Logica e Spiegazione Scientifica in Meccanica Statistica[1]

Valia Allori[2]

Abstract

In questo articolo discuto come la spiegazione di regoltarità che regolano fenomeni macroscopici, come le leggi della termodinamica, fornita dalla meccanica statistica si riconduce ad essere molto simile, con le debite precisazioni, alla spiegazione data dal modello a legge di copertura secondo cui una spiegazione è un argomento che ha come premesse leggi di natura. Quindi la logica, oltre all' essere valevole di per sé, ci fornisce anche uno strumento importante per capire che cosa significhi spiegare in alcuni contesti scientifici.

1. Introduzione

Il libro in cui questo capitolo è inserito si domanda perché studiare la logica. In questo articolo, argomenterò a favore del fatto che la logica vada studiata per comprendere cosa significhi che una teoria scientifica come la meccanica statistica sia in grado di spiegare un fenomeno.

Andiamo con ordine. Cosa significa che una teoria scientifica spiega un certo fenomeno? Trovare una teoria filosofica della spiegazione scientifica che sia accettata universalmente è un'impresa pressoché impossibile: si va dal modello a leggi di copertura, secondo cui una spiegazione è un argomento in cui appaiono come premesse delle leggi di natura, ad approcci causali in cui si fornisce una spiegazione quando si identifica la causa di un fenomeno. Al contrario di quello che accade in filosofia, in fisica più pragmaticamente sembra essere abbastanza chiaro quando una teoria riesca o meno a dare una spiegazione adeguata. Per esempio, la meccanica classica spiega un numero vastissimo di fenomeni semplicemente risolvendo l'equazione di Newton. Quindi, spiegare un fenomeno significa dedurre come gli oggetti che costituiscono il fenomeno in esame si comportino, cioè come evolvano nel tempo, una volta date le leggi e le condizioni iniziali. Inoltre, la meccanica classica, la cui equazione fondamentale è quella di Newton, è anche in grado di derivare altre leggi, non fondamentali, in termini dell'equazione di Newton. In questo caso si parla di riduzione di una teoria ad un'altra. Per esempio, uno dei successi della teoria di Newton è di essere riuscita nella derivazione delle leggi fenomenologiche di Keplero, che descrivono le orbite dei pianeti intorno al Sole, in termini di particelle puntiformi che si muovono in accordo con la legge di Newton, una volta considerata la forza di gravità. Schematicamente, tali derivazioni sono deduzioni: data una qualunque condizione

[1] Di prossima pubblicazione all'interno del volume *Perché studiare la logica*,edito da E.Montuschi e P.D. Omodeo, casa editrice Armando (Roma).

[2] Department of Philosophy, Northern Illinois University, vallori@niu.edu

iniziale, sotto certe approssimazioni che ragionevolmente descrivono il fenomeno in esame, la soluzione dell'equazione del moto di Newton riproduce le leggi di Keplero. Quindi spiegare una legge non fondamentale ancora una volta significa usare la logica deduttiva.

Le cose sono più complicate quando invece di corpi solidi come i pianeti si considerano invece dei gas. I fenomeni da spiegare sono governati da leggi fenomenologiche, quelle della termodinamica, la più famosa delle quali è la seconda legge, la quale afferma che l'entropia di qualunque sistema fisico non diminuisce mai. L'approccio di Boltzmann ambisce a mostrare che tali leggi si possono ricostruire a partire da una dinamica microscopica Newtoniana, usando metodi statistici. Sebbene non risulti possibile dimostrare che la seconda legge della termodinamica valga per tutte le condizioni iniziali, si è in grado di mostrare che essa vale per la stragrande maggioranza dei casi. Quindi, sebbene non si possano dedurre dalla dinamica microscopica in maniera esatta, c'è comunque un senso in cui le leggi della termodinamica vengono riprodotte. Quale è questo senso? In questo articolo vorrei discutere proprio questo. In altre parole, vorrei discutere il tipo di spiegazione dei fenomeni macroscopici fornito dalla meccanica statistica e confrontarlo in particolare con il modello di spiegazione scientifica a leggi di copertura proposto da Hempel (sia quello nomologico deduttivo che quello statistico induttivo). Sebbene questo tipo di spiegazione abbia molte caratteristiche in commune con entrambi i modelli, nel caso del modello statistico induttivo vedremo come non è necessario invocare la nozione di probabilità in quanto sembra che basti la nozione piú debole di tipicità.

2. Modello a leggi di copertura e meccanica classica

Uno dei primi modelli filosofici di analisi del concetto di spiegazione scientifica è il modello a leggi di copertura, formulato originariamente da Carl Hempel e Paul Oppenheim[3] ed elaborato in seguito in maniera definitive da Hempel.[4]
L'idea fondamentale è che un fenomeno viene spiegato quando viene reso prevedibile, e vice versa. Più precisamente, un fenomeno è reso prevedibile se è possibile pensarlo come conclusione di un argomento che contenga come premesse le leggi di natura rilevanti e le condizioni iniziali dell'oggetto. In altri termini, il fenomeno E risulta la conclusione di un argomento calido con premesse date dai dati inizialiI_i e dalle leggi $L_i, i = 1, \dots, N$. Quindi vale lo schema:

$$\begin{array}{c} I_1, I_2, \dots, I_N \\ \underline{L_1, L_2, \dots, L_N} \\ \therefore \;\; E \end{array}$$

[3] Hempel C. G, Oppenheim P., 1948, "Studies in the Logic of Explanation", *Philosophy of Science*, 15, pp. 135-175.
[4] Hempel C. G, 1965, *Aspects of Scientific Explanation and Other Essays in the Philosophy of Science*, The Free Press, New York.

Se le leggi sono universali e deterministiche, questo modello si chiama nomologico-deduttivo (ND), e a volte può essere utile riscrivere il suo schema fondamentale come segue:

$$\frac{\begin{array}{c} x \text{ è A} \\ \text{Tutti gli } A \text{ sono } B \end{array}}{\therefore \quad x \text{ è } B}$$

Quindi, notare che esiste una legge universale tale per cui tutti gli A sono B spiega perché x, che è un A, sia anche un B. Un esempio semplice del modello ND è il seguente. Come si spiega che x, questo oggetto, sia un B, cioè un conduttore di elettricità? La legge di natura rilevante è che "ogni metallo conduce elettricità" ($L =$ Tutti gli A sono B) a cui si deve aggiungere che "l'oggetto considerato è un metallo" (x è A). Si spiega che il campione in esame conduce elettricità in termini della sua natura di metallo e di una legge che collega l'essere un metallo al condurre elettricità. Questo rende il fenomeno da spiegare prevedibile logicamente in maniera deduttiva, e in virtù di questo lo si spiega.

Invece se è presenta almeno una legge statistica, si parla di modello statistico induttivo (SI). L'idea è che se si riesce a dimostrare che due proprietà appaiono insieme con alta probabilità allora si riesce a spiegare perché un oggetto che possiede una delle due proprietà allora possieda anche l'altra. Formalmente si ha:

$$\frac{\begin{array}{c} x \text{ è } A \\ Prob(x \text{ è } A \text{ e } B) = r \end{array}}{\therefore \quad x \text{ è } B} [r]$$

dove r è la forza dell'induzione. Per esempio: data una mela (x) che è rossa (A), se si riesce a mostrare che con alta probabilità (r) le mele rosse sono anche dolci (B), allora uno ha anche mostrato perché questa mela rossa sia dolce.

Consideriamo ora la meccanica classica. In questa teoria, ogni oggetto fisico è costituito da particelle puntiformi che obbediscono ad una singola legge di natura data dall'equazione di Newton $F = ma$, dove F è la forza che agisce su un determinate oggetto (per esempio la forza di gravità), m la sua massa e a l'accelerazione prodotta dalla forza sul corpo. La meccanica classica ha l'ambizione di essere una "teoria del tutto", cioè di descrivere ogni fenomeno fisico, sia nel piccolo che nel grande. In altre parole, la teoria è universale.

Leggendo i libri di fisica, sembra proprio che il tipo di spiegazione fornito dalla teoria di Newton sia perfettamente allineato alla spiegazione fornita dal modello ND. Per esempio, supponiamo di voler sapere quale sia l'accelerazione che agisce su un corpo sulla superficie della Luna. Applichiamo la legge di Newton $F = ma$ dove $F = G\frac{mM}{R^2}$. In questa formula G è la costante di gravitazione universale uguale a $6{,}67 \times 10^{-11}\ \mathrm{m^3kg^{-1}s^{-2}}$, M è la massa della Luna pari a $7{,}35\ \times 10^{-22}$ kg, e R è il suo raggio, pari ha $1{,}74 \times 10^6$ m. Quindi, semplificando m da entrambi i lati, si ottiene $a = G\frac{M}{R^2}$, e sostituendo i valori numerici si ottiene un'accelerazione di $1{,}62\ \mathrm{m/s^2}$. Questo calcolo è compatibile con I valori sperimenali ed la dimostrazione è ciò che spiega il valore dell'accelerazione sulla Luna.
Si pensi inoltre alla meccanica del corpo rigido: si dimostra che le leggi della dinamica di Newton valgono anche nel caso di corpi estesi solidi (e quindi indeformabili) quando

applicate ad un punto speciale, chiamato centro di massa, e sostituendo, nel caso delle rotazioni, il cosiddetto momento di inerzia al posto della massa. Questi esempi sembrano confermare che in meccanica classica la spiegazione segue il modello ND: date le leggi, date le condizioni iniziali, se il fenomeno viene dedotto allora viene spiegato.

Il modello ND è in grado catturare quello che succeed nella derivazione di leggi fenomenologiche in termini di leggi più fondamentali. Questo si vede chiaramente in meccanica classica, che sembra in grado di spiegare leggi meno universali della legge di Newton, e quindi di unificare fenomeni ritenuti fino a quel momento di natura diversa. Infatti, uno dei successi di Newton è stato quello di fornire una descrizione dei movimenti dei corpi sia sulla Terra che nel cosmo: non solo la teoria è in grado si spiegare perché i gravi cadono con accelerazione costante e uguale a $g = 9{,}8\ m/s^2$, ma anche di riprodurre le leggi fenomenologiche di Keplero che descrivono le orbite planetarie. Il caso del moto dei gravi è così semplice che vale la pena farle il conto esplicitamente. Un grave è un corpo che si muove nel campo gravitazionale terrestre. La sua equazione del moto è $F = ma$. In questa equazione F è la forza di gravita data da $F = Gm\frac{M}{r^2}$, dove M è la massa della Terra pari a $5{,}97\ \times\ 10^{24}\ kg$, e r è la distanza del grave dal centro della Terra data dall'altezza h del corpo dal terreno sommata al raggio R della Terra. Uguagliando le due quantità ed eliminando la massa m del grave si ha $a = G\frac{M}{r^2}$, che significa, sostituendo i valori delle varie costanti, un'accelerazione pari a $a = 39,38\ \times 10^{13}\frac{1}{r^2}$. Siccome stiamo analizzando il moto dei gravi, l'altezza h del corpo dal suolo (al massimo sul monte Everest, di quota $8{,}848\ m$) è trascurabile rispetto al raggio R della Terra (pari a $6{,}37\times 10^9 m$). Quindi si ha $a \sim 9{,}8\frac{m}{s^2}$, che è il corretto valore sperimentale dell'accelerazione dei gravi g trovato da Galielo. Il caso delle leggi di Keplero è più complicato e non ha molto senso riprodurlo qui. In ogni caso, ogni studente di fisica è in grado di effettuare i calcoli necessari, che comunque si possono trovare in qualsiasi buon libro di testo.[5] Sia come sia, quello che si ottiene è che per ogni condizione iniziale compatibile col fenomeno da spiegare (i pianeti in orbita solare), date ragionevoli approssimazioni (come quella di considerare la massa del pianeta trascurabile rispetto alla massa del Sole, per quindi trascurare la forza esercitata dal pianeta sul Sole e considerare solo la forza del Sole sul pianeta), la soluzione dell'equazione di Newton riproduce le leggi di Keplero: le orbite dei pianeti sono ellissi, il segmento che unisce il centro del Sole con il centro del pianeta descrive aree uguali in tempi uguali, i quadrati dei tempi che i pianeti impiegano a percorrere le loro orbite sono proporzionali al cubo delle loro distanze medie dal Sole.

Consideriamo per semplicità il moto dei gravi. In questo caso, la legge di Newton è esatta mentre la deduzione dell'accelerazione gravitazionale avviene solo in un certo regime, cioè quello per altezze piccole rispetto al raggio terrestre, e quindi l'equazione del moto dei gravi è valida solo in questa approssimazione.
Una caratteristica interessante di questo tipo di spiegazione rispetto a quelle che valgono in maniera esatta è data dal fatto che questo schema non ha il famoso problema

[5] Si veda per esempio Arnold, V.I, 1992, *Metodi matematici della meccanica classica*, 1992, editori Riuniti, Roma.

dell'asimmetria, una delle obiezioni sollevate contro il modello ND. Tale problema è che secondo il modello ND tutte le predizioni sono anche spiegazioni, dato che entrambe sono conclusioni di argomenti validi: spiego che questo oggetto conduce elettricità perché è un metallo e tutti i metalli conducono elettricità, e prevedo che se prendo un oggetto che è un metallo allora conduce elettricità. Però si possono trovare esempi di predizioni che non sono spiegazioni: mentre l'altezza di un palo spiega la lunghezza dell'ombra che esso genera, la lunghezza dell'ombra non spiega l'altezza del palo che la genera. In altri termini, data l'altezza del Sole sull'orizzonte, si può calcolare con un po' di trigonometria sia l'altezza H di un palo in termini della lunghezza L della sua ombra, che vice versa la lunghezza L dell'ombra del palo in termini dell'altezza H del palo. Quindi, si possono produrre due argomenti validi, entrambi i quali forniscono una spiegazione secondo il modello ND: uno che esprime L in termini di H, e uno che esprime H in termini di L. Però mentre il primo dà una spiegazione del fatto che l'ombra sia di quella lunghezza data l'altezza del palo, il secondo no: non è perché l'ombra è lunga L che il palo è altro H! L'altezza del palo dipende da varie cose (lo scopo del palo, per prima cosa), ma non dalla lunghezza della sua ombra. Questa obiezione al modello ND vuole quindi evidenziare che la spiegazione è asimmetrica mentre la predizione no, e spesso si suggerisce che per spiegare, ma non per predire, bisogna fornire le cause di un fenomeno. Questo problema, se considerate tale, esiste per tutte le derivazioni esatte. Invece non emerge nei casi in cui la derivazione faccia uso di approssimazioni, come nel caso della spiegazione di leggi particolari in termini di leggi generali, per esempio nel caso della deduzione del moto dei gravi dall'equazione di Newton. Questo è dovuto al fatto che le approssimazioni funzionano in un senso ma non nell'altro. Cioè, la legge di Newton è precisa, quella del moto dei gravi costituisce quindi una sua approssimazione, e quindi si spiega la seconda nei confronti della prima, ma non la prima nei confronti della seconda.

3. Le leggi della termodinamica e la meccanica statistica di Boltzmann

Cosa succede se ora invece di spiegare i fenomeni che coinvolgono oggetti macroscopici solidi deducendoli dall'equazione di Newton in maniera esatta o approssimata, si vogliono discutere gli oggetti senza una forma definita come i gas? A livello macroscopico i fenomeni che coinvolgono trasformazioni di gas sono governati dalle leggi della termodinamica. Queste leggi sono fenomenologiche, nel senso che regolano le trasformazioni di un sistema (gassoso ma anche no) in seguito a processi di scambio di calore o 'lavoro' che coinvolgono cambiamenti di variabili, quali ad esempio la temperatura, la pressione e il volume, senza investigare il fenomeno dal punto di vista microscopico. In altre parole, sono delle leggi che non pensano al gas come ad un agglomerato di particelle che si muovono secondo le leggi classiche, ma ad un oggetto 'opaco', il cui comportamento viene descrtto da variabili quali temperature e pressione che cambiano secondo certe regole. Tali regole sono date appunto dale leggi della termodinamica, e si possono riassumere come segue. La legge, o principio, zero della termodinamica definisce il concetto di temperatura come la proprietà che due corpi hanno in commune quando sono in equilibrio termico, cioè quando il loro stato non cambia. La prima legge invece esprime il principio di conservazione dell'energia, che può essere trasformata (in calore o in lavoro) ma né creata né distrutta. Invece il secondo principio è meno familiare. Può essere formulato in vari modi, tutti equivalenti tra loro. I primi due sono formulate in termini di trasformazioni possibili, mentre il terzo è in termini di una quantità chiamata entropia. Le prime due formulazioni sostanzialmente dicono che il moto perpetuo non esiste. Più precisamente queste formulazioni, rispettivamente chiamate di Clausius e di Kelvin-Planck, dicono che è impossibile trasferire calore da un corpo freddo a un corpo caldo senza l'aiuto di un lavoro esterno, e vice versa che è impossibile trasformare completamente in lavoro il calore assorbito da una data sorgente. Alternativamente si può dire che esiste una variabile, chiamata entropia, che aumenta sempre (o al massimo rimane costante) durante le possibili trasformazioni di un gas.

Queste leggi sono i vincoli a cui le trasformazioni dei gas, pensati come oggetti macroscopici, si devono attenere. Se invece si pensa, come nel caso dei corpi solidi, che anche i gas siano costituiti da particelle che si muovono secondo la dinamica classica, allora in linea di principio si dovrebbe essere in grado di riprodurre le leggi della termodinamica in termini della dinamica Newtoniana delle particelle che compongono il gas. Boltzmann, alla fine del 19-esimo secolo, si imbarcò in questa impresa.
Ci sono due difficoltà che si incontrano immediatamente se si vuol portare a termine questo progetto. Prima di tutto, si devono conoscere le forze di interazione tra le particelle, le F da inserire nell'equazione di Newton, che non sono di origine gravitazionale. Inoltre, si devono risolvere le equazioni di Newton per un gran numero di particelle, dell'ordine del numero di Avogadro, $N_A = 6{,}023 \times 10^{23}$. Fortunatamente, il fatto che ci siano moltissime particelle permette di usare metodi statistici e di avere informazioni sufficienti sui fenomeni da spiegare anche con queste limitazioni. La teoria risultante viene chiamata per questo motivo meccanica statistica, ed è stata sviluppata, oltre che dal già menzionato Boltzmann, anche da Gibbs. In questo articolo mi limiterò a discutere l'analisi di Boltzmann.[6]

Vediamo ora di riassumere, per sommi capi, gli ingredienti della meccanica statistica di Boltzmann. Assumiamo che un gas sia composto da N particelle puntiformi che si muovono secondo le leggi classiche. Per questo motivo, ogni particella è descritta in maniera istantanea dalla coppia composta dalla sua posizione r e dalla sua velocità v. Siccome in ogni gas ci sono N particelle, lo stato del gas ad un determinato istante è dato dal cosiddetto microstato $X = (r_1, \dots . r_N, v_1, \dots . v_N)$, cioè dall'insieme delle posizioni e velocità di ogni particella del gas in quell'istante. L'insieme di tutti i microstati possibili è chiamato spazio delle fasi. Per riprodurre le leggi della termodinamica in termini microscopici prima di tutto dobbiamo descrivere le variabili (macroscopiche) usate nelle leggi della termodinamica, come ad esempio la temperatura, in termini di posizioni e velocità di particelle. Non dovrebbe essere difficile capire come il principio zero e il primo

[6] Per un'interessante approccio sull'importanza della meccanica di Gibbs, si veda Wallace, D. 2020. The Necessity of Gibbisan Mechanics" In V. Allori (ed.) *Statistical Mechanics and Scientific Explanation: Determinism, Indeterminism and Laws of Nature,* World Scientific.

principio della termodinamica non presentano grossi problemi nell'essere analizzati da questo punto di vista. Infatti la temperatura è definita come l'energia cinetica media delle particelle del gas, e il primo principio esprime la conservazione dell'energia, che vale anche per le particelle. Il problema più serio nella derivazione delle leggi macroscopiche da quelle microscopiche viene dal secondo principio, il quale afferma che l'entropia aumenta sempre. Cos'è, microscopicamente, l'entropia? Perché aumenta sempre? Vedremo in seguito come rispondere a queste domande. Comunque, proseguendo con ordine, se ci si pensa un attimo si comprende come molte differenze microscopiche non diano origine ad alcuna differenza macroscopica: per esempio un gas descritto da un dato microstato X e un gas descritto da un altro microstato X', esattamente uguale a X a parte per il fatto che la settima particella ora ha velocità un po' più bassa (o è diretta un pochino più in alto, per esempio) sono macroscopicamente indistinguibili, sebbene microscopicamente diversi. Lo stesso vale per differenze di posizione: per esempio, le temperature di due gas, uno descritto da X e l'altro descritto da X'', diverso da X solo perché si scambiano la prima e la 456-esima particella, saranno identiche. Questo significa che lo spazio delle fasi si può suddividere in sottoinsiemi chiamati macrostati Γ, che raggruppano microstati che descrivono gas che sono identici dal punto di vista macroscopico, per esempio hanno la stessa temperatura.

Essendo i macrostati insiemi di microstati, essi hanno una dimensione data dal numero di microstati che contengono. In particolare, si dimostra che esiste un macrostato che è più grande di tutti gli altri di moltissimi ordini di grandezza. Si calcola che il rapporto di dimensioni tra questo macrostato e un qualunque altro sia di circa $10^{10^{23}}$, cioè in sostanza, tale macrostato occupa praticamente tutto lo spazio delle fasi.[7] A cosa corrisponde questo macrostato gigantesco? A quello che termodinamicamente viene chiamato stato di equilibrio. Esso, per esempio, è lo stato che verrà in breve tempo raggiunto da due corpi a temperature diverse posti a contatto tra loro, ed è caratterizzato dall'avere la temperatura commune raggiunta dai due corpi. Oppure descrive lo stato finale dell'evoluzione di un profumo inizialmente spruzzato in una stanza da una persona in un angolo, cioè il fatto che si distribuisca nell'intera stanza; e così via. È quindi lo stato in cui non si osservano più ulteriori cambiamenti macroscopici del gas. La seconda legge, detta in maniera un po' più precisa di prima, dice che l'entropia aumenta sempre finché non diventa massima all'equilibrio. In altri termini, la seconda legge esprime la cosiddetta convergenza all'equilibrio: un sistema continua a cambiare fintanto che non raggiunge lo stato di equilibrio in cui non cambia più. La proposta di Boltzmann a questo punto è di identificare, a meno di un fattore logaritmico per permettere di rendere la quantità addittiva, l'entropia S con la 'grossezza' del macrostato: $S = K_B \log |\Gamma|$, dove K_B è la costante di Boltzmann. In questo modo si può ritrovare la seconda legge dal punto di vista della dinamica microscopica, anche se con precisazioni importanti. Vediamo come. Il microstato, che descrive il gas in maniera completa, si muove nello spazio delle fasi passando per diversi macrostati. Dal punto di vista di quello che accade al gas, questo

[7] Per questa stima si veda Penrose, R. 1989, *The Emperor's New Mind,* Oxford University Press.

equivale a dire che il gas assume, per esempio, diverse temperature e diverse entropie nel tempo. Dal punto di vista di ciò che è possibile, il microstato può passare da un certo macrostato ad un macrostato più piccolo: la dinamica non lo impedisce. Però è più probabile che accada l'opposto e cioè che il microstato vada in macrostati sempre più grossi, semplicemente perché essi contengono più microstati accessibili. Questo finché non si raggiunge lo stato di equilibrio, che è il più grande di tutti: è così grande che è in pratica impossibile venirne fuori in tempi osservabili, anche se è comunque possibile in principio. Quindi, riassumendo: per la stragrande maggioranza dei microstati, l'entropia aumenta. Non per tutti però: niente vieta che un microstato sistematicamente finisca in un macrostato più piccolo. In questo caso l'entropia potrebbe in linea di principio diminuire.[8]

4. La spiegazione in meccanica statistica e il modello a legge di copertura

Le domande da porsi sono ora le seguenti: è riuscito Boltzmann a spiegare la seconda legge della termodinamica? Se sì, come? Come si confronta questo tipo di spiegazione con quelli visti? Inoltre, è questa una spiegazione soddisfacente?

Vediamo prima come si rapporta la derivazione di Boltzmann con le derivazioni viste in precedenza. È precisa o è approassiamta? Sembrerebbe ragionevole affermare che la derivazione delle leggi termodinamiche in termini di quelle microscopiche avvenga in maniera approssimata. Nel caso dell'entropia infatti si dimostra che essa aumenta per la stragrande maggioranza dei gas. In altre parole i gas 'anti-termodinamici,' per i quali cioè l'entropia diminuisce, sono pochi. Se chiamiamo E l'insieme di tali casi eccezionali, o 'anti termodinamici' per cui cioè l'entropia diminuisce, allora si può dimostrare che tale insieme è molto piccolo rispetto all'insieme T dei microstati 'termodinamici', per cui cioè l'entropia aumenta: $E \ll T$.
Questo è in parte simile alla derivazione del moto dei gravi, anche se in quel caso si assumeva che l'altezza massima h di un grave dal suolo terrestre fosse trascurabile rispetto al raggio della Terra R: $h \ll R$. Comunque la differenza sembra essere minima: in entrambi i casi si tratta di una derivazione non esatta, valida solo sotto certe approssimazioni.
Per rafforzare l'idea che il tipo di spiegazione sia lo stesso, osserviamo che in entrambi i casi ogni spiegazione è una predizione e vice versa: dato un gas (x) non in equilibrio (A), si dimostra che a meno di casi eccezionali esso si espanda (B). Questa dimostrazione è sia

[8] Le cose sono in realtà piú complicate di come presentate qui, in particolare, c'è bisogno della cosiddetta ipotesi del passato secondo cui l'universo è iniziato con un'entropia molto bassa. Questa è necessaria per garantire che l'entropia aumenti verso il futuro (come visto nel testo) e non anche verso il passato: per le stesse ragioni per cui è probabile che l'entropia aumenti nel futuro, è piú probabile che lo stato presente derivi da un macorstato piú grande (quindi che l'entropia diminuisca), quando invece non è empiricamente cosí. Per questo e altro sulla spiegazione di Bolzmann si vedano i seguenti testi: Albert, D. Z 2001 *Time and Chance*, Harvard University Press; Goldstein, S. 2001, "Boltzmann's Approach to Statistical Mechanics" In J. Bricmont, *et al.*, *Chance in Physics. Foundations and Perspectives* pp. 39-54, Berlin: Springer; Zanghì, N. 2005 "I fondamenti concettuali dell'approccio statistico in fisica" in V. Allori, M. Dorato, F., Laudisa, & N. Zanghì, (eds.), *La Natura Delle Cose. Introduzione ai Fundamenti e alla Filosofia della Fisica* pp. 139-228, Roma: Carocci.

una previsione che una spiegazione dell'espansione del gas. Anche in questo caso, come nel caso della derivazione del moto dei gravi, non si ha il problema dell'asimmetria perché le approssimazioni valgono in un senso ma non nell'altro.

Si potrebbe però notare come la situazione sia diversa in un altro senso importante: mentre nel caso dei gravi si dimostra che tutti i corpi che si muovono secondo le leggi classiche, nelle condizioni opportune, si muovono con accelerazione costante, nel caso dei gas abbiamo visto invece che possiamo dimostrare solo che la stragrande maggioranza di essi si espanderà. In altre parole, non è vero che un gas le cui componenti obbediscono alla legge di Newton è garantito evolvere verso il suo stato di equilibrio: esiste sempre la possibilità di scegliere una condizione iniziale speciale per cui l'entropia non aumenta. In questo modo, la seconda legge viene riprodotta, ma solo nella stragrande maggioranza dei casi.
Questo sembra suggerire che ci sia qualche cosa di diverso in questo tipo di spiegazione. Molti hanno reinterpretato la spiegazione della seconda legge della termodinamica in termini di stragrande maggioranza di stati dicendo che la probabilità che aumenti l'entropia è alta.[9] In altre parole, invece di dire che per la stragrande maggioranza dei casi i gas si espandono e questo spiega perché questo gas si espande, si potrebbe dire che la spiegazione è data dal fatto che la probabilità del gas di espandersi sia alta. Quindi si potrebbe scrivere il seguente schema esplicativo del fatto che un gas (x) non in equilibrio (A) si espanda (B):

$$\frac{\begin{array}{c} x \text{ è } A \\ Prob(x \text{ è } A \text{ e } B) = r \quad (\text{con } r \text{ molto alto}) \end{array}}{\therefore \qquad x \text{ è } B}$$

dove $Prob(x \text{ è } A \text{ e } B) = r$, (con r molto alto) viene letto come "la probabilità che un gas espanda è r, che è un numero molto grande". Quindi in questo caso non si avrebbe piú un processo deduttivo ma uno induttivo molto forte.

Si potrebbe obiettare che il tipo di inferenza usata in meccanica statistica non sembra induttiva: per calcolare il numero di microstati eccezionali si usano teoremi, il che suggerisce una derivazione deduttiva. Ma in realtà non c'è contraddizione perché quello che la meccanica statistica mostra è, deduttivamente con dei teoriemi, che il numero di microstati eccezionali E è molto piccolo rispetto a quelli termodinamici T. Poi si usa questo fatto per spiegare, con quella che sembra un;inferenza induttiva forte, i vari fenomeni osservati. Quindi si deduce in quale approssimazione si deve mettersi per riprodurre la seconda legge (cioè si deduce che $E \ll T$), a differenza di quello che sucedeva per la caduta dei gravi in cui l'approssimazione in cui mettersi ($h \ll R$) era evidente.
Un'altra obiezione, a mio avviso piú valida, è che il concetto di probabilità non sembra essere necessario: qui si sta parlando di ordini di grandezza, non di numeri precisi. In altre parole, dire che un fenomeno ha probabilità 0.50 di accadere è diverso da dire che abbia probabilità di accadere pari a 0.45. Invece nella derivazione della seconda legge tali

[9] Si veda per esempio Albert D.Z. 2001, *Time and Chance*, Harvard University Press.

differenze non contano: il numero di casi eccezionali, cioè il numero di microstati per i quali l'entropia aumenta, cioè i gas che non espandono ma si ritirano, sono pochissimi e poco importa che siano una frazione pari a 0,0001 o pari a 0,0002 del totale dei gas. Quello che importa è che siano molti meno di quelli che si espandono, senza precisare quanto.[10] Per questo motivo (e altri), alcuni hanno proposto che invocare la nozione di probabilità non sia necessario, e che basti la nozione più debole di tipicità.[11] Questo equivale a tradurre "il gas espande per la stragrande maggioranza delle condizioni iniziali" con "l'espansione dei gas è un fenomeno tipico" invece che "la probabilità che il gas si espanda è elevata". In altre parole, un fenomeno è detto tipico se e solo se si può mostrare che la stragrande maggioranza di sistemi simili all'originale ma con diverse condizioni iniziali mostrano lo stesso comportamento. Tecnicamente, la nozione di 'stragrande maggioranza' viene descritta da una misura, come nel caso della probabilità, ma in questo caso l'unico scopo della misura è contare le pochissime eccezioni al comportamento osservato senza badare a troppi dettagli (come invece farebbe la probabilità). Per questo motivo, la nozione di tipicità è più debole di quella di probabilità. In questo modo, se un oggetto x ha la proprietà A, e la proprietà B è tipica per gli oggetti di tipo A, allora la spiegazione del perché x ha la proprietà B è data dal seguente schema:

$$\frac{\begin{array}{c} x \text{ è } A \\ Tip\,(\text{x è } A \text{ e } B) \end{array}}{\therefore\ \text{x è } B}$$

dove $Tip(\cdot)$ è un operatore simile a $Prob(\cdot)$ che si legge: "tipicamente, tutti gli A sono B". In altri termini, la spiegazione del fatto che un dato sistema ha una certa proprietà B viene fornita mostrando che questa proprietà è tipica per gli oggetti di quel tipo (oggetti di tipo A). Per esempio, la spiegazione del fatto che questo gas si espanda è data dal fatto che si riesca a provare che l'espansione è un fenomeo tipico per i gas non in equilibrio. Ovvero, per la stragrande maggioranza dei casi si può mostrare che i gas si espandono. Eccezioni esistono, ma sono rare.

[10] Per una discussione sulle differenze tra i concetti di probabilità e tipicalità, si veda: Goldstein, S.2011, "Typicality and Notions of Probability in Physics" In: Yemima Ben-Menahem, and Meir Hemmo (eds) *Probability in Physics* pp. 59-71. Heidelberg: Springer, The Frontiers Collection; Wilhelm, I. 2020, "Typical: A Theory of Typicality and Typicality Explanation" *The British Journal for the Philosophy of Science* axz016. Per critiche alla tipicità si veda: Frigg, R. 2011. "Why Typicality Does Not Explain the Approach to Equilibrium" In M. Suárez (ed.): *Probabilities, Causes and Propensities in Physics:* pp. 77-93.,Dordrecht: Springer; Frigg, R. & Werndl, C. 2012, "Demystifying Typicality" *Philosophy of Science* 5: pp. 917-929; Werndl, C. 2013 "Justifying Typicality Measures of Boltzmannian Statistical Mechanics and Dynamical Systems" *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 44(4): pp. 470-479.

[11] Goldsteein, S. 2001, "Boltzmann's Approach to Statistical Mechanics" In J. Bricmont, *et al.*, *Chance in Physics. Foundations and Perspectives* pp. 39-54, Berlin: Springer; Zanghì, N. 2005 "I fondamenti concettuali dell'approccio statistico in fisica" in V. Allori, M. Dorato, F., Laudisa, & N. Zanghì, (eds.), *La Natura Delle Cose. Introduzione ai Fundamenti e alla Filosofia della Fisica* pp. 139-228, Roma: Carocci.

Continuando con il confronto tra questo schema esplicativo e quello del modello SI, facciamo notare che formalmente sono identici. La differenza è nella logica degli operatori (Tip vs. $Prob$), nel senso che abbiamo visto che i due concetti sono distinti.[12]
Si noti infatti come alcune spiegazioni probabilistiche non siano spiegazioni basate sulla tipicità del fenomeno. Infatti si consideri per esempio il nucleo di un dato elemento che ha la probabilità di decadere pari a 0.4 (qualunque numero andrebbe bene, purché non sia elevatissimo). Quindi si può spiegare perché tale nucleo sia decaduto usando il modello IS, fornendo quindi una spiegazione probabilistica. Invece, data la scelta della probabilità di decadimento come piccolo (è il 40% non il 90%), non è tipico per tale nucleo decadere.

Un'altra osservazione interessante riguardo al confronto tra spiegazione probabilistica e tipica, è la seguente. Quando ho introdotto il modello SI, ho fatto l'esempio della mela:
Se uno mostra che è molto probabile che una mela rossa sia anche dolce, allora si spiega perché questa mela rossa sia anche dolce. Ritengo in realtà che, assumendo di accettare questo tipo di spiegazione, presumibilmente il motivo per cui si ritiene di aver fornito una spiegazione in questo caso è perché si ha in mente un fenomeno tipico più che un fenomeno probabile. Infatti I dettagli su quanto questo sia probabile (0.98 o 0.97?) non contano granché, fino a quando i valori rimangono elevati. Quindi si sarebbe potuto dire: abbiamo mostrato che le mele rosse sono tipicamente dolci, e questo spiega perché questa mela rossa è dolce. Questo è un ragionamento basato sulla tipicità, compatibile con l'idea originale di Hempel che il modello SI funzioni solo per probabilità alte.[13]

In aggiunta, per rinforzare l'idea che le due spiegazioni (quella probabilisitca e quella basata sulla tipicià) siano di natura diversa, si potrebbe osservare che le spiegazioni probabilistiche sono contro-intuitive, mentre quelle basate sulla tipicità non lo sono. Per esempio, si immagini di esser risultati positivi ad un test diagnostico per identificare una malattia rara, diciamo una di quelle per cui si registra un caso ogni 10 mila persone (grado di incidenza). Dato un test positivo, qual è la probabilità di avere effettivamente la malattia, se la specificità del test è del 99% e la sensibilità del 100%? Cioè, qual è la probabilità che si sia effettivamente malati nell'ipotesi che il test rilevi 99 positivi su 100, mentre non ci sono falsi negative, cioè malati non positive al test? La probabilità di avere la malattia dato il test positivo, calcolata usando il teorema di Bayes, è molto bassa, attorno all'1%. In altri termini, il test mostra un falso positivo il 99% delle volte. Questo, molto rozzamente, perché in un certo senso l'estrema rarità della malattia 'vince' sull'alta, ma

---

[12] Si veda Crane H., Wilhem, I. 2020, "The Logic of Typicality." In V. Allori (ed.) *Statistical Mechanics and Scientific Explanation: Determinism, Indeterminism and Laws of Nature,* World Scientific.
per due proposre per una logica formale per l'operatore Tip, una basata sulla logica modale proposizionale e una sulla logica intuizionistica.

[13] In seguito, ciritci hanno argomentato che il modello funzioni anche per piccole probabilità. A questo proposito si veda ad esempio Strevens M. 2000 "Do Large Probabilities Explain Better?" *Philosophy of Science* 67 pp. 366–90, per un argomento che la forza dell'induzione non sia necessariamente collegata alla forza della spiegazione. Questo non invalida il mio discorso, perché non sto argomentando che tutte le spiegazioni siano spiegazioni basate sulla tipicità.

non altissima, sensitività del test.[14] Quindi risultare positivi ad una malattia senza effettivamente essere malati viene spiegato dal fatto che il teorema di Bayes mostra che la probabilità di avere effettivamente la malattia è bassa, se la malattia è abbastanza rara, anche se la specificità del test è elevata. Comunque questo risultato è estremamente contro-intuitivo: la maggior parte delle persone che ricevono un risultato positivo al test sarebbe sicuramente terrorizzata. Anzi, la maggior parte dei medici che leggono i test di solito danno consigli che di fatto ignorano il risultato del teorema di Bayes.[15] Al contrario, i ragionamenti basati sul concetto di tipicità sono semplicissimi: si può argomentare con studi di genetica che tipicamente i cani sono affettuosi,[16] e questo è il motivo per cui il mio cane è affettuoso.

Questo è anche legato al fatto che in genere troviamo gli stereotipi esplicativi. Come si spiega che Federica, che doveva spostare il suo divano da una parete all'altra, non ha chiesto aiuto a suo padre ottantenne? Si sipega osservando che non si chiede ad un ottuagenario di spostare il divano perché tipicamente gli ottuagenari non sono sufficientemente in forma da spostare divani senza farsi del male. Questo è uno stereotipo, dato che non tutti gli ottuagenari sono così, ma di solito è efficiente assumere che sia così perché quanto affermato dallo stereotipo è vero per la maggior parte degli ottuagenari. Come si spiega che Roberto, che non trovava la farmacia, non ha chiesto indicazioni al bambino di Quattro anni che giocava nel parco di frote a lui? Si speiga osservando che non si chiedono informazioni stradali ai bambini di quattro anni perché tipicamente i bambini di quattro anni non hanno percezioni spaziali affidabili, e così via.[17] Quindi, con forse un pizzico di ironia, si può dire che fornendo una spiegazione tipica si fornisce un stereotipo in cui le eccezioni sono molto molto poche: lo stereotipo del gas è di espandersi, anche se è possibile che questo non succeda.

È vero che spesso parliamo in termini di probabilità, ma siccome i dettagli non contano molto, la spiegazione che forniamo è basata sulla tipicità, non sulla probabilità: non ci

---

[14] Questo è un modo per vedere da dove vengano questi numeri senza usare direttamente l'equazione del teorema di Bayes. Si pensi ad una popolazione di 10.000 persone. Visto che l'incidenza della malattia è di 1 su 10,000, nella popolazione ci sarà 1 malato e 9.999 sani. Quel malato risulterà sicuramente positivo al test per diagnosticare la malattia, perche' non ci sono falsi negativi (malati non positivi), come da assunto. Invece tra i non malati si ha la seguente distribuzione. Visto che i falsi positivi (i sani positivi) sono 1 su 100 (la sensitività è del 99%), i non malati positivi saranno $9.999 \times \frac{1}{100}$, mentre il resto dei sani ($9.999 \times \frac{99}{100}$) sarà negativo. La proabilità di avere effettivamente la malattia dato un test positivo è quindi dato dal numero di malati positivi (cioè 1) diviso il numero totale di positivi al test. Quest'ultimo è il numero di positivi malati sommato al numero di positivi non malati, quindi pari a $1 + 9.999 \times \frac{1}{100} = 100{,}99$. Quindi si ha $prob(\text{essere malato, dato un test positivo}) = \frac{1}{100{,}99} = 0{,}0099$, ovvero neanche l'1%.

[15] Si veda Casscells, W., Schoenberger, A., & Grayboys, T. 1978, "Interpretation by physicians of clinical laboratory results" *New England Journal of Medicine*, 299, pp. 999–1000; Eddy, D. M. 1982, "Probabilistic reasoning in clinical medicine: Problems and opportunities," In D. Kahneman, P. Slovic, & A. Tversky (Eds.), *Judgment under uncertainty: Heuristics and biases* pp. 249–267, Cambridge, UK: Cambridge University Press; Gigerenzer, G., & Hoffrage, U. 1995 "How to improve Bayesian reasoning without instruction: Frequency formats" *Psychological Review*, 102, pp. 684–704. Interessante è anche il seguente testo: Besozzi, M. 2013, *Errori Cognitivi, Proabilità e Descisioni Mediche*, disponibile qui: https://www.bayes.it/ebook/ECPEDM.pdf

[16] Wynne, C.D.L., 2019. *Dog Is Love: Why and How Your Dog Loves You*, Houghton Mifflin Harcourt.

[17] Bloom, P. 2013. *Just Babies: The origins of good and evil*. New York: Crown.

chiediamo con quale probabilità esatta sia vero che un bambino di quattro anni non sia in grado di dare indicazioni stradali; ci basta sapere che la stragrande maggioranza di essi non lo siano.

5. È adeguata la spiegazione basata sulla tipicità?

Indipendentemente dalla relazione tra la spiegazione della seconda legge della termodinamica in termini di tipicità e il modello a legge di copertura, ci si può domandare se il tipo di spiegazione basato sulla tipicità sia o meno adeguato.

Prima di tutto, osserviamo che lo schema esplicativo presentato non sembra far uso della nozione di causa. Questo è compatibile col fatto che in fisica la nozione di causa è palesemente assente. Però la nozione di tipicità viene usata per spiegare anche in altri ambiti in cui invece la nozione di causalità può essere rilevante. Si potrebbe infatti obbiettare che nelle cosiddette scienze seciali la spiegazione debba essere una sorta di speigazioen causale. In realtà si può mostrare come sembra che ci sia la giusta correlazione tra tipicità e causa quando essa sembra giocare un ruolo importante. Si consideri per esempio l'affermazione che "le mele rosse sono tipicamente dolci". Questa può essere spiegata da un fattore genetico che determini sia il colore che il sapore delle mele: questa mela è quello che è a cuasa dei suoi geni. Però questa affermazione è essa stessa un'affermazione di tipicità: quel gene tipicamente fa emergere mele sia rosse che dolci. In questo modo si vede come lo schema esplicativo basato sulla tipicità non si sposi necessariamente al modello a leggi di copertura, essendo compatibile con una comprensione causale della spiegazione.[18]

A parte questo, una caratteristica fondamentale della spiegazione basata sulla tipicità è il fatto di non essere universale: il fenomeno si spiega per la stragrande maggioranza dei casi, ma non per tutti. La domanda cruciale è se questo sia sufficiente ad effettivamente spiegare il fenomeno in maniera adeguata.
Tra i vari criteri usati per determinare l'adeguatezza di una spiegazione, si annoverano i seguenti: capacità informativa, capacità predittiva e attendibilità (*expectability*).
Analizzando il modello di spiegazione basato sulla tipicità in base a questi criteri si può argomentare che è adeguato. Infatti, un fenomeno viene adeguatamente spiegato quando, per esempio, si è in grado di fornirne una descrizione informativa e coincisa. Lo schema di tipicità è sicuramente semplice, come mostrato dalla sua formalizzazione che si può riassumere in una singola frase, visto che basta mostrare che un fenomeno è tipico, senza perdersi in troppi dettagli.
Lo schema è anche informativo, dato che ci dice come sarà il comportamento della stragrande maggioranza dei sistemi, anche se non di tutti.
Inoltre, come già enfatizzato, la connessione tra il modello ND fa sì che questo approccio abbia anche grandi capacità predittive. Infatti, se si è in grado di mostrare che una

[18] Si veda anche Wilhelm 2002, *op. cit.*

proprietà è tipica, allora si potrà anche prevedere con alto grado di confidenza di osservare tale proprietà in sistemi simili a quello analizzato. Ovvero, dato che si è mostrato che un gas tipicamente si espande, questo è quello che ci si deve aspettare che facciano i gas che osserveremo in futuro. Tali predizioni non potrebbero essere fatte con simile grado di confidenza se si riuscisse a spiegare il fenomeno solo per alcuni casi, e non la maggior parte. Infatti se si riuscisse a mostrare solo che alcuni gas, ma non la maggioranza, si espandono, sarebbe difficile dire cosa aspettarsi da un gas che non è ancora stato osservato, perché l'insieme dei gas che non si espandano non è necessariamente piccolo. Quindi, sebbene il fenomeno non venga riprodotto per *ogni* condizione iniziale, quello che sembra rendere la spiegazione accettabile è che esso possa comunque essere riprodotto per la *stragrande maggioranza* dei casi, *e non solo per pochi* casi.

Alcuni hanno suggerito che quando si mostra che un fenomeno è tipico, allora non c'è niente altro da spiegare perché spiegare significa rimuovere l'"effetto sorpresa".[19] Per esempio, il fatto che un gas a caso si espanda non è sorprendente, una volta che si comprende la spiegazione fornita da Boltzmann. Quello che sarebbe sorprendente è se un gas, scelto a caso, non si espandesse. Una spiegazione meno soddisfacente sarebbe una in cui si scegliesse accuratamente una condizione iniziale in modo che essa riproduca il fenomeno, che invece non sarebbe riprodotto per tutti gli altri casi. Se accettassimo questo tipo di spiegazione, appositamente scegliendo la condizione iniziale (*fine tuning*), si potrebbero spiegare troppe cose. Infatti l'idea di spiegare intesa come rimuovere l'"effetto sorpresa" è connessa a quello che Hempel chiamava "attendibilità" (*expectability*). Non ci stupiamo che un pezzo di sale si dissolva in acqua perché sappiamo la ragione per cui questo succede: gli ioni positivi dell'acqua (H+) attraggono gli ioni negativi del sale (Cl-), e quelli negativi dell'acqua (O-) attraggono gli ioni positivi del sale (Na+). Ci aspettiamo di osservare il fenomeno, che accadrà indipendentemente dale condizioni iniziali degli ioni (compatibili col fatto che siano in soluzione). Invece, consideriamo il caso di una scimmia che, digitando a caso su una tastiera, finisca per scrivere la *Divina Commedia*. Si può spiegare questo fatto scegliendo appositamente una condizione iniziale per cui questo effettivamente capiti. In questo senso, il fenomeno è possibile: non c'è nessuna legge di natura che lo proibisca. Quindi c'è un senso in cui il fenomeno viene spiegato. Però non ci aspettiamo che questo accada, il fenomeno è quindi sorprendente, e indicare una condizione iniziale specialissima, magari unica, per cui il fenomeno possa essere riprodotto non aiuta a diminuire la sorpresa. Quindi c'è un senso in cui non stiamo spiegando il fenomeno in maniera completa, se ci rifacciamo a condizioni iniziali particolari. In altre parole, non ci aspettiamo che scimmie scrivano libri schiacciando tasti a caso. Questo non è qualcosa che tipicamente le scimmie fanno e proprio per questo, se succede, troviamo questo fatto sorprendente. Perché una condizione iniziale diversa non

[19] Bricmont, J. 2001, "Bayes, Boltzmann and Bohm: Probabilities in Physics In: Jean Bricmont, GianCarlo Ghirardi, D. Dürr, F. Petruccione, M.C.Galavotti, & N. Zanghí (eds) *Chance in Physics: Foundations and Perspectives. Lecture Notes in Physics*, 574: pp. 3-21. Berlin: Springer; Bricmont, J. 2020 "Probabilistic Explanations and the Derivation of Macroscopic Laws" In V. Allori (ed.) *Statistical Mechanics and Scientific Explanation: Determinism, Indeterminism and Laws of Nature*, World Scientific.

avrebbe dato lo stesso risultato. Invece, se si riesce a mostrare che la maggior parte delle condizioni iniziali dà luogo a quel fenomeno, cioè se si dimostra che il fenomeno è indipendente dalla condizione iniziale, allora la sorpresa cessa. Quindi questo suggerisce che quando si cerca la spiegazione di un fenomeno in realtà quello che si cerca è un meccanismo che rimuova la sorpresa nel vede tale fenomeno, e un meccanismo che garantisce questo è uno tale per cui o la totalità o la stragrande maggioranza dei casi genera tale fenomeno.

Si potrebbe obiettare che ci sia comunque qualche cosa che manca, perché dopo tutto non si riesce a riprodurre il fenomeno per *tutte* le condizioni iniziali. Quindi, si potrebbe sostenere che si debba dare una spiegazione di un fenomeno anche quando questo sia atipico. Sebbene questa sia una posizione possibile, è difficile però capirne la motivazione: se la forza di avere una spiegazione per tutti i casi viene dal fatto che questo rende il fenomeno prevedibile, allora tale forza rimane per il fenomeno tipico ma non per quello atipico (per definizione). Quindi, che aspetto avrebbe una spiegazione di un fenomeno atipico? Presumibilmente farebbe riferimento alle condizioni iniziali speciali. Cosa spiega che l'intero testo della *Divina Commedia* sia uscito dalla macchina da scrivere usata da una scimmia? Quello che spiega questo fatto è che esista una condizione iniziale particolarissima che lo abbia permesso. Non è forse una spiegazione accettabile, sebbene non sia basata sul concetto di tipictà? Rispondendo affermativamente, alcuni hanno argomentato che richiedere che per spiegare si debba riprodurre il fenomeno per la stragrande maggioranza delle condizioni iniziali sia in verità troppo stringente: spiegazioni che utilizzano condizioni iniziali speciali sono comunque spiegazioni. Infatti, basta fornire una condizione iniziale per cui il fenomeno emerga, senza necessariamente menzionare per quante condizioni iniziali questo sia vero.[20]
Sebene questa posizione sembri legittima, in questo caso si perde il legame tra spiegazione e attendibilità, perche' la sorpresa di osservare il fenomeno deriva dal realizzarsi di una condizione iniziale atipica, speciale. In altre parole, ci si attende un fenomeno se è tipico, quindi la tipicita' di un fenomeno minimizza la sorpresa. Al contrario se il fenomeno è atipico, se quindi il fenomeno emerge soltanto per condizioni iniziali speciali, si massimizza la sorpresa: si rimane ancora più sorpresi di ritrovarsi in quell raro caso in cui il fenomeno si realizza. Il fenomeno atipico non contraddice o falsifica la teoria, infatti viene previsto: esiste una condizione iniziale in cui si realizza. Ma non è chiaro che venga spiegato, se si vuole connettere l'attendibilità alla spiegazione, dato che il feomeno tipico non ce lo si può aspettare per definizione. E perché si dovrebbe connettere così fortemente le due nozioni? Perché se non lo si facesse la spiegazione sembrerebbe *ad hoc*, artificiale, disperata: la scimmia può scrivere la *Divina Commedia* non è quello che le scimmie tipicamente fanno. Osservare questo spiega come mai si trovi sorprendente che una scimmia scriva libri famosi mentre non si meraviglia che i gas si espandano. Al di la' di questo, mi risulta difficile capire cosa si possa chiedere di più.

---

[20] [20] Si veda per esempio Valentini A. 2020, "Foundations of Statistical Mechanics and the Status of the Born Rule in the de Broglie-Bohm pilot-wave theory" In V. Allori (ed.) *Statistical Mechanics and Scientific Explanation: Determinism, Indeterminism and Laws of Nature*, World Scientific.

Per concludere, fatemi osservare che l'idea che una spiegazione soddisfacente faccia spesso riferimento alla tipicità viene confermata dalla pratica scientifica. Per esempio, una delle ragioni per cui è stata proposta la teoria dell'universo inflazionario è che il modello del Big Bang richiede assunzioni stringenti sulle condizioni iniziali. Al contrario, la teoria inflazionaria è in grado di spiegare i fenomeni senza far riferimento a condizioni iniziali speciali, e proprio per questo motivo è stata considerate una teoria migliore.[21]

6. Conclusioni

Per riassumere, in questo articolo ho argomentato che il modello a legge di copertura secondo cui una spiegazione è la conclusione di un argomento che contiene leggi di natura come premesse, con le debite precisazioni, risulta piuttosto adatto a descrivere le spiegazioni che si incontrano in fisica classica. Questo è vero sia che la derivazione del fenomeno è esatta, sia quando si ricorre ad approssimazioni. Ho mostrato poi come la spiegazione delle leggi della termodinamica in termini della meccanica statistica abbia in comune alcuni aspetti del modello nomologico deduttivo, ma anche del modello statistico induttivo. A questo proposito ho evidenziato come alcuni abbiano argomentato come invece del concetto di probabilità, usato nel modello statistico induttivo, sia invece preferibile usare in questo contesto il concetto di tipicità. Ho infine mostrato come si possa argomentare a favore del fatto che tale tipo di spiegazione, che ho chiamato spiegazione basata sulla tipicità, risulti effettivamente un tipo di spiegazione adeguata e che tale tipo di spiegazione sia comune nella pratica scientifica.

[21] Guth, A. H. 1981 "Inflationary Universe: A Possible Solution for the Horizon and Flatness Problems" *Physical Review* D 23: pp. 347-356; Guth, A. H., & Steinhardt P.J. 1984 "The Inflationary Universe." *Scientific American*: pp. 116-128.