ad un insieme di storie corrisponde biunivocamente, *fissate le leggi del movimento*, un sottoinsieme dello spazio delle fasi. Quindi una proprietà risulta in corrispondenza con un sottoinsieme dello spazio delle fasi, che denoteremo, con abuso di notazione, con lo stesso simbolo \mathcal{P} . Il che ci riporta alla nozione di macrostato come insieme di microstati macroscopicamente simili, cioè caratterizzati dalle stesse proprietà macroscopiche.

3. Le variabili macroscopiche, come temperatura, pressione, grado di elasticità, etc., sono funzioni sullo spazio delle fasi che rendono possibile una caratterizzazione quantitativa delle proprietà macroscopiche che un corpo possiede. Ad ogni valore y_i della variabile macroscopica

$$Y = f(X)$$

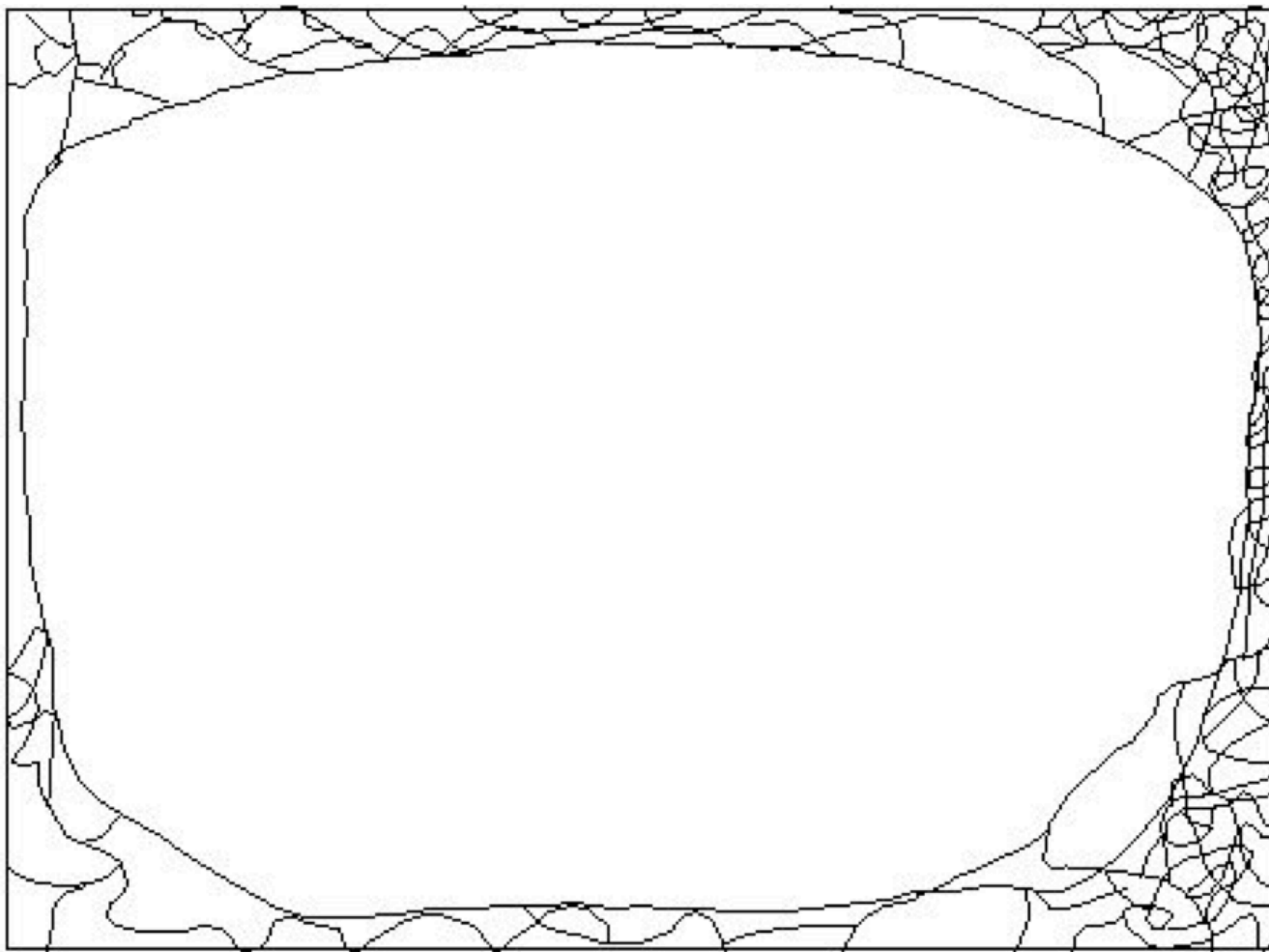
corrisponde la regione dello spazio delle fasi

$$M_i = f^{-1}(y_i)$$

che descrive la proprietà

«LA VARIABILE Y HA IL VALORE y_i ».

Le proprietà macroscopiche dei corpi risultano quindi determinate da leggi generali (le leggi del movimento) e da fatti contingenti che riguardano la loro storia (le condizioni iniziali).



4. Ad esempio, la temperatura T di un corpo non è altro che l'energia cinetica totale dei suoi atomi (divisa per il numero N di atomi), una ben definita funzione delle velocità istantanee degli atomi $\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_N$ e dunque del microstato X in cui, ad un dato tempo, il corpo si trova. In formule:

$$T = \frac{1}{\kappa_B} \frac{1}{N} \sum_1^N \frac{1}{2} m \mathbf{v}_i^2$$

dove κ_B è la costante di Boltzmann. La temperatura descrive una ben definita proprietà macroscopica: dire che un corpo ha, ad esempio, una temperatura di 300 gradi Kelvin, significa che il microstato del corpo è uno dei microstati a cui corrisponde questo valore di temperatura. In altre parole, la proprietà di avere una temperatura di 300 gradi Kelvin è rappresentata da un ben definito sottoinsieme dello spazio delle fasi.

5. In generale, la situazione è la seguente: data una variabile termodinamica $Y = f(X)$, senza perdita di generalità possiamo assumere che i suoi valori possibili formino un insieme discreto, ad esempio siano multipli della quantità minima che può essere rivelata dagli apparati macroscopici di misura; ad ogni valore y_i di Y corrisponde la regione dello spazio delle fasi $M_i = f^{-1}(y_i)$ che descrive la proprietà «LA VARIABILE Y HA IL VALORE y_i ». Al variare dei valori che la variabile può assumere si ottiene così una partizione dello spazio delle fasi in insiemi disgiunti, cioè si ha

$$\Omega = \bigcup_i M_i$$

6. Se invece di una sola variabile termodinamica si considera una famiglia di variabili termodinamiche, niente di sostanziale cambia: in questo caso Y rappresenta una lista di variabili, Y_1, Y_2, \dots , ed f denota una lista di funzioni f_1, f_2, \dots . Sia come sia, si arriva alla stesse conclusioni: *le proprietà macroscopiche sono rappresentate da sottoinsiemi dello spazio delle fasi*, o, detto in altri termini, la nozione di *macro-stato* è matematicamente rappresentata da un insieme di microstati. Inoltre, quando un corpo è in uno stato di equilibrio termodinamico le variabili termodinamiche assumono valori ben definiti (determinati dalla struttura microscopica del corpo e dai vincoli macroscopici a cui il corpo è soggetto). Questo macrostato è rappresentato da un sottoinsieme dello spazio delle fasi che denoteremo con M_E .
7. Nella sterminata classe di possibili funzioni $Y = f(X)$ che possiamo concepire, le variabili termodinamiche si differenziano per essere, in qualche modo, speciali.

8. In primo luogo, sono *medie statistiche*, cioè sono, come la temperatura, tipicamente della forma

$$Y = \frac{1}{N} \sum_i Y_i,$$

dove le variabili Y_i sono del tipo $Y_i = f_i(X)$, per scelta opportuna delle funzioni f_i , e hanno la proprietà di essere in qualche modo indipendenti (o “debolmente” dipendenti). La pressione, ad esempio, è di questa forma ed è la *forza media* (per unità di tempo) che gli atomi esercitano, in conseguenza dei loro urti, su ogni unità di superficie delle pareti del recipiente che li contiene.

9. In secondo luogo, le variabili termodinamiche, sono funzioni *molti-a-uno* (in verità, moltissimi-a-uno!), cioè esiste un'enorme quantità di microstati che sono associati allo stesso valore della variabile. In altre parole, $M_i = f^{-1}(y_i)$ è un insieme che contiene molti punti dello spazio delle fasi.

Riduzionismo e Sopravvenienza

1. Riassumendo: secondo la “spiegazione meccanica della natura”, una proprietà macroscopica \mathcal{P} è identificata con una caratteristica di ciò che esiste fondamentalmente secondo la teoria, cioè con un’opportuna caratteristica della storia spazio-temporale dell’ontologia primitiva della teoria. Ad esempio, la temperatura è identificata con l’energia cinetica media degli atomi. A sua volta — in meccanica classica — la storia spazio-temporale degli atomi è codificata da un punto nello spazio delle fasi (le sue condizioni iniziali). Dunque le proprietà macroscopiche dei corpi risultano determinate da leggi generali (le leggi del movimento) e da fatti contingenti che riguardano la loro storia (le condizioni iniziali).

2. Questa dipendenza delle proprietà macroscopiche dalle caratteristiche microscopiche può essere espressa come “sopravvenienza logica”, intendendo con questo, grosso modo, che non è logicamente possibile concepire due mondi che abbiano proprietà macroscopiche diverse, ma stesse caratteristiche microscopiche. Sebbene questa terminologia sia oggi d’uso corrente in filosofia, l’accordo non è unanime. Il senso a cui noi facciamo riferimento è quello specificato da Chalmers, in particolare per quel che riguarda la distinzione tra sopravvenienza logica e naturale. Questa distinzione è molto importante e non prestarle la dovuta attenzione può portare a grossolani fraintendimenti.

3. La sopravvenienza logica esprime una dipendenza forte: nella metafora di Dio che crea il mondo, significa che una volta che Dio ha fissato i fatti microscopici, le proprietà macroscopiche sono “gratis”: Dio non deve fare alcuno sforzo in più e creare “nuove” proprietà del mondo, si tratta semplicemente di “leggere” i fatti microscopici. In questo modo va intesa l’affermazione che la temperatura è — nel senso che è identificata con — l’energia cinetica degli atomi. La sopravvenienza naturale, al contrario, richiede un ulteriore sforzo: Dio deve aggiungere “nuove proprietà” alla natura, proprietà che non possono essere lette direttamente dai fatti microscopici. Questa distinzione gioca un ruolo importante nel problema mente-corpo.

4. La sopravvenienza logica implica una riduzione forte delle proprietà macroscopiche ai fatti microscopici — la temperatura è energia cinetica. Tuttavia, è importante comprendere che questa riduzione non comporta, di per sé, abbracciare la causa del riduzionismo ingenuo, secondo cui la spiegazione di un fenomeno è davvero soddisfacente soltanto quando essa è ricondotta completamente ai fatti microscopici.

5. In primo luogo, non è detto che una spiegazione riduzionistica sia sempre possibile, e, nel caso lo sia, che sia anche *illuminante*. Infatti, la sopravvenienza delle proprietà macroscopiche su quelle microscopiche non esclude che fatti microscopici profondamente diversi comportino le stesse proprietà macroscopiche. Questo è in effetti quello che accade quando il resoconto dei fatti microscopici è fatto con teorie quantistiche, dove si possono contemplare strutture ontologiche completamente diverse a cui corrispondono esattamente e perfettamente le stesse previsioni per tutti gli esperimenti e quindi la stessa assegnazione di proprietà macroscopiche. Inoltre, i fatti microscopici contingenti che determinano le proprietà di ciò che esiste nel mondo non sempre ci sono accessibili: per ragioni pratiche, come nel caso classico, o per ragioni di principio, come nel caso quantistico.
6. Per chiarire ulteriormente questo punto, citiamo un passo tratto dal libro *La trama della realtà* del fisico inglese David Deutsch:

Il riduzionista pensa che la scienza si occupi dei fenomeni analizzandone le componenti; lo strumentalista ritiene che si occupi della previsione dei fatti. L'esistenza di scienze di alto livello è per entrambi una questione di convenienza. La complessità ci impedisce di usare la fisica fondamentale per formulare previsioni di livello alto, e allora si formula l'ipotesi di quali sarebbero tali previsioni se fossero fattibili — l'emergenza ci dà la possibilità di riuscirci con successo — e questo è proprio quello di cui dovrebbero occuparsi le scienze di livello superiore. Pertanto per i riduzionisti e gli strumentalisti, che non tengono conto della struttura e della finalità vere della conoscenza scientifica, il fondamento della gerarchia predittiva della fisica è, per definizione, la loro "teoria del tutto." Ma in realtà la conoscenza scientifica consiste di spiegazioni, e la struttura delle spiegazioni scientifiche non riflette la gerarchia riduzionistica. Ci sono spiegazioni ad ogni livello

della gerarchia. Molte sono autonome, riferendosi soltanto a concetti dello stesso livello (per esempio, «l'orso ha mangiato il miele perché era affamato»). Molte implicano deduzioni nella direzione opposta a quella ipotizzata dal riduzionismo, cioè spiegano i fatti non analizzandone le componenti più piccole e più semplici, ma considerandole invece come componenti di fatti più grandi e più complessi, riguardo alle quali si hanno nondimeno teorie esplicative. Per fare un esempio, si consideri un particolare atomo di rame sulla punta del naso della statua di Winston Churchill che si trova in Parliament Square a Londra. Vorrei cercare di spiegare perché quell'atomo di rame è lì: si trova lì perché Churchill fu primo ministro alla Camera dei Comuni, situata nelle vicinanze; perché le idee e la guida di Churchill furono importanti per la vittoria degli Alleati nella seconda guerra mondiale; perché è tradizione onorare persone del genere erigendo una statua;

perché il bronzo, il materiale più comune per queste statue, contiene il rame; e così via. Si spiega quindi un'osservazione fisica di livello basso — la presenza di un atomo di rame in una particolare posizione — mediante teorie di livello altissimo su fenomeni emergenti quali idee, governo, guerra e tradizione.

Non vi è motivo per cui debba esistere, anche in linea di principio, una spiegazione della presenza di quell'atomo di rame che a sia di livello inferiore rispetto a quella data poc'anzi. Presumibilmente una “teoria riduzionistica del tutto” potrebbe fornire, in linea di principio, una previsione di basso livello della probabilità che esista una statua siffatta, data la condizione — poniamo — del sistema solare in qualche momento precedente. Inoltre, in linea di principio, tale teoria descriverebbe come probabilmente la statua è arrivata là. Ma tali descrizioni e previsioni (assolutamente irrealizzabili, è ovvio) non

spiegherebbero alcunché. Descriverebbero semplicemente le traiettoria seguite da ciascun atomo di rame dalla miniera alla fornace di fusione, allo studio dello scultore e così via. Potrebbero anche precisare quali effetti hanno prodotto sulle traiettorie le forze esercitate dagli atomi circostanti, quale quelli che formavano il corpo del minatore e dello scultore, e prevedere in tal modo l'esistenza e la forma della statua. Di fatto, una previsione di questo genere dovrebbe far riferimento ad atomi di ogni parte del pianeta, coinvolti, tra le altre cose, in quel movimento complesso che noi chiamiamo seconda guerra mondiale. Persino se foste dotati della capacità sovrumana di seguire la lunga lista di previsioni riguardo alla presenza dell'atomo di rame sulla statua, comunque non potreste dire «Ah sì, ora capisco perché è là». Sapreste soltanto che il fatto che sia arrivato là in quel modo era inevitabile (o probabile, o qualcos'altro del genere), date le

condizioni iniziali e le leggi della fisica. Se voleste capire perché, non avreste altra scelta: dovrete fare un altro passo e indagare che cosa è stato, relativamente a quella configurazione di atomi e a quelle traiettorie, a renderli propensi a depositare un atomo di rame in questa posizione. Svolgere tale indagine sarebbe un compito creativo, come è sempre la scoperta di nuove spiegazioni. Dovreste scoprire che alcune configurazioni di atomi favoriscono la comparsa di fenomeni emergenti quali il governo e la guerra, che sono collegati l'un l'altro da teorie esplicative di livello alto. Soltanto conoscendo tali teorie potreste davvero capire perché quell'atomo di rame si trova proprio in quella posizione.

Nella visione del mondo riduzionistica, le leggi che regolano le interazioni tra particelle subatomiche sono di primaria importanza, perché sono la base della gerarchia di tutta la conoscenza. Ma nella strut-

tura reale della conoscenza scientifica e nella struttura della nostra conoscenza in generale, il ruolo di queste leggi è molto più modesto.

7. Concordiamo completamente con Deutsch. La sopravvenienza (logica) delle proprietà macroscopiche sui fatti microscopici, non fornisce di per sé (cioè senza ulteriore specificazione o qualificazione) alcuna spiegazione genuina di un fenomeno; riteniamo tuttavia, come correttamente sottolinea Chalmers, che abbia il grosso pregio di *eliminare il mistero*, nel senso di garantire che nel mondo non ci siano proprietà che emergano dal nulla, cioè che non ci sia alcunché di *extra* in aggiunta alle entità che, come gli atomi, costituiscono l'ontologia primitiva della teoria. Fissati i fatti microscopici — cioè fissata la storia di ciò che fondamentalmente esiste — tutto ciò che c'è e accade nel mondo risulta fissato. In questo senso, la nozione di *emergenza* a cui Deutsch stesso fa riferimento, e che riguarda gli enti teorici delle spiegazioni di livello alto, ha un significato differente da quello secondo cui nel livello alto emerge davvero “qualcosa di nuovo”, anche ontologicamente.

8. Un esempio di emergenza è il *caos* di cui abbiamo parlato in precedenza: l'esistenza in quanto tale di questo fenomeno risulta in effetti spiegata dalle leggi deterministiche di livello più basso — il caos non è una sorpresa e non comporta un allargamento dell'ontologia. Nondimeno, la spiegazione di uno specifico fenomeno caotico, come il fatto che tra una settimana ci sia il sole oppure piova, analogamente alla spiegazione del motivo perché ci sia quel dato atomo di rame nella statua di Winston Churchill, non consiste nel raccontare una storia degli atomi dell'atmosfera da qui ad una settimana. Una spiegazione illuminante deve far riferimento alle categorie esplicative proprie della meteorologia. Sebbene la dipendenza sensibile dalle condizioni iniziali implichi che il battito d'ali di una farfalla a Pechino possa determinare in un certo arco di tempo un cambiamento meteorologico a Milano, una spiegazione in cui si specifichi quale sia la farfalla e quale sia la specifica catena causale di eventi che abbia prodotto questo cambiamento (oltre a essere del tutto irrealizzabile) sarebbe ben poco illuminante.

9. La sopravvenienza dei fatti macroscopici sui fatti microscopici è dunque pienamente compatibile con il carattere accidentale di molte proprietà del mondo, in cui il caso e l'impredicibilità giocano un ruolo rilevante. Per usare la terminologia del noto biologo americano Stephen Jay Gould (e introdotta dal biofisico inglese Francis Crick, scopritore del DNA insieme con il biologo americano James Watson), il mondo è pieno di *frozen accident*, eventi imprevedibili e atipici che caratterizzano la vita di tutti i giorni e la storia del mondo (e che nella rappresentazione matematica sono associabili alla dipendenza sensibile delle condizioni iniziali).

10. Ci sono tuttavia casi in cui la spiegazione di (alcuni aspetti di) un fenomeno emerge direttamente dalla storia di una configurazione d'atomi, o, più in generale, dalla storia dell'ontologia primitiva della teoria. Si tratta delle spiegazioni basate sulla nozione di tipicità alla cui chiarificazione ci dedicheremo nella parte rimanente di questo capitolo. Per le proprietà tipiche la spiegazione illuminante è di fatto in termini di atomi in movimento. Il fatto che l'acqua, quando si trova a -5° C, sia tipicamente solida, o il fatto che un gas lasciato libero tipicamente si espanda nel vuoto sono fenomeni o proprietà tipiche; fenomeni o proprietà che dipendono principalmente dalle leggi generali della fisica e da condizioni macroscopiche globali, e sono largamente indipendenti dai fatti microscopici contingenti — dalla storia contingente del mondo in cui tali proprietà si manifestano. La proprietà del calore di fluire dal caldo al freddo è di questo tipo, così come la tendenza dei sistemi isolati ad aumentare la loro entropia. Il che ci riporta alla trama principale del capitolo, all'analisi di Boltzmann.

Misura di tipicità

1. Espressioni quali schiacciante maggioranza o eccezioni rare, vanno intese nel senso della nozione di estensione delle corrispondenti regioni nello spazio delle fasi, cioè nel senso di *volume* occupato da queste regioni. È in termini di questa nozione che abbiamo compreso la vastità della differenza tra la dimensione del macrostato di equilibrio e quella degli altri macrostati. La nozione moderna di *misura*, che assegna ad ogni sottoinsieme A di un insieme Ω la sua misura $\mu(A)$, condivide con la nozione di volume il requisito basilare che la misura di due regione separate A e B è la somma delle misure: $\mu(A) + \mu(B)$.

$$\mu(A \cup B) = \mu(A) + \mu(B) \quad \text{se } A \cap B = \emptyset$$

2. La nozione generale di misura e quelle particolari di area o di volume sono, in ultima istanza, un naturale affinamento delle procedure elementari di conteggio di entità discrete, come delle mele contenute in un cesto. Si noti che nel caso continuo il conteggio presuppone sempre il riferimento ad una unità di misura: per l'estensione di un campo di grano dobbiamo specificare se stiamo parlando di acri o di metri quadrati. Tuttavia, come primo approccio alla nozione di misura possiamo limitarci al caso in cui il conteggio è lo stesso di quello delle mele in un cesto.

3. Consideriamo quindi una situazione drasticamente più semplice di quella considerata finora: il lancio di N monete non truccate. Ciascuna moneta può presentarsi in due stati possibili: testa e croce, che identificheremo rispettivamente con i numeri 1 e 0. Gli stati possibili per le N monete sono liste di N elementi ciascuno dei quali può essere 1 o 0. Ad esempio per $N = 7$, un possibile stato è $X = (1, 1, 1, 0, 1, 0, 0)$. Denotiamo con Ω l'insieme di tutti i possibili stati (si noti che per N monete si hanno 2^N possibili stati, cioè 2^N possibili liste di 1 e 0). Denotiamo inoltre con $\mu(A)$ la frazione di elementi di un qualunque sottoinsieme A di Ω . Ad esempio, se A contiene un decimo degli elementi di Ω allora $\mu(A) = 1/10$. In altre parole, μ è la misura che conta gli elementi dei sottoinsiemi di Ω relativamente al numero totale di elementi di Ω .

4. Consideriamo la percentuale $n = n(X)$ di teste di uno stato X e osserviamo che questa variabile ha la stessa struttura di *media statistica* che abbiamo considerato nella sezione ???. È della forma

$$n = \frac{1}{N} \sum_i N_i$$

dove le variabili $N_i = N_i(X)$ sono semplicemente le variabili di conteggio che per una data lista X valgono rispettivamente 1 o 0 a seconda che la i -esima moneta mostri rispettivamente una testa o una croce.

5. L'analogia tra lanci di monete e meccanica statistica dovrebbe essere ovvia: Ω corrisponde allo spazio delle fasi (o più precisamente allo strato di energia costante) e suoi elementi sono i microstati del sistema, la variabile n corrisponde alle variabili macroscopiche e alle funzioni distribuzione che contano il numero di molecole con posizione r e velocità v . Infine, la misura μ corrisponde al volume nello spazio della fasi (o più precisamente al volume nello strato di energia costante). Quando una misura è normalizzata a uno, cioè assegna valore 1 a tutto lo spazio, $\mu(\Omega) = 1$, è detta *misura di probabilità*.

Se lanciamo un numero N molto grande di monete ci aspettiamo che il numero di teste non differisca troppo dal valor medio $N/2$, e questa intuizione è basata sulla nostra capacità intuitiva di contare le eccezioni e renderci conto che sono poche. La matematica ci permette di affinare la nostra intuizione nel modo seguente.

6. Si fissi una certa tolleranza ϵ , un numero compreso tra 0 e 1, e si consideri l'insieme \mathcal{P} di lanci per cui la percentuale di teste differisce dalla percentuale media $\bar{n} = 50\%$ di un valore inferiore alla tolleranza fissata. In notazione insiemistica:

$$\mathcal{P} = \left\{ X \in \Omega : \left| \frac{1}{N} \sum_i N_i(X) - \bar{n} \right| < \epsilon \right\}.$$

Questo insieme rappresenta la proprietà: «LA PERCENTUALE DI TESTE È DEL 50% CON TOLLERANZA ϵ ». Denotiamo con $\mu(\mathcal{P})$ frazione di elementi di Ω contenuti in \mathcal{P} ; un semplice calcolo mostra che per N grande la misura di questo insieme è prossima a uno, il che significa che \mathcal{P} è una proprietà tipica, cioè una proprietà condivisa dalla quasi totalità degli elementi di Ω .

7. Equivalentemente, per caratterizzare la tipicità di questa proprietà si può considerare l'insieme delle eccezioni, cioè l'insieme dei lanci in cui la percentuale di teste n differisce dalla percentuale media $\bar{n} = 50\%$ di un valore maggiore della tolleranza ϵ (ad esempio, per $\epsilon = 0,1$ le eccezioni sono le successioni di teste e croci per cui la percentuale di teste eccede il 60% o è inferiore al 40%). Questo insieme

$$\mathcal{E} = \Omega \setminus \mathcal{P}$$

è il complemento in Ω di \mathcal{P} , cioè $\Omega \setminus \mathcal{P}$. Allora per N grande la misura di questo insieme diventa molto piccola, un fatto si esprime simbolicamente scrivendo

$$\mu(\mathcal{E}) = \mu(\Omega \setminus \mathcal{P}) \ll 1.$$

8. Il senso matematico preciso di questa convergenza è chiarito dalla teoria della probabilità in un modo estremamente generale, che va al di là del semplice esempio considerato. Riguarda spazi Ω che possono essere sia discreti che continui e misure di probabilità μ su questi spazi molto generali; concerne lo studio della convergenza, nel limite di N molto grande, di funzioni su questi spazi che sono analoghe alla frazione di teste che abbiamo considerato poc'anzi, cioè funzioni della forma

$$Y = \frac{1}{N} \sum_i Z_i$$

dove le variabili Z_i sono identicamente distribuite rispetto alla misura μ ; hanno cioè le stesse caratteristiche statistiche, in particolare il loro valor medio $\langle Y \rangle$. La convergenza in questione riguarda come una funzione che ha questa struttura di somma, nel limite di N molto grande, si avvicina alla media $\langle Y \rangle$.

9. L'enunciato più generale di questa convergenza corrisponde alla *legge dei grandi numeri*, che stabilisce che *qualunque* sia la quantità (positiva) ϵ la misura delle eccezioni (l'insieme dei punti per cui non si ha convergenza) tende a zero quando N tende all'infinito. Nei corsi elementari di probabilità questo teorema è dimostrato assumendo che le variabili Z_i siano indipendenti (come nel caso dei lanci di una moneta), ma in realtà il teorema vale sotto condizioni molto più generali che sono oggetto di studio della cosiddetta *teoria ergodica*.

Spiegazione basata sulla tipicità

1. Nel 1897 Boltzmann scriveva:

La seconda legge della termodinamica può essere dimostrata dalla teoria meccanica se si suppone che lo stato attuale dell'universo, o almeno che quella sua parte che ci circonda, si sia evoluta da uno stato improbabile ed è ancora in uno stato relativamente improbabile. Questa è un'assunzione ragionevole da fare, poiché ci permette di spiegare i fatti di esperienza e non si dovrebbe pensare di potere dedurla da alcunché più fondamentale.

La derivazione della seconda legge della termodinamica, nel senso di Boltzmann, ha dunque un carattere "cosmologico" e, in quanto tale, rende pienamente conto della formulazione originale di Clausius, in cui la legge è estesa all'universo nel suo complesso.

2. Infatti, se supponiamo che l'universo sia incominciato in uno stato di bassa entropia, allora possiamo concludere che ad una storia *tipica* del suo microstato corrisponde una storia di macrostati in cui l'entropia costantemente aumenta. La tipicità è riferita al macrostato iniziale M_0 (più precisamente alla misura condizionata definita da questo macrostato). Consideriamo dunque una successione di tali macrostati, a partire dal macrostato iniziale di bassa entropia:

$$M_0 \rightarrow M_1 \rightarrow M_2 \rightarrow \dots \rightarrow M_p \rightarrow M_{p+1} \rightarrow \dots$$

Questa simbologia significa che il microstato iniziale appartenente a M_0 dopo un certo tempo è finito nel macrostato M_1 (ad esempio, quando si è formata la Terra), che poi è finito nel macrostato M_2 (ad esempio, sono comparsi i dinosauri) che poi è finito dopo un po' nel macrostato M_p dove, ad esempio, ci sono io che ho appena tolto dell'acqua fredda dal frigorifero, e quindi nel macrostato M_{p+1} in cui l'acqua che ho tolto dal frigorifero è diventata tiepida.

3. Considerando questa successione di macrostati, sulla base dell'analisi di Boltzmann, possiamo concludere che la schiacciante maggioranza di microstati in M_0 finisce in M_1 , la schiacciante maggioranza dei quali finisce in M_2 e così via: quindi, la proprietà che l'acqua diventi tiepida al tempo $p + 1$ è tipica rispetto al macrostato M_p ed è di conseguenza tipica rispetto a qualunque macrostato nel passato di M_p . Tuttavia, non c'è alcuna ragione per ritenere che una qualunque proprietà del mondo al tempo p , che è tipica rispetto ai macrostati nel suo passato sia anche tipica rispetto a macrostati nel suo futuro. Al contrario!

4. Se tolgo l'acqua fredda dal frigorifero, allora tipicamente diventerà tiepida, ma il fatto che nel frigorifero adesso ci sia acqua fredda non è una condizione tipica del mondo rispetto alla sua condizione futura in cui c'è dell'acqua tiepida sul tavolo della mia cucina! Ci potrebbero essere una miriade di ragioni per cui c'è dell'acqua tiepida sul tavolo della cucina! E la ragione più probabile, se non teniamo conto della storia del mondo fino a quell'istante, è che quell'acqua tiepida si sia prodotta per fluttuazione spontanea (bottiglia di vetro inclusa) da uno stato di entropia maggiore. Questo perchè le leggi della fisica sono invarianti per inversione temporale.

5. La ragione di questa asimmetria è la seguente: mentre la schiacciante maggioranza dei microstati in M_p evolve in M_{p+1} , *soltanto un'esigua minoranza di microstati in M_{p+1} proviene da M_p* : infatti, ad un aumento dell'entropia corrisponde un aumento (esponenziale) di volume nello spazio delle fasi, ma, per il teorema di Liouville, l'insieme dei punti di fase in M_{p+1} che provengono da M_p ha lo stesso volume di M_p . Ne dobbiamo concludere che una caratterizzazione delle proprietà tipiche del passato, basata sulla misura di tipicità definita dal macrostato del presente, sarebbe in contrasto con la spiegazione stessa della seconda legge della termodinamica, che è «dimostrata dalla teoria meccanica se si suppone che lo stato attuale dell'universo, o almeno che quella sua parte che ci circonda, si sia evoluta da uno stato improbabile ed è ancora in uno stato relativamente improbabile».

6. Riassumendo, una spiegazione nel senso di Boltzmann è una spiegazione mirata a caratterizzare le proprietà tipiche del mondo del futuro *dato il presente*, o del passato *dato lo stato iniziale di bassa entropia*. Ad esempio, se M è il macrostato dell'universo ad un qualche tempo t_0 , la spiegazione basata sulla tipicità permette di concludere che l'evoluzione tipica del microstato nel futuro di t_0 sarà in accordo con la seconda legge della termodinamica per quel che riguarda tutto quello che accadrà nel mondo. Detto in altri termini, i microstati appartenenti al macrostato presente che non evolveranno come prescritto dalla seconda legge della termodinamica, ad esempio quelli per cui i frammenti del bicchiere si ricomporranno spontaneamente da soli, costituiscono un insieme esiguo rispetto al macrostato al tempo t_0 , cioè rispetto alla misura condizionata μ_M .

7. Si osservi che la spiegazione fornita da Boltzmann è, di fatto, ad di fuori dei canoni che alla fine del XIX si riteneva dovessero essere alla base di una “buona” spiegazione scientifica — con l’eccezione della teoria per selezione naturale di Darwin.

Quelle di Boltzmann e Darwin infatti non sono spiegazioni di ciò che inevitabilmente o necessariamente accade, ma spiegazioni di ciò che tipicamente o probabilmente accade. Questo indebolimento dei canoni classici di spiegazione fu guardato con un certo sospetto, e riferendosi alla spiegazione meccanica della seconda legge della termodinamica basata su argomenti probabilistici, cioè nel senso della tipicità discusso poc’anzi, Boltzmann così puntualizzava la sua posizione:

L'applicabilità della teoria delle probabilità ad un caso particolare non può naturalmente essere dimostrata rigorosamente. Malgrado questo, ogni società di assicurazioni conta sulla teoria delle probabilità. . . . Il presupposto che questi casi rari non sono osservati in natura non è rigorosamente dimostrabile (né lo è a rigore l'intera immagine meccanica), ma, in considerazione di quel che si è detto, è così naturale ed evidente e così tanto in accordo con tutta l'esperienza con le probabilità . . . che alcun dubbio su questo punto certamente non può mettere in questione la validità della teoria quando è al contrario così utile. Mi è completamente incomprensibile come qualcuno possa vedere una confutazione dell'applicabilità della teoria delle probabilità nel fatto che un qualche altro argomento indica che in un periodo di eoni di tempo ogni tanto delle eccezioni devono accadere; perché proprio la teoria delle probabilità ci insegna esattamente la stessa cosa.

8. **Proprietà tipica** Si consideri una proprietà \mathcal{P} che una storia spazio-temporale del mondo può avere o non avere. Poiché la storia è codificata da un punto nello spazio delle fasi (le condizioni iniziali della storia), ad un insieme di storie corrisponde biunivocamente, *fissate le leggi del movimento*, un sottoinsieme dello spazio delle fasi, che denoteremo, con abuso di notazione, con lo stesso simbolo \mathcal{P} . Sia M il macrostato dell'universo ad un qualche tempo t_0 e sia \mathcal{P} una proprietà *nel futuro di t_0* che una storia dell'universo può avere o non avere; diciamo che \mathcal{P} è tipica se $\mu_M(\Omega \setminus \mathcal{P}) \ll 1$. Se invece volessimo sapere se una certa caratteristica del mondo sia tipica oppure no *nel passato di t_0* (ad esempio, se la comparsa dei dinosauri sulla terra sia tipica), dobbiamo condizionare la misura di tipicità alla storia del mondo anteriore a t_0 , o per lo meno, ai macrostati del mondo nel passato immediato di t_0 (ad esempio, nel caso dei dinosauri, alle condizioni della Terra verso la fine dell'era Paleozoica).

Incertezza e calcolo della spiegazione

La nostra discussione dei fondamenti concettuali della meccanica statistica è terminata. Non ci resta che riassumere quelli che a nostro avviso sono i punti principali, e trarne, in forma abbozzata e provvisoria, una morale metodologica.

A volte è utile provare ad immaginare come le cose appaiono a Dio. Ciò è audace, è ovvio, ma, l'attività stessa di un fisico, che tenta di trovare le leggi della natura più profonde, che altro è, se non audace? Sia come sia, per generare un universo Dio deve in primo luogo decidere sull'ontologia — su che cosa ci deve essere nel mondo — e quindi sulle leggi fisiche — su come si comporta ciò che esiste. Ma questo, da solo, non è ancora sufficiente. Quel che manca è una realizzazione particolare, tra tutte le soluzioni possibili compatibili con leggi, quella che corrisponde all'universo reale. La possibilità più semplice sembrerebbe essere una scelta completamente casuale, con una misura naturale adatta per la descrizione di questa casualità

(qualunque cosa questo possa significare). La nozione di tipicità così definita, in un senso, sarebbe un ingrediente essenziale della teoria che governa questo ipotetico universo.

Arriviamo così allo schema generale del calcolo della spiegazione i cui ingredienti principali sono suggeriti dalla metafora che abbiamo appena raccontato:

1. ONTOLOGIA PRIMITIVA
2. LEGGI FISICHE
3. TIPICITÀ

L'ontologia primitiva è ciò che fondamentalmente esiste secondo la teoria e che è, congetturalmente, posto alla base dell'architettura della teoria: non si tratta di un'assunzione metafisica, quanto della postulazione degli enti che si suppone forniscano la spiegazione più semplice e matematicamente più naturale della realtà empirica —

nessuno ritiene che gli atomi, anche nel senso estremamente generale inteso da Boltzmann, siano l'ultima parola sull'ontologia. Per quel che riguarda le leggi fisiche che regolano l'ontologia primitiva, anche in questo caso va sottolineato il carattere congetturale, sebbene le leggi siano, da un lato, basate sull'evidenza empirica — nel senso dell'inferenza alla spiegazione migliore — e, dall'altro, suggerite dall'architettura matematica della teoria che risulta costruita sulla particolare rappresentazione matematica degli enti che costituiscono l'ontologia primitiva. Qualunque sia tale teoria (tralasciando speculazioni sulla gravità quantistica e sviluppi recenti della teoria delle corde), la formulazione più adeguata di cui disponiamo al momento per formulare le leggi fisiche è in termini di due nozioni distinte: leggi del moto — siano esse stocastiche o deterministiche — e ipotesi del passato.

Questo schema risulta completamente adeguato non solo per la fisica classica, ma anche per la fisica quantistica — nella misura in cui si ritiene che anche questa teoria debba avere una ben definita

struttura ontologica. Si tratta di uno schema estremamente potente, perché permette un ponte diretto tra proprietà microscopiche e proprietà macroscopiche del mondo a noi direttamente accessibili. Se da un lato ne va sottolineata la sua importanza (troppo spesso disconosciuta), va altresì ricordato che non è onnicomprensivo: possiamo spiegare in questo modo una molteplice classe di fenomeni (dall'acqua che congela a temperature inferiori allo zero centigrado, alla trasformazione di ATP in ADP), ma non perché, ad esempio, per dirla con Deutsch, un dato atomo di rame sia nella statua di Winston Churchill che si trova in Parliament Square a Londra. Lo schema non spiega le cause della seconda guerra mondiale, ma solo ad un riduzionista radicale verrebbe in mente tale obiezione. In breve, una volta che si abbia una visione sobria dei limiti di validità di quello che ci possiamo aspettare da una spiegazione scientifica, lo schema precedente andrebbe lodato per la sua precisione e generalità.

Resta sempre il “problema” che una spiegazione basata sulla tipicità spiega quello che tipicamente accadrebbe e non quello che inevi-

tabilmente accade; insomma c'è sempre la possibilità che certi cocci di vetro sul pavimento della cucina possano spontaneamente e nottetempo formare di nuovo un bicchiere. Ma è questo davvero un problema? Riteniamo di no, nella misura in cui leggi e fatti empirici contingenti ci forniscono un elevato grado di certezza che eventi di questo tipo questo non accadono. A questo riguardo, concordiamo completamente con le osservazioni fatte da Shelly Goldstein:

Qual è la forza di una tale spiegazione, basata, come è, soltanto su che cosa “tipicamente” accadrebbe, ma non su che cosa deve accadere inevitabilmente? Ora, come scienziato non vedo alcun problema. Che cosa ci si potrebbe ragionevolmente aspettare di più da una spiegazione? Tuttavia, come filosofi, potremmo in effetti essere propensi a richiedere di più. Potremmo chiederci se abbiamo davvero spiegato un fenomeno (quale l'irreversibilità, la freccia del tempo nel nostro mondo, o qualunque altra cosa) se abbiamo (soltanto!) indicato che

è tipico, ma tale che esista ancora un'abbondanza di eccezioni, sebbene in un senso straordinariamente raro — almeno come possibilità logiche e matematiche. Ma, se ci poniamo tale problema, ritengo che dovremmo affrontare domande molto difficili circa ciò che significa una spiegazione scientifica, o una qualunque spiegazione di sorta. Potremmo concludere che le domande che stiamo facendo siano rilevanti, non soltanto per la questione dell'origine di irreversibilità, ma per la maggior parte dei problemi — se non per tutti — che riguardano la natura della scienza e la giustificazione delle teorie scientifiche — come il problema dell'induzione di Hume del perché abbiamo una qualunque aspettazione di sorta che il futuro assomigli al passato. Il fatto è che nella scienza, come nella vita, dobbiamo imparare a far fronte all'incertezza. Come aveva notato Boltzmann anche l'immagine meccanica in quanto tale non è rigorosamente dimostrabile. Né lo

è qualunque altra teoria scientifica. Non importa quanto una teoria particolare sembri essere fortemente sostenuta dall'evidenza empirica, ci sono sempre resoconti alternativi logicamente possibili della stessa evidenza, comunque improbabile questo possa essere. Il resoconto che tendiamo a credere — quello che consideriamo come l'inferenza alla spiegazione migliore — sembra a noi più semplice, più elegante, più naturale e certamente meno forzato delle alternative. Ciò nonostante, le nostre aspettative per il comportamento futuro, basate sull'evidenza disponibile migliore, non possono essere mai considerate conseguenze inevitabili di quell'evidenza, ma soltanto — nel migliore dei casi — come estremamente verosimili.

In altre parole, non importa quanto sia forte l'evidenza empirica a supporto di una teoria, esisteranno sempre alternative logicamente possibili — sia sotto forma di storie possibili del mondo consistenti con la teoria, ma atipiche, sia sotto forma di teorie alternative compa-

tibili con il dato empirico, non importa quanto accurata sia la nostra conoscenza del mondo, non importa quanto naturali ed eleganti ci sembrino le teorie che abbiamo inferito come spiegazioni migliori. Ma il riconoscimento della fallibilità delle nostre teorie e della loro architettura, e l'incertezza ineliminabile che riguarda le fondamenta stesse della scienza — con cui da Hume in poi dobbiamo convivere — è proprio ciò che ha dato forza, contribuendo al suo sviluppo nel corso dei secoli, a quello che è usualmente noto come metodo ipotetico-deduttivo. Il calcolo della spiegazione che abbiamo delineato — in cui la nozione di tipicità svolge un ruolo rilevante — non è altro che una variante di questo metodo.

Il 7 maggio del 1952, in una lettera a Maurice Solovine, Einstein riassumeva i tratti generali del suo credo epistemologico. Un passo tratto da questa lettera ci sembra la maniera migliore per concludere questo capitolo einstein52:

lo vedo la cosa nel modo seguente:

- 1) Ci sono date le \mathcal{E} (esperienze immediate).
- 2) \mathcal{A} sono gli assiomi da cui traiamo le conclusioni. Dal punto di vista psicologico gli \mathcal{A} poggiano sulle \mathcal{E} . Ma non esiste alcun percorso logico che dalle \mathcal{E} conduca agli \mathcal{A} ; c'è solamente una connessione intuitiva (psicologica) e sempre "fino a nuovo ordine."
- 3) Dagli \mathcal{A} si ricavano, con procedimento deduttivo, enunciati particolari \mathcal{S} che possono pretendere di essere veri.
- 4) Gli \mathcal{S} sono messi in relazione con le \mathcal{E} (verifica per mezzo dell'esperienza). Questa procedura, a ben vedere, appartiene essa stessa alla sfera extra-logica (intuitiva), non essendo di natura logica la relazione tra i concetti che intervengono negli enunciati e le esperienze immediate. Questa relazione tra gli \mathcal{S} e le \mathcal{E} è tuttavia (pragmaticamente) molto meno incerta di quella che

sussiste tra gli \mathcal{A} e le \mathcal{E} (ad esempio tra il concetto di cane e le corrispondenti esperienze immediate). Se una tale corrispondenza, pur restando inaccessibile alla logica, non potesse essere stabilita con un elevato grado di certezza, tutto l'armamentario logico non avrebbe alcun valore ai fini della "comprensione della realtà" (ad esempio, la teologia).

L'aspetto essenziale è qui il legame, estremamente problematico, tra il mondo delle idee e ciò che può essere sperimentato (l'esperienza sensibile).