



**Renato Nobili**

## **11. Filosofia scientifica**

### **L'emergenza di proprietà interamente nuove**

#### **1. Introduzione**

Il fisico statunitense Philip Anderson, che nel 1977 vinse il premio Nobel per i suoi studi sulla superconduttività ad alta temperatura, in un articolo divulgativo del 1972 faceva notare che nella formazione delle teorie scientifiche si possono distinguere due procedimenti di ricerca opposti e complementari. L'uno, che può definirsi *intensivo*, parte dallo studio dei fenomeni che si osservano in un sistema grande e/o complesso, in particolare i fenomeni che non sembrano facilmente spiegabili con quanto già si sa, e cerca di risalire alle leggi fondamentali che governano i comportamenti delle parti elementari del sistema. L'altro, che può definirsi *estensivo*, parte da un insieme di leggi fondamentali capaci di descrivere abbastanza bene il comportamento dei sistemi semplici ed elementari che si ritengono costituire i sistemi grandi e complessi, e cerca di spiegare su questa base le proprietà e i comportamenti di questi ultimi.

Si può ragionevolmente supporre che in ogni disciplina scientifica ben formata i due procedimenti, benché orientati in senso opposto, finiscano per rispecchiarsi l'uno nell'altro e in definitiva presentarsi come due percorsi equivalenti della descrizione scientifica. Questo è vero per la meccanica classica. Le tre leggi di Newton che descrivono il moto di un punto materiale sotto l'azione di una forza permettono di calcolare con grande precisione il moto dei corpi celesti e delle macchine. Viceversa, i comportamenti dei corpi celesti e delle macchine ci permettono di risalire in modo univoco alle leggi di Newton. Tuttavia nella fisica post-newtoniana, e specialmente in quella moderna, le cose non vanno esattamente in questo modo.

Anderson indicava le seguenti corrispondenze tra entità che si presentano nella scienza **Y** e che obbediscono alle leggi fondamentali della scienza **X**:

| <b>X</b>                           | <b>Y</b>                                    |
|------------------------------------|---|
| Fisica delle particelle elementari | Fisica dello stato solido o dei molti corpi |
| Fisica dei molti corpi             | Chimica                                     |
| Chimica                            | Biologia molecolare                         |
| Biologia molecolare                | Biologia cellulare                          |
| ...                                | ...   |
| ...                                | ...   |
| ...                                | ...   |
| Neurofisiologia                    | Psicologia                                  |
| Psicologia                         | Scienze sociali                             |

Chiaramente, la ricerca estensiva procede da **X** a **Y** e quella intensiva da **Y** a **X**, tuttavia i due percorsi non sono speculari. Per un verso, nel passare dal livello più semplice a quello più complesso, non si ha l'idea di cosa si potrà scoprire. La ragione di ciò è che la quantità e la varietà delle cose da

scoprire diventano numerosissime a mano a mano che aumenta la complessità del sistema. Per l'altro, quando si procede a ritroso, vale a dire da  $Y$  a  $X$ , si presentano incertezze e ambiguità difficili da risolvere, che non permettono di identificare in modo univoco le proprietà di  $X$ . La ragione sta nel fatto che possono esistere diversi livelli  $X_1, X_2, \dots$  che portano con eccellente approssimazione allo stesso risultato  $Y$ . Ad esempio, la meccanica classica ignorava l'esistenza degli atomi, tuttavia la teoria dei corpi macroscopici era dedotta da quella dei punti materiali.

In controtendenza rispetto alla visuale riduzionista, allora ancora dominante nelle scienze fisiche e naturali, secondo la quale tutte le proprietà di un sistema sono spiegabili sulla base delle leggi che governano il comportamento delle parti, Anderson rilevava che, a ciascun livello di complessità superiore, si manifestano proprietà interamente nuove la cui comprensione richiede ricerche che sono altrettanto fondamentali di quelle del livello inferiore.

*“L'esistenza di una gerarchia di livelli – egli scriveva – non implica che la scienza  $X$  sia scienza  $Y$  applicata. A ciascun livello si rendono necessarie leggi, concetti e generalizzazioni interamente nuove, che richiedono ispirazione e creatività di grado pari a quello del livello inferiore. La psicologia non è neurofisiologia applicata e la biologia non è chimica applicata.”*

Ad esempio, nella fisica degli stati condensati della materia la *superconduttività* e la *superfluidità* si presentano come proprietà che erano imprevedibili prima della loro scoperta sperimentale. La superconduttività fa sì che correnti elettriche di grandissima intensità possano circolare permanentemente in un anello di piombo raffreddato con elio liquido, cosicché l'anello si comporta come un potente magnete. La superfluidità fa sì che nell'elio liquido si possono formare vortici perenni e che, a causa della sua straordinaria capillarità, il liquido salga lungo le pareti del recipiente e discenda giù dal bordo nel vassoio sottostante. In entrambi i casi, le interazioni atomiche appaiono soverchiate dallo stabilirsi di comportamenti collettivi perfettamente ordinati e privi di dissipazione energetica che non trovano alcuna spiegazione nella fisica classica.

C'è da chiedersi innanzi tutto se l'emergere di proprietà interamente nuove – un fatto che può accadere quando si passa da un livello descrittivo inferiore  $X$  a uno superiore  $Y$  – sia prevedibile sulla base della conoscenza esatta delle leggi che governano il comportamento del sistema al livello inferiore, o sia invece una eventualità imprevedibile a priori, che può trovare spiegazione solo a posteriori semplicemente perché capita di osservarla. Certo è che in un tale passaggio l'improvviso apparire di proprietà interamente nuove comporta un radicale mutamento di linguaggio e la messa in campo di apparati interpretativi diversi da quelli usati per descrivere il livello inferiore. Come e perché accade questo?

Alcuni epistemologi usano definire *proprietà emergenti*, o semplicemente *emergenze*, di un sistema naturale, quelle che non sono spiegabili sulla base delle leggi che governano le interazioni tra le parti del sistema. Secondo questo criterio l'irreversibilità dei processi termodinamici sarebbe un'emergenza perché non è spiegabile sulla base delle leggi che governano il moto delle particelle, giacché queste leggi sono perfettamente simmetriche rispetto all'inversione di segno del tempo. Purtroppo questa definizione è priva di senso se è formulata, come spesso si dà il caso, applicando ragionamenti di tipo fisico classico. Il punto è che *le emergenze non possono trovare alcuna spiegazione nell'ambito della fisica e della logica classiche*.

La ragione di ciò è molto semplice. Nella fisica classica lo stato di un sistema coincide con la collezione ordinata degli stati di tutte le sue parti. D'altronde ogni aspetto, proprietà o qualità di un sistema è una funzione di stato del sistema. Ne segue che ogni possibile proprietà del sistema è completamente descritta dalle proprietà delle parti; ciò implica che tutte le proprietà del sistema sono spiegabili, in contrasto con la definizione di emergenza data sopra, e semmai suggerisce l'idea che per spiegare le emergenze sia necessario uscire dai limiti della fisica classica.

A questo proposito è interessante considerare come la termodinamica, a torto ritenuta parte integrante della fisica classica, sia in realtà in netta contraddizione con questa e compatibile soltanto con la fisica quantistica. A conferma di ciò basta considerare che nel 1901 il fisico tedesco Max Planck introdusse l'ipotesi della quantizzazione dell'energia proprio perché la termodinamica applicata alla teoria classica delle onde elettromagnetiche conduceva a risultati paradossali e affetti da divergenze matematiche prive di senso. Dopo quella scoperta, la fisica non poté più essere quella di

prima e dovette subire quella radicale rifondazione che sfociò nella nascita della meccanica quantistica. Fu così che la chimica, nata nel settecento e sviluppata nell'ottocento come disciplina autonoma distinta dalla fisica, negli anni '30 del secolo scorso divenne meccanica quantistica di atomi e molecole.

Secondo Anderson, la nascita della vita nel sistema terracqueo primordiale è un'emergenza della chimica. Applicando lo stesso criterio potremmo affermare che gli organismi sono emergenze dei sistemi biologici multicellulari; che gli ecosistemi sono emergenze dei sistemi di organismi; infine, che le menti autocoscienti sono emergenze dei sistemi nervosi dei primati. Sarebbe insensato cercare di spiegare la vita sulla base delle leggi della chimica, o la formazione degli organismi sulla base della biologia molecolare, o la produzione dell'autocoscienza sulla base della proprietà dei neuroni e delle reti nervose. Si prospetterebbe in questo modo una stratificazione lineare di livelli attraverso e sopra i quali la manifestazione del nuovo si estende verticalmente.

La tesi di Anderson è tuttavia discutibile. Riguardo alla possibilità di spiegare le emergenze, bisogna considerare che talvolta, nel passaggio da un livello **X** a un altro **Y**, si eseguono semplificazioni e approssimazioni che possono mascherare e sopprimere proprio quelle proprietà fondamentali di **X** che sono invece essenziali per spiegare le emergenze che si presentano nel passaggio dal livello **Y** a un terzo livello **Z**. Per esempio, nel passare dalla fisica dell'atomo alla chimica, si eliminano tutti i dettagli che riguardano i cambiamenti di conformazione delle macromolecole e i loro possibili effetti nell'ambiente in cui queste si trovano. I cambiamenti conformazionali delle proteine e delle catene di acidi nucleici sono invece essenziali per spiegare ciò che accade in una cellula animale o vegetale. Ciò contrasta l'idea di un ordinamento lineare verticale di livelli.

Riguardo all'opportunità di definire la vita come un'emergenza della chimica, è opportuno considerare che la cellula non è semplicemente un piccolo sacchetto lipidico contenente un protoplasma proteico colloidale dotato di proprietà chimiche tanto portentose quanto misteriose, come si continuò a credere fino alla metà del secolo scorso. Essa è piuttosto un sistema elettrochimico assai complesso e ben organizzato formato da membrane lipidiche sostenute da un citoscheletro in continuo rifacimento, ospitante un ricco repertorio di proteine di membrana ed eliche di acidi nucleici. È sbagliato concepire queste macromolecole come "sostanze chimiche" in soluzione acquosa. Esse sono in realtà vere e proprie nanomacchine che s'installano nelle membrane cellulari per svolgere un'incredibile varietà di funzioni: filtri ionici, pompe, sensori chimici, meccanici, elettrici e persino magnetici, e inoltre dispositivi di codificazione e decodificazione di messaggi e altro, controllate da numerosi circuiti a retroazione che ne regolano con grande accuratezza il funzionamento. Possiamo dire che, per spiegare la vita, è assai più appropriato usare un linguaggio ingegneristico elettronico e informatico piuttosto che un linguaggio chimico.

In modo analogo, per spiegare come l'autocoscienza, intesa come capacità del pensiero di pensare il pensato, possa emergere dal sistema nervoso centrale, non basta conoscere come interagiscono i neuroni e assumere, come alcuni fanno, che la coscienza sia una sorta di grandezza proporzionale alla complessità della rete nervosa o alla quantità d'informazione complessivamente elaborata dai neuroni, come molti ingenuamente ritengono, ma bisogna anche avvalersi di nozioni e concetti logici e matematici astratti che appartengono alla teoria degli algoritmi, in particolare dei teoremi di Gödel riguardanti le capacità autoreferenziali che gli algoritmi acquistano quando sono combinati con le loro teorie assiomatiche (Hofstadter, 1979). Queste nozioni e concetti, unitamente alla teoria dei metalinguaggi di Tarski (1936), a quella delle *macchine calcolatrici universali* di Turing (1936) e alla teoria degli *automi costruttori universali* di von Neumann (1966), formano un corpo disciplinare completo che sta alla base di una teoria generale dei sistemi capaci di generare processi di complessità indescrivibile e dotati di capacità autoreferenziali e autoriproduttive.

Nel passaggio dal vecchio secolo al nuovo, i paradigmi strutturalisti della fisica novecentesca hanno ceduto il passo a questa nuova disciplina che possiamo definire *Scienza della Complessità*. Essa prende origine dalla scoperta che i processi di sviluppo, possiamo anche dire i *comportamenti*, dei sistemi complessi dotati di memoria a lungo termine appartengono, in generale, a un tipo logico – nel senso di Bertrand Russell (1913) – incommensurabilmente più elevato di quello delle *strutture* fisiche

dei sistemi; cioè, in breve, che la complessità del *diacronico* è incommensurabilmente superiore a quella del *sincronico* e pertanto non rappresentabile in questo, non “schiacciabile” su questo. Ciò contrasta la visione puramente geometrica della dinamica spazio-temporale newtoniana ed einsteiniana. Soltanto prendendo coscienza di questo fatto, e del mutamento di orizzonte concettuale che ne consegue, è oggi possibile sviluppare una teoria delle emergenze che comprenda i fenomeni biologici fino ai loro più alti livelli.

## 2. La tipologia delle emergenze

Prima di entrare in dettaglio nel merito dei principali fattori delle emergenze, è opportuno rilevare che le emergenze che si presentano in ambiti scientifici diversi sono in generale di tipo assai diverso e spesso prive di caratteristiche comuni. Possiamo dividerle in due grandi categorie: le *emergenze strutturali* della materia, che si manifestano come proprietà stabili di sistemi fisici in condizioni di equilibrio termodinamico – per esempio la superconduttività e la superfluidità – e le *emergenze comportamentali*, che si manifestano nei sistemi termodinamici fuori equilibrio che evolvono irreversibilmente – per esempio quelle che coinvolgono processi di elaborazione dell’informazione di vario tipo e complessità, che sono essenziali per l’esistenza della vita.

La rilevanza di questa distinzione sta nel fatto che le emergenze strutturali sono descrivibili e classificabili mentre quelle comportamentali possono raggiungere livelli di complessità indescrivibile e inclassificabile. Di questo tipo sono ad esempio certi processi di calcolo *ricorsivo* – vale a dire che usano ciclicamente dati già memorizzati per produrne di nuovi da riporre nella stessa memoria – come pure i processi di sviluppo embrionale e quelli di evoluzione delle specie.

Le emergenze strutturali che si manifestano nei sistemi omogenei (gas, solidi, liquidi) hanno il carattere di proprietà permanenti della materia che possono comparire o svanire in corrispondenza di variazioni di pressione e temperatura. Questi mutamenti di stato della materia si chiamano *transizioni di fase*. È stato dimostrato che, in corrispondenza di queste, la simmetria del sistema subisce un cambiamento (Landau e altri, 1986). Per quanto queste transizioni siano importanti anche per i sistemi biologici, esse appartengono a livelli fenomenici di rango inferiore a questi.

Una classe importante di emergenze di tipo piuttosto semplice è quella dei sistemi termodinamici fuori equilibrio soggetti a processi dissipativi stazionari. L’esempio più semplice è la fiamma di una candela. Questa mantiene invariata la sua forma come se fosse un oggetto immobile nello spazio. In realtà in essa non c’è nulla di fermo giacché è attraversata da un flusso continuo di materia che sale dal basso verso l’alto. Essa è sede di un processo metabolico molto semplice, che si alimenta di vapori di paraffina che reagiscono con l’ossigeno dell’aria emettendo fotoni in tutte le direzioni e scaricando nell’ambiente anidride carbonica e vapore acqueo. Inoltre può riprodursi per innesco, come la fiamma olimpica, o anche morire a causa di un semplice soffio. In questo senso, come ha osservato von Bertalanffy (1968), essa è il più semplice paradigma del vivente. Infatti, tutti gli organismi viventi sono sistemi termodinamici dissipativi fuori equilibrio che, in virtù di un processo metabolico simile a quello della combustione, conservano intatta la loro forma, fino a quando una perturbazione fatale li conduce alla morte e alla dissoluzione.

A differenza dai sistemi biologici, che sono dotati di memoria a breve e lungo termine, e sono sedi di processi termodinamici molto complessi, la memoria della fiamma è molto breve; quel tanto che basta a permettere la continuazione della combustione. A causa di ciò essa non può essere sede di processi ricorsivi ed è perciò incapace di evolvere verso livelli di maggiore complessità.

Com’è stato argomentato da vari autori, in primo luogo da Erwin Schrödinger nel suo celebre libretto intitolato *Che cos’è la vita?* (1946), i sistemi biologici sono innanzi tutto sistemi termodinamici soggetti a variazioni negative di entropia capaci di memorizzare dati e di far circolare segnali trasportatori d’informazione. Da un punto di vista puramente termodinamico, l’informazione è *variazione negativa di entropia* o, più brevemente, *neg-entropia*. I sistemi che contengono e/o trasportano informazione non possono essere in equilibrio termodinamico, cioè nello stato di massimo disordine microscopico o di massima entropia. Infatti, i dati memorizzati in un supporto materiale tendono a deteriorarsi fino alla cancellazione totale a mano a mano che il supporto evolve verso lo stato di massima entropia; inoltre, in un sistema in equilibrio termodinamico, tutte le grandezze

microscopiche fluttuano in modo completamente disordinato e tutte le correnti microscopiche sono mediamente nulle, cosicché non può aver luogo alcuna effettiva propagazione di segnali. L'impatto di queste idee nei biologi fu enorme, tanto da poter affermare che la biologia moderna è nata nel momento stesso in cui si comprese che la forza magica che anima il vivente è in realtà quell'entità per certi aspetti astratta e metafisica che va sotto il nome di "informazione".

Tuttavia, le condizioni di essere fuori equilibrio e di possedere un metabolismo energetico possono spiegare la formazione di configurazioni ordinate o semi-ordinate più o meno variabili nel tempo, come hanno spiegato Glansdorff e Prigogine (1971), ma non bastano a spiegare come un sistema termodinamico di memoria volatile, come quella della fiamma, possa evolvere verso livelli di complessità crescente. Il quadro fenomenologico più ampio e complesso che si può osservare in natura per i sistemi termodinamici di questo tipo è quello delle meteorologie planetarie.

Affinché un sistema termodinamico fuori equilibrio possa evolvere verso livelli di complessità crescente, è necessario che l'informazione sia immagazzinata in collezioni discrete di dati, come i caratteri alfanumerici di un testo, gli aminoacidi in una proteina o gli acidi nucleici in un'elica di DNA, e quindi processata ripetutamente. L'informazione distribuita in un continuo, ad esempio una traccia musicale registrata su nastro magnetico, si deteriora progressivamente nel corso del tempo.

### 3. I fattori delle emergenze strutturali della materia

Alcuni riduzionisti hanno difficoltà ad accettare l'idea dell'infinito in atto. Poiché la mente umana non può immaginare e tanto meno descrivere un numero infinito di cose, essi ritengono che la nozione d'infinito in atto debba essere bandita dalle considerazioni scientifiche o, al più, fatta valere soltanto induttivamente, come tendenza a un limite. Di conseguenza, essi tendono a evitare di porsi domande riguardanti i fenomeni fisici che dipendono in modo essenziale dall'oggettiva infinitezza delle cose, ma che ciononostante possono avere un senso nei nostri pensieri – ad esempio, l'infinità degli stati di un sistema o un sistema costituito d'infinita parti – e saranno invece inclini a immaginare il continuo come un discreto molto fitto e l'infinitamente esteso come qualcosa che occupa l'interno di una scatola molto grande.

Si dà tuttavia il caso che nella fisica moderna lo stato fisico di un sistema debba spesso essere concepito come la sovrapposizione di un numero infinito di onde quantistiche, che rappresentano gli stati del sistema, e che lo stesso universo debba essere concepito come un sistema infinitamente esteso e contenente un numero infinito di parti. Da un punto di vista rigorosamente matematico l'assunzione dell'infinito in atto è necessaria se si vuole che abbia veramente senso considerare una termodinamica fuori equilibrio dell'universo e, in particolare, che durante la cosmogenesi siano avvenuti transizioni di fase e cambiamenti di simmetria del sistema universo.

D'altro canto, un difetto culturale caratteristico di molti epistemologi e filosofi non riduzionisti è la scarsa conoscenza della logica quantistica, in particolare la convinzione che una descrizione esaustiva di un fenomeno possa darsi nei termini di un unico linguaggio logicamente coeso e strutturato secondo i canoni della logica classica. Questo non è vero, giacché la descrizione completa di un sistema fisico quantistico richiede una molteplicità di linguaggi semanticamente non equivalenti e reciprocamente incompatibili. I mutamenti di linguaggio che si rendono necessari per descrivere le emergenze strutturali di un sistema quantistico riflettono la necessità di usare linguaggi diversi per descrivere ciò che accade a livelli di descrizione diversi.

Ad esempio, se descriviamo le correnti elettriche come uno sciame di particelle cariche che si muovono in un conduttore non potremo spiegare la superconduttività, perché in questo caso il fattore che determina l'emergenza di questo strano fenomeno è la coerenza di fase delle onde quantistiche associate a coppie di elettroni di momento rotazionale opposto. È una conseguenza caratteristica della quantizzazione che i momenti rotazionali dei quanti, divisi per  $h/2\pi$ , dove  $h = 6,624 \times 10^{-34}$  joule $\times$ sec è la costante di Planck, possono essere solo numeri interi o seminteri, detti valori di *spin* (trottola). Allo stesso modo, se concepiamo la luce come uno sciame incoerente di fotoni – com'è il caso della luce emessa da una lampadina – non potremo spiegare come si forma il sottile pennello di luce coerente emesso da un laser – che è una vera e propria emergenza del campo elettromagnetico – perché in questo caso il fattore dell'emergenza è la coerenza di fase delle onde associate ai fotoni. In entrambi i

casi, l'emergenza del comportamento coerente deriva dal mutamento sostanziale delle grandezze fisiche che sono in gioco nei processi di osservazione e dal fatto che si passa dalla visuale particellare a quella ondulatoria a essa complementare.

Una difficoltà concettuale che spesso si eredita dalla fisica classica, talvolta senza rendersene ben conto, è quella di immaginare le parti di un sistema divisibile in parti come un *insieme* di elementi separati e distinguibili, senza considerare che in realtà nella fenomenologia quantistica gli stati delle parti non sono rappresentati da punti di insiemi separati, ma da vettori complessi di uno spazio a infinite dimensioni – quali sono in ultima analisi le *funzioni d'onda* quantistiche – che, nel formarsi del sistema composto, s'intrecciano tra loro (*entangle*) in modo difficilmente districabile.

Un'altra difficoltà concettuale che s'incontra nel tentativo di spiegare le emergenze nasce dal fatto che generalmente si ritiene che le proprietà di un sistema dipendano in modo univoco dalle leggi che lo governano. In realtà le leggi permettono di definire in modo univoco le proprietà del sistema soltanto se questo è formato da un numero finito di parti elementari, poiché, come avremo occasione di spiegare nel seguito, i sistemi formati da infinite parti ammettono un'infinità di possibili rappresentazioni non equivalenti in spazi degli stati disgiunti, reciprocamente esclusivi e dotati di proprietà assai diverse tra loro. Cosicché si pone il problema di scegliere quello, tra gli spazi degli stati possibili, che meglio si presta a rappresentare i fenomeni che si osservano in natura. Ad esempio, quella, tra le possibili rappresentazioni dell'universo, che ammette l'esistenza della vita.

Per cercar di precisare questi argomenti descriverò con maggior dettaglio quali sono i principali fattori che determinano le emergenze strutturali della materia. Essi possono ricondursi a quattro fondamentali proprietà generali dei sistemi fisici quantistici e alle loro combinazioni:

1. I salti dell'*aleph*.
2. Osservabili incompatibili e pluralismo logico.
3. Gli intrecci (*entanglements*) di stati quantistici.
4. Le *rottture spontanee* delle simmetrie.

### 3.1. I salti dell'*aleph*

Per distinguere tra loro le diverse “numerosità” degli insiemi infiniti, George Cantor (1885-87) introdusse la nozione di *cardinalità* indicandola col simbolo  $\aleph$  (*aleph*), la prima lettera dell'alfabeto ebraico, seguito da un indice intero. Egli attribuì agli insiemi numerabili – come i numeri interi e i razionali – la cardinalità  $\aleph_0$ , e, a quelli continui – come i punti di una figura geometrica estesa – la cardinalità  $\aleph_1$ , dimostrando che questa è incommensurabilmente più grande di  $\aleph_0$ . Queste sono le cardinalità tipiche degli insiemi che s'incontrano nella fisica: per esempio, numero di parti di un sistema, numero degli stati del sistema, numero di variabili da cui dipende una grandezza fisica ecc. Curiosamente i numeri razionali, pur essendo infinitamente fitti, hanno la stessa cardinalità degli interi e i punti di un segmento hanno la stessa cardinalità di quelli di un quadrato o di un cubo.

Cantor dimostrò inoltre che un insieme formato da tutti i sottoinsiemi di un insieme di cardinalità  $\aleph_n$  ha cardinalità  $\aleph_{n+1}$ , che è incommensurabilmente maggiore di quella di  $\aleph_n$ . Ad esempio, la totalità dei sottoinsiemi di un insieme discreto forma un insieme continuo, la totalità dei sottoinsiemi di un continuo ha cardinalità  $\aleph_2$  ecc. Egli ottenne in questo modo una gerarchia infinita di cardinalità ponendo così le basi di una visione infinitamente complessa della matematica.

In sede matematica si usa generalizzare gli enti matematici che formano un certo insieme  $S$  di cardinalità  $\aleph_n$  estendendone le proprietà e le operazioni caratteristiche a un insieme  $S'$  di cardinalità superiore  $\aleph_{n+1}$ ; per esempio, estendendo le proprietà aritmetiche dei numeri interi ai numeri reali. Talvolta lo studente ingenuo crede che allora tutte le proprietà di  $S'$  abbiano il loro corrispondente in  $S$  e siano simili a quelle di  $S$ . Purtroppo, così facendo egli perde di vista quelle proprietà che non sono pensabili in  $S$  semplicemente perché qui non hanno senso. Il salto dell'*aleph*, infatti, introduce proprietà interamente nuove che non sono spiegabili ragionando come se si avesse a che fare con  $S$ .

Il primo esempio storico di questo fenomeno matematico fu la drammatica scoperta di Pitagora che la diagonale di un quadrato contiene un numero di punti che non può essere né pari né dispari e che la sua lunghezza non è esprimibile come rapporto tra due numeri interi. Ciò gli apparve una contraddizione

insanabile e fatale della geometria, giacché pensava che tutti i segmenti contenessero un numero finito di punti, che egli chiamava atomi. Si racconta che egli arrivò al punto di far uccidere l'allievo che era andato a rivelare quell'insanabile contraddizione. Semplicemente, a Pitagora mancavano le nozioni di numero razionale e numero reale. Più tardi i matematici capirono che, nel passaggio dal discreto al continuo, emergono proprietà interamente nuove: la radice quadrata di un numero intero può non essere uguale al rapporto tra due interi, vale a dire un numero razionale.

Nella fisica classica, il passaggio dal discreto al continuo introduce novità assai rilevanti. Ad esempio, mentre il calore specifico di un sistema con un numero finito di gradi di libertà è finito, quello di un continuo, ad esempio il calore specifico di un corpo elastico ideale, vale a dire di consistenza materiale continua, o del campo elettromagnetico all'interno di una cavità, è invece infinito, giacché il numero dei loro modi di oscillazione, cioè il numero dei loro *gradi di libertà*, è infinito. Se così fosse la temperatura dell'universo sarebbe lo zero assoluto, giacché il calore che una porzione di materia assorbe per raggiungere l'equilibrio termodinamico è proporzionale al numero di gradi di libertà. Fu appunto questa la ragione che indusse Max Planck a introdurre l'ipotesi della discretizzazione dell'energia nei sistemi continui, vale a dire la *quantizzazione*.

Abbiamo qui un chiaro esempio di come l'emergenza di un'impossibilità logica conseguente al salto di un *aleph* obblighi la scienza ad abbandonare i suoi fondamenti, prima ritenuti saldissimi.

### 3.2. Osservabili incompatibili e pluralismo logico

Nella fisica si dà il caso che esistano strumenti di osservazione materialmente incompatibili, tali cioè che dove se ne usa uno non si può contemporaneamente usare l'altro. Così, ad esempio, se voglio estrarre da uno sciame di particelle una particella che passa per un punto abbastanza preciso nello spazio, dovrò usare uno schermo con un forellino abbinato a un dispositivo di cattura posto oltre lo schermo. Invece, se voglio misurare la lunghezza d'onda di una radiazione luminosa dovrò usare un reticolo di diffrazione, il quale non è altro che è uno schermo con moltissime fenditure equidistanti e parallele, abbinato a un dispositivo, posto di fronte al reticolo, che permette di osservare le frange che si formano per interferenza delle onde.

È evidente che con questi mezzi non si potrà misurare nello stesso tempo e nello stesso posto sia la posizione di una particella sia la lunghezza d'onda di una radiazione, giacché lo schermo col forellino ricopre, mascherandolo, quello con le fenditure.

Nella fisica classica questa reciproca incompatibilità dei mezzi di osservazione è irrilevante, giacché in questo caso particelle e onde sono entità che mantengono separate e ben distinte le loro caratteristiche fisiche. Tuttavia nella meccanica quantistica, dove le entità elementari della materia – come ad esempio gli elettroni e i fotoni – si manifestano talvolta come particelle talaltra come onde, e dove la quantità di moto è definita dalla lunghezza d'onda di De Broglie (1924), non si potrà mai determinare contemporaneamente e con precisione arbitrariamente grande sia la posizione sia la quantità di moto del quanto.

Il meglio che si potrà fare sarà di sovrapporre uno schermo con un foro abbastanza grande a un reticolo di diffrazione con fenditure abbastanza fitte, ottenendo nel complesso un reticolo di diffrazione di estensione limitata e pertanto capace di produrre poche frange d'interferenza per giunta distorte. In questa situazione, sia la posizione sia la quantità di moto di un quanto di materia saranno determinate solo in modo approssimativo: se diminuisco il diametro del foro, aumento la precisione della misura di posizione ma diminuisco quella della quantità di moto, se faccio il contrario, aumento la seconda ma diminuisco la prima. Per questa ragione si dice che la *posizione* e la *quantità di moto* di una particella microscopica di materia sono due grandezze *incompatibili*. Questo effetto va sotto il nome di principio d'indeterminazione di Heisenberg (1925).

Parallelamente a questo fenomeno avrà luogo uno sdoppiamento logico del linguaggio: se voglio parlare con precisione di una proprietà, dovrò evitare di parlare con precisione dell'altra, e viceversa. Questa regola va sotto il nome di *principio di complementarità*.

Per questa ragione le entità elementari della materia non dovrebbero propriamente chiamarsi "particelle elementari", ma piuttosto "quanti" di materia, giacché le loro proprietà particellari riflettono

solo un aspetto della loro oggettività fisica. Tuttavia il termine “particella elementare” può essere usato quando il quanto è rappresentato come un pacchetto d’onde di piccole dimensioni.

Questo stato di cose è del tutto generale e vale per molte altre coppie di grandezze fisiche, in particolare per la coppia *tempo/energia* e per quella *angolo/momento angolare*. In realtà, la fisica quantistica ammette una molteplicità infinita di proprietà reciprocamente incompatibili, e di corrispondenti linguaggi complementari, che sono indispensabili per spiegare in modo completo i fenomeni naturali. L’emergenza di proprietà strutturali interamente nuove ha in questo pluralismo fenomenologico e logico la sua completa spiegazione.

### 3.3. *Gli intrecci di stati quantistici*

Nella fisica classica, lo stato di un sistema composto di due o più parti è semplicemente la collezione degli stati delle parti. Corrispondentemente, l’insieme delle proprietà del sistema composto s’identifica con la collezione ordinata delle proprietà delle sue parti. Una conseguenza immediata di questa regola è che le parti di un sistema, sebbene interagenti, mantengono ben distinte le loro rispettive identità anche durante l’evoluzione del sistema. Ad esempio, i pianeti che ruotano attorno al sole e i loro numerosi satelliti conservano in ogni istante tutte le loro proprietà distintive, le quali non si dissolvono mai per ricomporsi in un *unicum* indistinto chiamato sistema solare. Allo stesso modo, un uomo e una donna, benché sposati, non assumono mai l’aspetto di un animale a quattro occhi e otto zampe, o di qualcos’altro ancor più stravagante.

Questa regola di composizione degli stati, così ovvia in apparenza, non vale per i sistemi quantistici. Qui accade che un nucleo atomico e alcuni elettroni si combinino per formare un mostriciattolo chiamato “atomo”, nel quale le particelle che lo compongono perdono la loro identità particellare per formare un oggetto globale organizzato a gusci di cipolla e dotato di vari lobi, chiamati orbitali, variamente configurati secondo la loro energia. Gli aspetti osservabili del sistema atomico non sono più le posizioni e le velocità delle sue parti elementari, ma solo la sua capacità di assorbire ed emettere globalmente quanti di luce di frequenze e lunghezze d’onda ben determinate transitando da una configurazione all’altra. Le proprietà particellari dei costituenti atomici potranno essere recuperate all’osservazione, ma ciò potrà avvenire solo colpendo l’atomo con quanti di luce molto ben localizzati e perciò di grande energia; operazione, questa, che scompiglia e rimescola in modo complesso i livelli energetici dell’atomo liberando dall’intreccio gli stati delle parti.

La ragione di questo fenomeno è dovuta al fatto che nella fisica dei quanti la composizione di due spazi degli stati genera un nuovo spazio degli stati i cui elementi non sono semplicemente coppie ordinate di stati delle parti, bensì *sovrapposizioni quantistiche di coppie ordinate che possiedono la stessa energia e lo stesso spin*.

Per esempio, lo stato di due elettroni che ruotano su sé stessi in senso opposto potrà essere formato dalla sovrapposizione di una coppia di stati di spin  $1/2$ , dei quali uno rappresenta un elettrone rotante in senso orario e l’altro un elettrone rotante in senso antiorario, con una seconda coppia di stati, dei quali ora il primo rappresenta un elettrone che ruota in senso antiorario e l’altro uno che ruota in senso orario. In questo modo gli stati delle coppie di elettroni sono combinati in modo tale da formare lo stato di un sistema di energia ben definita e globalmente privo di rotazione intrinseca, vale a dire lo stato di un *quanto scalare*.

Nel caso di un sistema formato da più di due parti, gli stati che rappresentano le proprietà osservabili del sistema devono cercarsi tra le sovrapposizioni delle collezioni ordinate di stati delle parti, e non dalle singole collezioni di stati. Queste sovrapposizioni amalgamano tra loro gli stati delle parti facendo emergere uno stato globale dotato di proprietà interamente nuove, nel quale gli stati delle parti sono fusi e confusi in un groviglio difficilmente districabile.

### 3.4. *Le rotture spontanee di simmetria*

Possiamo spiegare il fenomeno della rottura spontanea di una simmetria con un semplice esempio. Immaginiamo una pallina inizialmente posta sulla cima di un cappello messicano perfettamente liscio e simmetrico, posto su un piano orizzontale e con tese rivolte all’insù molto alte. Chiaramente, sia lo



stato della pallina sia le leggi del moto, sono perfettamente simmetrici rispetto a una rotazione del sistema attorno all'asse del cappello.

In virtù di questa perfetta simmetria, la pallina, benché si trovi in uno stato di equilibrio instabile, può teoricamente rimanere in questa posizione per un tempo infinito, ma è chiaro che la minima perturbazione, causata per esempio da una fluttuazione termica, la farà precipitare da una parte o dall'altra lungo la parete del cappello. Raggiunto l'avvallamento arginato dalle tese del cappello, la pallina oscillerà in una determinata direzione radiale e alla fine si fermerà alla base delle tese. È evidente che lo stato finale della pallina non è simmetrico rispetto alle rotazioni assiali. Potremo allora dire che la simmetria rotazionale iniziale del sistema ha subito una *rottura spontanea*.

Eventi di questo tipo hanno ruoli importanti nella fisica delle particelle elementari, dove in alcuni casi l'energia potenziale del sistema ha proprio il profilo di un cappello messicano. Vediamone le ragioni. Un'importante conseguenza della teoria della relatività è che tutte le interazioni della materia devono essere eventi locali dello spazio-tempo e non forze a distanza, come fu postulato da Newton.

Ciò comporta che le particelle elementari interagiscano, non già direttamente tra loro per attrazione o repulsione istantanea, ma ciascuna di esse, indipendentemente dalle altre, col campo di forza che si propaga nello spazio-tempo seguendo il moto delle particelle che lo generano. Quando si prova a trattare questo tipo d'interazioni applicando i principi della meccanica quantistica, si scopre che gli stessi campi di forza devono essere *quantizzati*, cioè capaci di agire per quantità discrete scambiando quanti di spin intero, dotati di proprietà talvolta particellari talaltra ondulatorie; tali sono i fotoni del campo elettromagnetico (spin 1) e i gravitoni del campo gravitazionale (spin 2).

Fu così che negli anni '40 nacque la teoria quantistica dei campi. A questo progresso teorico fecero seguito importanti scoperte sperimentali. Tra gli anni '40 e '50, furono scoperte nuove particelle di spin semintero, oltre agli elettroni, i protoni e i neutroni, ma di massa più grande di questi ultimi e anche particelle scalari di massa intermedia tra quella degli elettroni e quella dei protoni (mesoni), che decadono molto rapidamente in particelle stabili (protoni, elettroni e raggi gamma), e si dimostrò che esse potevano classificarsi in tabelle dotate di simmetrie approssimativamente ottagonali. All'inizio degli anni '60 si credette che i mesoni fossero i quanti di forza delle interazioni nucleari, giacché le distanze d'interazione di questi quanti sono confrontabili con i raggi dei nuclei atomici. Molti pensarono allora che la fisica quantistica si trovasse a un passo dal poter spiegare tutto.

Purtroppo, quell'ottimistica visione entrò in crisi tra la fine degli anni '60 e l'inizio dei '70, quando si scoprì che i quanti di forza delle interazioni tra particelle dotate di spin semintero danno luogo a teorie matematicamente autoconsistenti soltanto se hanno massa nulla. Poiché queste condizioni valgono in natura solo per le forze gravitazionali ed elettromagnetiche, si dedusse che la teoria dei campi delle ipotetiche forze a corto raggio d'azione era sbagliata. Si cercò allora di porre rimedio a questa situazione proponendo teorie pragmatiste e stravaganti (matrice  $S$ , teoria del bootstrap, teorie autoduali), che per alcuni anni crearono molta eccitazione e grandi aspettative, ma che in realtà non portarono ad alcun risultato convincente.

Il superamento di questa crisi fu un evento glorioso della fisica teorica del decennio successivo al 1973, anno in cui fu accolta la dimostrazione dell'autoconsistenza matematica di tutti i campi di forza di massa nulla e con ricche proprietà di simmetria (Faddeev e Popov, 1967), che in pochi anni portò alla costruzione del Modello Standard (Okun, 1982). I fisici teorici passarono rapidamente dallo sconforto all'entusiasmo quando capirono che le simmetrie delle leggi possono essere salve in teoria ma perdute in pratica, se lo stato fondamentale di minima energia dei campi quantizzati – cioè lo stato di vuoto – subisce gli effetti di una rottura spontanea di simmetria. In tal caso, non solo accade che quanti di forza di massa nulla acquistino masse non nulle ma anche che perfette simmetrie delle leggi d'interazione tra i campi, postulate a livello fondamentale, subiscano distorsioni e rotture, simili a quelle rivelate dagli esperimenti, quando si passa al livello fenomenologico.

Un importante fatto collaterale è che la perdita di simmetria dello stato fondamentale è inevitabilmente accompagnata dall'emergenza a livello fenomenologico di un campo quantistico interamente nuovo: il campo dei *bosoni di Goldstone*. Si tratta di quanti di massa nulla, privi di rotazione intrinseca (cioè particelle scalari) e portatori di proprietà asimmetriche, che possono interpretarsi come relitti quantistici delle simmetrie perdute. Poiché la loro energia a riposo è nulla, un

numero infinito di essi possono condensarsi nello stato fondamentale – per esempio il vuoto quantistico dei campi – senza alterarne la densità di energia ma conferendo invece a esso la loro asimmetria.

Possiamo immaginare il condensato di bosoni di Goldstone come un superfluido totalmente privo di viscosità che riempie regioni finite o infinite dello spazio-tempo e che, interagendo con i quanti di materia e di forza che si muovono in esso, ne altera il comportamento inerziale modificando in modo asimmetrico le masse effettive di tali quanti. In particolare, alcuni quanti di forza, che a livello fondamentale hanno massa nulla, possono emergere a livello fenomenologico con massa non nulla.

L'effetto è simile a quello delle masse apparenti ben noto nell'idrodinamica: un corpo di massa  $M$  immerso nell'acqua, che si muova abbastanza lentamente, incontra una resistenza trascurabile, ma la sua massa effettiva appare aumentata perché si aggiunge a  $M$  la massa dell'acqua spostata dal moto del corpo.

#### 4. Alla ricerca di livelli sempre più profondi

Gli argomenti trattati nei precedenti paragrafi si possono riassumere affermando che ogni teoria studia la relazione tra due livelli di descrizione del mondo naturale, uno *fondamentale* e l'altro *fenomenologico*, e si propone di spiegare come il secondo emerga dal primo. Così, ad esempio, nei primi decenni del '900 la fisica teorica assunse come livello fondamentale quello degli elettroni, dei nuclei atomici e del campo elettromagnetico quantizzato, cioè il campo dei fotoni che mediano le interazioni tra particelle dotate di carica elettrica, e come livello fenomenologico quello dei sistemi che possono formarsi per interazione e aggregazione di tali quanti: molecole, cristalli, liquidi, gas, fino ai sistemi di maggiore organizzazione e complessità.

In tempi più recenti il livello fondamentale è stato spostato verso il basso, su quello delle particelle elementari del Modello Standard: leptoni, quark, bosoni di Higgs e campi elettro-deboli e cromodinamici che ne mediano le interazioni, mentre quello fenomenologico è stato spostato sul vecchio livello fondamentale degli elettroni e dei nuclei atomici; ai quali bisogna aggiungere una pletera di altre particelle composte che si producono nelle interazioni nucleari e che decadono molto rapidamente. In particolare, nel nuovo livello fenomenologico i protoni e i neutroni emergono come triplette di quark che rimangono confinate in bolle del campo cromodinamico.

È legittimo chiedersi se, nell'intento di giungere a una teoria unitaria del mondo fisico, la fisica teorica debba scendere a un livello ancor più fondamentale assumendo come fenomenologico quello dei leptoni e dei quark, e magari continuare a scendere a livelli sempre più profondi senza mai trovarne uno ultimo, o se invece capiterà che esista un livello fondamentale ultimo oltre il quale non è più possibile andare.

Se ogni livello fondamentale fosse a sua volta un livello fenomenologico che sta sopra un altro ancor più fondamentale, si aprirebbe un abisso infinito di livelli sempre più fondamentali i quali, da un certo livello in giù, per esaurimento delle possibilità descrittive semplici, dovrebbero diventare sempre più complicati. La fisica teorica si perderebbe così nei meandri di un mostruoso frattale matematico senza mai raggiungere un assetto conclusivo. La pretesa di spiegare ogni cosa riducendo il complesso al semplice s'infrangerebbe contro questo evidente paradosso.

Perciò, se ogni cosa è composta di cose più semplici, bisogna che la discesa a livelli di descrizione più profondi si arresti a un ultimo irriducibile livello di massima semplicità, oltre il quale non è più possibile procedere. Quali strane proprietà dovrebbe mai possedere questo livello ultimo per non ammetterne uno di più profondo? Se un ultimo livello c'è, allora è naturale pensare che esso debba essere fondamentale e fenomenologico nello stesso tempo. Chiaramente, può trattarsi solo di un livello nel quale le interazioni tra le particelle elementari non ne facciano scaturire altre diverse da quelle che già appartengono al livello fondamentale, ma semmai aggiungere particelle composte di quelle elementari, insomma un livello che può definirsi *autoriflessivo*.

La fisica teorica è avanzata effettivamente in questa direzione inventando la tecnica della *rinormalizzazione*. Si tratta di una procedura matematica ricorsiva che sfrutta, per un verso, il principio d'indeterminazione nella forma: quanto più ristretta è la regione dello spazio-tempo in cui si assume confinata la particella elementare, tanto più indeterminata appare la sua struttura interna; per l'altro

verso, la distinzione tra *particella reale* – vale a dire di energia e quantità di moto ben definite – e *particella virtuale* – vale a dire di energia e quantità di moto indeterminate.

Se la regione di confinamento è molto ampia, una particella elementare può essere rappresentata come un'entità puntiforme di massa e costanti d'interazione molto precise. Possiamo assumere questa rappresentazione come livello fondamentale iniziale del processo ricorsivo. Se invece la regione è piccola, essa dev'essere rappresentata come un'entità composta di particelle virtuali che interagiscono tra loro in tutti i modi possibili. In tal caso la struttura interna della particella dovrà essere determinata utilizzando le leggi d'interazione e di propagazione delle particelle virtuali da cui è costituita. Possiamo assumere questa determinazione come una rappresentazione fenomenologica in cui la particella è descritta come una nube di particelle virtuali. Poiché l'indeterminazione della massa confinata nella regione aumenta in modo inversamente proporzionale alla grandezza della regione, le particelle virtuali da includere nella nube sono tanto più numerose quanto più piccola è la regione.

Restringendo progressivamente la regione di confinamento otterremo una successione di rappresentazioni fenomenologiche sempre più accurate.

Purtroppo questo procedimento non è così semplice e lineare come lo abbiamo qui sommariamente descritto. Calcolando la massa e le costanti d'interazione del corpuscolo così determinato a livello fenomenologico, si trovano valori enormemente maggiori di quelli della particella esistente in natura, che erano stati ingenuamente introdotti al livello fondamentale, sebbene le altre proprietà globali siano simili a quelle dell'entità puntiforme assunta al livello fondamentale iniziale. Per dirla in breve, le correzioni quantistiche della particella descritta come puntiforme a livello fondamentale, e rappresentata come una nube di particelle virtuali a livello fenomenologico, non restituiscono una particella con i giusti valori di massa e costanti di accoppiamento, ma una sua variante con parametri fisici enormemente alterati. Per rimediare a questo inconveniente, i fisici teorici hanno introdotto un trucco: attribuire alle masse e alle costanti d'interazione delle particelle virtuali che costituiscono la nube valori molto diversi da quelli assunti al livello fondamentale iniziale ma scelti in modo tale da ottenere a livello fenomenologico i valori fisici naturali erroneamente postulati nella definizione del livello fondamentale.

In ultima analisi, la procedura di *rinormalizzazione* si presenta come una tecnica matematica ricorsiva che parte da dati provvisori falsi per produrre alla fine risultati veritieri. Il trucco consiste nell'assumere il livello fondamentale iniziale come fittizio, permettendo così di iniziare il calcolo ricorsivo di una sequenza di rappresentazioni fenomenologiche viepiù accurate. Questa sequenza ciclica di calcoli permette di descrivere il corpuscolo confinato in regioni viepiù piccole, ridefinendo a ogni ciclo le masse e le costanti d'interazione delle particelle virtuali che lo compongono in modo tale da mantenere invariati i parametri globali realmente osservati in natura. Così, procedendo idealmente per un numero infinito di cicli, i quanti reali sono infine immaginati come costituiti da quanti virtuali, che a loro volta sono costituiti da quanti virtuali, e così via all'infinito.

Una teoria si dice *rinormalizzabile* se questa procedura converge verso un livello fenomenologico limite che contiene le stesse particelle elementari del livello fondamentale, e non, invece, come nella maggior parte dei casi, una pleora infinita di particelle interamente nuove di struttura intrinseca sempre più complicata e dotate di massa e costanti di accoppiamento arbitrarie.

Questo modo di rappresentare la struttura interna delle particelle elementari ha una grande importanza per la fisica sperimentale. Facendo scontrare tra loro due particelle con grande energia si osservano spettacolari produzioni di particelle che escono dal punto d'impatto. La teoria spiega questi fenomeni come processi di *materializzazione* dei quanti virtuali che compongono quelli reali; ciò essendo dovuto alla conversione relativistica in massa dell'energia iniettata dall'urto.

Il progresso più importante compiuto dalla fisica teorica negli ultimi quaranta anni è stata la scoperta del Modello Standard. In questa teoria, la condizione di rinormalizzabilità porta a selezionare come fisicamente ammissibili solo pochi tipi di particelle che, guarda caso, hanno proprio le proprietà fisiche di quelle che sono state via via scoperte negli ultimi cinquanta anni: tre famiglie di fermioni e anti-fermioni, quattro campi di forza elettrodebole, otto campi di forza cromodinamica e il bosone di Higgs. Per la sua efficacia analitica la condizione di rinormalizzabilità è diventata il fattore principale della potenza esplicativa, interpretativa e predittiva della fisica teorica moderna.

Bisogna tuttavia aggiungere che il Modello Standard non può ancora dirsi completo. Ciò che ancora manca è in primo luogo la sua integrazione con la teoria della gravitazione di Einstein. All'inizio degli anni '80 questa difficoltà ha indotto molti fisici teorici a ipotizzare teorie ancora più stravaganti di quelle che divennero di moda nella fisica teorica degli anni '60. Purtroppo, dopo circa trentacinque anni di affannose ricerche e la pubblicazione di decine di migliaia di articoli ultraspecialistici, l'esito è stato assai deludente. I risultati recentemente ottenuti al CERN di Ginevra sembrano spazzare via queste teorie, lasciando aperta soltanto la via al completamento del Modello Standard.

I problemi che ora si pongono in questo meraviglioso modello sono questi: Come interagiscono i bosoni di Higgs con i neutrini? Esistono neutrini pesanti che non interagiscono con le particelle cariche? Come si spiega l'improvviso scatenarsi del Big Bang a partire da un vuoto originario privo di materia? Quale improvvisa rottura spontanea di simmetria del vuoto originario è responsabile della nascita dell'universo? È molto probabile che la risposta ai primi due problemi sia legato a quello della materia oscura e che la risposta agli altri due sia legato all'esistenza di un legame tra gravitazione e materia più generale di quello descritto dalla Relatività Generale di Einstein.

### **5. L'emergenza del mondo macroscopico**

Siamo tanto abituati a vedere e manipolare oggetti del mondo macroscopico, a smontarli come giocattoli per esplorarli dall'esterno verso l'interno, che ci viene spontaneo immaginare le particelle elementari di cui sono costituiti come segretamente nascoste nella profondità della materia e a considerare il progresso della fisica come un movimento esplorativo volto alla ricerca di livelli sempre più fondamentali, fino al raggiungimento del livello fondamentale autoriflessivo.

Mentre diamo per scontate senza alcuna esitazione le proprietà macroscopiche della materia, proviamo invece meraviglia e stupore nell'immaginarla costituita di entità che obbediscono a leggi fisiche completamente diverse da quelle che regolano il mondo macroscopico. Possiamo anche arrivare al punto di sentirci disturbati dal fatto che la descrizione del mondo microscopico richieda una logica radicalmente diversa da quella che ci basta per ragionare sui fatti della nostra vita quotidiana.

Ma proviamo a capovolgere questo atteggiamento, procedendo invece dal basso verso l'alto. Proviamo a spiegarci come possa formarsi il livello dei fenomeni macroscopici a partire dal livello infimo dei campi quantizzati e delle leggi che ne governano il comportamento, ragionando solo in termini quantistici. Per riuscirci veramente bene dovremmo avere molta familiarità con la logica quantistica e con le tecniche di calcolo della fisica quantistica. Tuttavia, in mancanza di queste, proviamo lo stesso a farci un'idea di come si presenta il problema quando è posto in questo modo.

Come possiamo risalire dal livello infimo a quello delle cose che vediamo e manipoliamo nel nostro ambiente macroscopico? Come riusciamo a spiegare che da un mondo uniformemente popolato di pochissime specie di entità elementari, che interagiscono secondo leggi molto semplici e simmetriche, possa generarsi l'immensa varietà e l'indescrivibile complessità di quanto si osserva in natura? Se gli stati della materia avessero le stesse proprietà di simmetria delle leggi che governano i campi fondamentali, l'universo sarebbe perfettamente omogeneo e isotropo in tutta la sua estensione; sarebbe una sorta di plasma isotropo e omogeneo attraversato da eccitazioni quantiche che si propagano in modo uguale in tutte le direzioni, come si ritiene sia stato l'universo nella fase iniziale del Big Bang.

Certamente, l'evidenza di strutture simmetriche non manca tra le cose che si osservano in natura. Il mondo inorganico terrestre si rivela per lo più come una vasta collezione di strutture cristalline e di masse amorfe che tendono a diventare cristalline a bassa temperatura. Tuttavia, la stragrande maggioranza delle cose che ci circondano, specialmente gli organismi biologici, non possiedono queste proprietà. Come accade dunque che l'universo reale – di cui noi esseri unici e singolari siamo parti integranti – si presenti ai nostri occhi come un'immensa varietà di cose eterogenee e asimmetriche, di corpi spazialmente ben delimitati, e non invece come una grande collezione di corpi celesti omogenei e isotropi aggregati dal campo gravitazionale?

La risposta a questi interrogativi fu fornita dai fisici teorici degli stati condensati, in particolare da Nambu e Jona-Lasinio che nel 1961 scoprirono il fenomeno della rottura spontanea delle simmetrie,

e in seguito da Anderson e da altri autori. Essa è raccontata in modo magistrale nel trattato di Umezawa e collaboratori (1982).

Si tratta di una conseguenza logica degli importanti risultati matematici ottenuti nel 1939 da von Neumann riguardante i sistemi con infiniti gradi di libertà. In questi sistemi, la relazione tra il livello fondamentale e quello fenomenologico non è più univoca e sono possibili infiniti modi di rottura spontanea delle simmetrie, infiniti stati di vuoto e di conseguenza infiniti universi fenomenologici disgiunti, la cui infinita varietà dipende da parametri continui. Ogni minima variazione di suddetti parametri determina la creazione e/o la distruzione d'infiniti quanti di massa nulla, vale a dire i bosoni di Goldstone, che si condensano nello stato fondamentale modificandone in modo asimmetrico le proprietà.

Se il livello fondamentale di un sistema dotato d'infiniti gradi di libertà possiede una simmetria, ad esempio l'invarianza per traslazione o per rotazione attorno ad un asse qualsiasi, una frazione infinita dei bosoni di Goldstone generati dalla rottura di simmetria può essere aggiunta o rimossa, con una spesa energetica trascurabile, in modo da distruggere la simmetria che si manifesta a livello fenomenologico senza che quella assunta a livello fondamentale sia toccata.

È noto che nei sistemi in equilibrio termodinamico i processi di questo tipo possono essere descritti come transizioni di fase estese all'intero sistema. Ma nei sistemi che non sono in equilibrio, queste rotture spontanee di simmetria possono determinare l'emergenza di proprietà macroscopiche di estensione finita. Come hanno chiarito Umezawa e collaboratori, le condensazioni di bosoni di Goldstone associate a rotture spontanee di simmetrie possono essere confinate in regioni finite dello spazio; ciò può accadere se i confini di queste regioni, o insiemi interstiziali interni a esse, diventano luoghi di maggiore condensazione di bosoni di Goldstone.

Forniamo qui un esempio. Una struttura cristallina infinitamente estesa possiede una simmetria traslazionale caratterizzata dall'invarianza della struttura rispetto a traslazioni spaziali. Quando questa simmetria si rompe spontaneamente, si genera un campo di *fononi*, vale a dire i quanti delle onde sonore. Sono questi i bosoni di Goldstone dei cristalli reali.

La rottura della simmetria traslazionale può essere la conseguenza del fatto che il cristallo non è spazialmente omogeneo e infinitamente esteso, ma possiede, ad esempio, anomalie strutturali, come impurità, fessure, linee elicoidali di *dislocazione* cristallina, o facce che lo delimitano spazialmente, come la superficie del cristallo, o piani di *disclinazione* della struttura cristallina interna ecc. Tutte queste deviazioni dalla disposizione cristallina omogenea idealmente infinita sono luoghi di accentuata condensazione di fononi e di accentuata disomogeneità del campo fononico; cosicché, ad esempio, oltre la superficie del cristallo, il campo fononico si annulla. Sono questi chiari esempi di come la rottura spontanea di una simmetria faccia emergere proprietà interamente nuove a un livello fenomenico macroscopico.

Un altro esempio di bosoni di Goldstone sono i *plasmoni*, che sono i quanti di oscillazione del plasma elettronico interno a un conduttore. Essi modificano lo stato fondamentale del conduttore facendo acquistare massa ai fotoni. Il risultato è che i fotoni che attraversano la superficie non riescono a entrare in profondità nel conduttore giacché, essendo dotati di massa non nulla, hanno un raggio d'interazione con le cariche elettriche molto corto. Si dovrebbero inoltre citare altre varietà di bosoni di Goldstone: *magnoni*, *istantoni*, *vorticoni* ecc., che si producono per rottura spontanea delle diverse forme di simmetria che possono esistere nella materia condensata.

La visione che ci offre la natura quando si percorre dal basso verso l'alto la scala dei livelli è dunque questa: *tutto ciò che si presenta come entità estesa di dimensioni finite, distinta da altre che si trovano accanto ad esso o al suo interno, è un'emergenza fenomenica che si produce in seguito a una rottura spontanea di simmetria e alla formazione di condensazioni bosoniche.*

Sono queste le emergenze strutturali che rendono vario e complesso il mondo macroscopico. Sono esse che mettono in forma la materia nei modi più disparati facendo permanere per lungo tempo i sistemi termodinamici con bassa temperatura fuori equilibrio.

Nel lungo tempo, i sistemi materiali tendono a recuperare le simmetrie originarie e i bosoni di Goldstone tendono a svanire, i materiali amorfi tendono a cristallizzarsi, i difetti dei cristalli tendono a sparire, le impurità tendono a migrare verso le superfici.

## 6. L'emergenza dei fenomeni biologici

Ci sono diverse buone ragioni per ritenere che i sistemi biologici tendano a generare spontaneamente strutture stabili e ben ordinate (Fröhlich, 1968; Davydov, 1982). Gli organismi viventi sono assai più stabili e duraturi delle macchine da produzione industriale e questo non può essere spiegato invocando soltanto l'efficienza della cascata metabolica che li mantiene lontani dall'equilibrio termodinamico, come pensavano Glansdorff e Prigogine (1971), o i portentosi effetti della selezione naturale, come immaginano molti darwinisti acritici.

La biochimica e la biofisica sembrano poter spiegare tutto ciò che avviene nelle cellule, in realtà queste discipline non forniscono molto più di una descrizione accurata di ciò che è osservabile col microscopio. Per comprendere i meccanismi della vita bisogna accedere a un livello più profondo, intermedio tra quello delle particelle elementari e quello visibile al microscopio, un livello che possiamo definire *mesoscopico*. Si tratta del livello in cui sono descritti i cambiamenti conformazionali delle macromolecole che popolano le cellule viventi. I comportamenti della materia a questo livello sono intermedi tra quelle quantistici e quelli classici.

Sul versante dei comportamenti quantistici i sistemi mesoscopici sono caratterizzati da una pronunciata stabilità strutturale, dovuta al fatto che i mutamenti di stato degli atomi e delle piccole molecole sono discreti e governati da leggi microreversibili. Sul versante di quelli classici, essi sono caratterizzati dalla tendenza a degradare in modo irreversibile secondo le normali leggi della termodinamica. A livello mesoscopico le macromolecole delle cellule viventi non possono e non devono essere descritte come sostanze chimiche ma come nanomacchine che svolgono funzioni specializzate.

A differenza delle macchine industriali, che sono soggette a usura e perdita progressiva di precisione, le nanomacchine possiedono una notevole stabilità strutturale e un comportamento reversibile. Queste nanomacchine non sono soggette a usura e la loro struttura interna non si degrada progressivamente. Semplicemente, dopo un certo tempo più o meno lungo, si rompono a causa delle fluttuazione termiche; la loro rottura è questione di probabilità e quando si rompono devono essere rimpiazzate. Per esempio, la pompa sodio-potassio, che usa l'energia liberata dalla rottura delle molecole di ATP (adenosintrifosfato) per pompare a ogni ciclo tre ioni sodio dall'esterno verso l'interno della membrana cellulare e due ioni potassio in senso inverso – facendo in tal modo diventare le cellule delle vere e proprie pile elettriche – rigenera l'ATP dai suoi prodotti di decomposizione ADP (adenosindifosfato) e P (fosfato), se gli ioni sodio e potassio attraversano le pompe in senso inverso. La lunga vita delle cellule è in parte spiegata dal *turnover* proteico che provvede alla loro riparazione mediante una reiterata produzione di nanomacchine proteiche o di loro parti; ma come accade che tutti questi pezzi vadano perfettamente al loro posto rigenerando la stessa identica forma per durate enormi rispetto alla scala temporale di processi molecolari?

Che l'evoluzione del vivente non possa spiegarsi soltanto per effetto di processi selettivi di tipo darwiniano, ma anche per una naturale tendenza alla formazione di strutture ordinate, è stato vigorosamente ribadito da Kauffman nel suo libro *The Origins of Order* (1993). Questo autore ha studiato molti modelli di selezione naturale simulando con i calcolatori la formazione dei paesaggi adattativi che descrivono le biforcazioni e le migrazioni di ipotetiche popolazioni di viventi in corso di evoluzione. I risultati delle sue indagini forniscono una chiara dimostrazione che la sola dispersione dei caratteri genetici in combinazione con la selezione naturale non dà luogo a una proliferazione di specie differenziate, ma conduce l'intera popolazione di organismi che si autoriproducono verso quella che egli chiama la "catastrofe della complessità":

*"In primo luogo - egli osserva - la selezione è limitata dalla struttura del paesaggio adattativo che agisce su di essa; in molti paesaggi, appena gli organismi sotto selezione diventano più complessi, le posizioni ottimali raggiungibili cadono verso le caratteristiche medie della classe di sistemi sui quali la selezione sta agendo. In secondo luogo, in ogni paesaggio, ogni bilancio mutazione-selezione è infine abbattuto; oltre un certo livello di complessità, la selezione non riesce a mantenere una popolazione dotata di capacità adattative sui picchi alti del paesaggio, e la popolazione precipita allora verso le proprietà medie della classe di sistemi evolutivi sottostante."*

In pratica, questo significa che ogni popolazione di organismi viventi altamente specializzata, che venisse in qualche modo creata a un certo istante, andrebbe incontro all'estinzione e i suoi caratteri genetici si disperderebbero in modo tendenzialmente uniforme intorno a quelli di una specie media inferiore. Ciò è esattamente il contrario di ciò che si osserva in natura.

*“Entrambi questi limiti – conclude l'autore – suggeriscono che, in sistemi sufficientemente complessi, molta parte dell'ordine che si riscontra sia quello spontaneamente presente nella classe dei sistemi in corso di selezione. Pertanto, ci tengo a sostenere con forza che molta parte dell'ordine che si osserva negli organismi è precisamente l'ordine che si crea spontaneamente nei sistemi di cui siamo composti. Tale ordine possiede bellezza ed eleganza, esso proietta, sopra la biologia, un'immagine di permanenza e di legge sottostante. L'evoluzione non è propriamente 'caso catturato sull'ala'. Non è un'ingegnosa riproposizione di ciò che si presenta ad hoc, del bricolage, dell'accorto espediente. E' ordine emergente onorato e affilato dalla selezione.”*

In che modo nasce questo ordine che Kauffman riconosce come un'emergenza spontanea, assolutamente fondamentale del vivente? La teoria delle rotture spontanee delle simmetrie descritta nei paragrafi 3.4 e 5, spiega assai bene come le simmetrie fondamentali della materia si riarrangino generando una ricca varietà di quanti di massa nulla e di oggetti mesoscopici e macroscopici dotati di proprietà speciali e potenzialmente capaci di combinarsi tra loro in una grandissima varietà di modi per formare sistemi macroscopici di complessità illimitata; ma viene da pensare che esse favoriscano la diversificazione e il disordine piuttosto che l'organizzazione e l'ordine. D'altronde, né la meccanica quantistica né la termodinamica dei sistemi mesoscopici (Nobili, 2009) sono capaci di spiegare questi fatti, giacché queste fenomenologie lasciano invariate le strutture degli oggetti.

Eppure, basta sfogliare un buon testo di biologia cellulare per accorgersi di quante strutture molto organizzate e stupendamente ben ordinate siano presenti negli organismi viventi. Strutture che si formano spontaneamente senza la guida di alcuna “manina” provvida e accurata: membrane di vario tipo, lunghe catene molecolari avvolte a elica, mitocondri, microtubuli, trabecole di citoscheletro, trecce proteiche che si tendono attraverso ampi spazi extracellulari ecc., per non parlare degli aggregati di proteine che si organizzano spontaneamente per formare canali ionici trasportatori di calcio e le proteine che pompano ioni attraverso le membrane cellulari.

Com'è possibile che questa immensa varietà di microstrutture estremamente specializzate si ordinino in modi apparentemente spontanei dentro un miscuglio disordinato di componenti? Solo grazie al mantenimento di un potenziale elettrico attraverso la membrana cellulare? Cosa manca, in questa rappresentazione, che renda conto delle capacità di azione, costruzione, auto organizzazione e autoriproduzione dei sistemi biologici? La risposta è: *la sedimentazione e la circolazione dell'informazione.*

## **7. L'emergenza dell'informazione**

La fisica quantistica descrive l'esistenza fisica come il prodotto dell'interazione tra due tipi di entità naturali: i sistemi fisici osservati e gli apparati di osservazione e misura. Questi due tipi di entità stanno tra loro come le facce di una stessa medaglia, in un rapporto che possiamo definire dialettico che li vincola reciprocamente nella produzione delle emergenze fenomeniche. Tuttavia essi non sono tra loro omogenei, giacché i primi sono governati dalle leggi di evoluzione temporale reversibili caratteristiche del mondo microscopico, mentre i secondi sono governati da leggi di trasformazione termodinamica irreversibile caratteristiche della fisica del mondo macroscopico.

I processi di osservazione operano con legge probabilistica nel seguente modo: da un lato “mettono in forma” nel sistema osservato uno stato fisico oggettivo dotato di proprietà ben definite; dall'altro *informano* gli apparati di osservazione delle proprietà dello stato così determinato. Questo processo bilatero descrive in definitiva la simultanea riduzione, da una parte dell'indeterminazione quantistica dello stato fisico rispetto al suo apparato d'osservazione, dall'altra dell'incertezza aprioristica relativa ai possibili esiti dell'osservazione.

L'interazione osservato-osservatore non può essere descritta come una semplice evoluzione quantistica di un sistema fisico composto di due parti – il sistema osservato e l'apparato di osservazione, evoluzione che per sua natura sarebbe perfettamente reversibile – ma come un processo

termodinamico irreversibile che produce un aumento di entropia dell'universo (von Neumann, 1932). Ciò dipende dal fatto che ogni processo che comporta la registrazione di una quantità non nulla d'informazione è inevitabilmente accompagnato dalla degradazione entropica di una certa quantità di energia che, dopo una cascata di processi di decadimento intermedi, si risolve nell'emissione e nella dispersione all'infinito di uno sciame infrarosso di fotoni, vale a dire un insieme d'infiniti fotoni di energia evanescente (Kibble, 1967, 1968). Come nel caso delle rotture spontanee di simmetria, è proprio questa dispersione all'infinito d'infiniti quanti di massa nulla, e il conseguente salto di *aleph* della loro numerosità, che determina l'irreversibilità del processo. Purtroppo la fenomenologia delle radiazioni infrarosse è poco nota anche alla maggioranza dei fisici teorici. Essa non è insegnata nei corsi ordinari di meccanica quantistica, giacché questi trattano solo di sistemi formati da un numero finito di parti, né trattata nei corsi superiori perché di scarso interesse per la fisica delle particelle.

La base matematica di questa fenomenologia è stata fondata da von Neumann nel 1939 in un articolo sui sistemi quantistici infiniti, cioè formati da infinite parti. Il punto cruciale è che, mentre tutte le rappresentazioni dello spazio degli stati di un sistema quantistico finito sono equivalenti, quelle di un sistema infinito formano invece un insieme infinito continuo di rappresentazioni reciprocamente esclusive e non equivalenti tra loro, proprio come le "possibilità" della logica classica. Le transizioni tra queste possibilità, che possiamo chiamare *macroscopiche*, sono caratterizzate dal fatto che la creazione o la distruzione di un numero infinito di quanti fa "saltare" la rappresentazione del sistema da uno spazio degli stati a un altro secondo una legge probabilistica di tipo classico. Per questa ragione, le evoluzioni temporali dei sistemi quantistici infiniti si presentano come trasformazioni di tipo classico e l'informazione acquisita dagli apparati di osservazione di tali sistemi può ritenersi l'emergenza fondamentale del mondo macroscopico.

Tuttavia, indipendentemente da ogni considerazione sui processi di misura quantistici, l'informazione, al suo livello più elementare, fa capolino nei dispositivi di regolazione automatica dei sistemi macroscopici (Wiener, 1948). Facciamo un esempio. Da un punto di vista strettamente fisico, il regolatore di Watt, inventato nel '700, si presenta come un piccolo congegno meccanico innestato sulla macchina a vapore che permette di mantenere costante la velocità della macchina. Poiché le masse rotanti del dispositivo sono piccole rispetto alla massa del volano e delle altre parti del motore, il suo effetto meccanico diretto sul moto del sistema è trascurabile. Ciononostante, la sua presenza ha un importante effetto sul regime di funzionamento del motore. Questo avviene perché i piccoli spostamenti assiali del regolatore di Watt agiscono sulla valvola che controlla l'erogazione del vapore facendo in modo che la macchina rallenti se tende a girare più velocemente o acceleri se tende a girare più lentamente. L'energia richiesta per azionare la valvola è piccola rispetto alla potenza meccanica da questa controllata; per questa ragione la valvola può essere considerata il precursore storico dei moderni dispositivi elettronici di amplificazione.

Da un punto di vista strettamente fisico, il regolatore di Watt si presenta come un dettaglio della macchina che, ai fini della pura e semplice descrizione fisica, non riveste più importanza di altre parti accessorie. La sua funzione regolatrice non può propriamente definirsi una proprietà fisica della macchina, giacché questa acquista significato solo in rapporto agli scopi applicativi della macchina, cioè quando la macchina è considerata parte di un sistema più ampio e complesso che comprende alcuni sistemi esterni a essa e, in definitiva, i suoi stessi utenti insieme ai loro scopi e bisogni.

Solo per un utente esterno al sistema, come ad esempio un macchinista ferroviario d'altri tempi – giacché le macchine a vapore sono ormai diventate pezzi da museo – quel congegno rotante svolge una funzione di regolazione. Ora, in questo più complesso ambito interpretativo, la descrizione della regolazione automatica coinvolge valori e significati che esulano dal mero dominio della meccanica e della termodinamica e che sono invece propri della teoria della comunicazione. Il regolatore di Watt fa questo: raccoglie informazione circa il regime di funzionamento del motore e la codifica nella forma di una retroazione che altera il regime di funzionamento della macchina. Poiché questa retroazione "mette in forma" il regime di funzionamento della macchina, essa può a sua volta essere intesa come un genere diverso d'informazione.

Il ruolo dell'informazione nel controllo dei processi produttivi industriali è del tutto generale. Le macchine industriali sono utili soltanto se sono costruite abbastanza bene e se il loro funzionamento si



approssima a quello ottimale. Nel caso che la precisione della macchina non sia sufficiente a garantirne il perfetto funzionamento, ciò che in pratica accade sempre quando sono in gioco consumi di energia, si rendono necessari dispositivi di controllo automatico, che oggi sono realizzati da circuiti elettronici.

In modo simile alle macchine industriali, gli organismi viventi, per quanto in buona salute, sono continuamente soggetti a perturbazioni casuali che tendono ad alterarne le funzioni fisiologiche, sebbene in modo discontinuo probabilistico e statistico. Comunque essi funzionano bene soltanto se le loro funzioni sono costantemente monitorate e governate da dispositivi a retroazione che intervengono correggendo gli svolgimenti anomali delle funzioni, neutralizzando gli imprevedibili effetti di perturbazioni esterne e riparando i danni subiti. Questi dispositivi ricevono segnali dall'apparato che svolge la funzione e retroagiscono sull'apparato stesso in modo da rendere ottimale lo svolgimento della funzione. In generale per ogni particolare funzione biologica esistano molti circuiti di controllo automatico, in molti casi una decina o più. Questa ridondanza serve a mettere al riparo il sistema biologico dall'eventualità che un processo di controllo si guasti.

Ora, tutti questi processi di regolazione, che da un lato ricevono informazione da un processo funzionale e dall'altro retroagiscono su questo modificandolo in modo ottimale, emergono dal funzionamento cellulare come processi che appartengono a un livello superiore rispetto a quello delle funzioni fisiologiche primarie. Possiamo dire che essi appartengono a un *metalivello* funzionale.

Da un punto di vista quantistico gli organismi viventi sono parti di un mondo infinito che evolve secondo le leggi delle trasformazioni termodinamiche macroscopiche. L'evoluzione del vivente ha richiesto da sempre il mantenimento di un rapporto molto efficiente tra livelli e metalivelli funzionali, al punto che non è possibile immaginare l'evoluzione naturale se non come evoluzione simultanea di livelli e metalivelli funzionali reciprocamente correlati e progressivamente adattantesi tra loro in modo ottimale. Con l'evolversi della complessità degli organismi, e col moltiplicarsi delle funzioni, tutti i metalivelli funzionali operanti in una stessa cellula, o nelle diverse cellule di un organismo, dovettero armonizzarsi tra loro, pena la morte del sistema, e pertanto essere a loro volta subordinati a un metalivello di ordine superiore, potremmo dire a un *meta-metalivello*, che retroagisce sui metalivelli inferiori. Così, con l'evoluzione delle specie si sono via via stratificati metalivelli su metalivelli, i quali a loro volta retroagiscono a cascata sui livelli inferiori fino a coinvolgere quelli delle funzioni primarie. In questo modo, gli organismi viventi si sono progressivamente complicati e arricchiti, e con essi anche la complessità dei processi di regolazione interna.

Si è formata così nel mondo dei viventi una complessa rete di circolazione d'informazione, che è in realtà assai più vasta di quella che serve a regolare automaticamente il complesso delle funzioni vitali. Questa rete, infatti, non solo è capace di mettere in comunicazione tra loro le parti dei sistemi viventi e i sistemi viventi stessi tra loro, ma anche di reclutare l'informazione trasportata dai segnali provenienti dall'ambiente esterno al vivente, rendendolo così capace retroagire su di esso.

L'informazione raccolta, trasmessa e ricodificata in questo enorme complesso di metalivelli funzionali serve, non solo a garantire l'ottimalità funzionale dei viventi, ma anche a informare il vivente di tutto ciò che accade nel suo mondo esterno e, per quanto riguarda la specie umana persino nell'intero universo, e a conferire a esso il potere di trasformare gli stati delle cose naturali.

## 8. L'emergenza dei linguaggi

La teoria dell'informazione insegna a misurare la quantità d'informazione ma non dice nulla circa la sua qualità e il suo significato (Shannon e Weaver, 1949). La sua trattazione matematica sconfinava da un lato nella termodinamica (Szilard, 1929; Brillouin, 1956), giacché la memorizzazione di un elemento d'informazione ha sempre un costo termodinamico misurabile in termini di entropia, e dall'altro sfocia nella teoria della comunicazione, del linguaggio e nell'informatica (Aiello *et al.*, 1976), dove si studiano le relazioni tra i simboli dei messaggi che contengono o trasportano informazione. Può interessare il fatto che Brillouin chiamava *informazione morta* quella memorizzata in un supporto materiale, *informazione viva* quella trasportata da un segnale, *valore di scambio* la misura della quantità di informazione e *valore d'uso* il suo significato.

Quando si parla d'informazione, è importante fare distinzione tra il supporto dell'informazione (un foglio di carta, un dispositivo di memoria di un computer, un segnale elettrico, un treno di onde

sonore ecc.) dal messaggio memorizzato nel supporto (immagine, sequenza di simboli, traccia di un disco fisso ecc.) o trasportato da un segnale. È evidente che il supporto ha sempre una consistenza fisica mentre il contenuto dipende dal significato che l'informazione ha per il destinatario. Ma è altrettanto importante fare distinzione tra il "messaggio" registrato in un supporto o veicolato da un segnale e l'informazione contenuta nel messaggio. Il *messaggio* è un insieme ordinato di simboli di forma specifica destinato a essere ricevuto da tutti i possibili sistemi capaci leggerlo e di interpretarlo, mentre l'*informazione* contenuta nel messaggio non dipende solo dalla forma del messaggio ma anche dall'interpretazione e dall'uso che ne fa un particolare destinatario.

In altri termini, l'informazione non è un'entità fisica né una proprietà fisica della materia o di un processo materiale, giacché uno stesso messaggio può essere memorizzato in supporti materiali di costituzione fisica diversa. L'informazione memorizzata in un oggetto non è una proprietà formale della materia organizzata, come può esserlo una particolare sequenza di segni o segnali, poiché gli effetti di questa sequenza dipendono dal funzionamento dei sistemi che sono capaci di analizzarla e interpretarla. Viceversa, una stessa traccia materiale o uno stesso segnale possono trasportare messaggi di significato molto diverso. La funzione e il significato di un messaggio, vale a dire l'informazione in esso contenuta, non sono proprietà formali del messaggio, ma dipendono in modo essenziale da come un destinatario reale o potenziale lo decifra e lo interpreta in funzione dei suoi usi possibili. In assenza di un destinatario reale o potenziale una traccia magnetica registrata in un disco fisso del computer sarebbe solo un particolare stato fisico del disco, così come in assenza di ascoltatori reali o potenziali un'onda sonora sarebbe una mera vibrazione dell'aria.

In breve, per definire l'informazione bisogna fare astrazione sia dalla qualità fisica del supporto sia dal significato del messaggio. Questa duplice astrazione separa l'informazione dal mondo degli oggetti e dei processi fisici e la trasferisce nel dominio astratto delle qualità simboliche. Soltanto nel più astratto contesto della comunicazione tra esseri viventi e pensanti, che sta *oltre* a quello dell'esistenza fisica, e che possiamo perciò definire *meta-fisico*, l'informazione si pone come qualità emergente e i fenomeni naturali acquistano il significato di messaggi di un linguaggio.

Nel 1973, in un articolo intitolato *Hierarchical Control in Living Matter*, Howard Pattee scriveva: "*Quello che abbiamo bisogno di sapere è come una molecola diventi un messaggio.*" E subito aggiungeva: "*Un vincolo arbitrario ma definito correla tra loro una struttura e un'operazione: questo crea l'aspetto simbolico degli eventi fisici.*"

Pattee fa notare che questa correlazione diviene effettivamente operativa in un processo di controllo automatico solo se è inserita in un processo di comunicazione. Ai livelli più elementari dell'organizzazione biologica si collocano i processi di controllo automatico a retroazione che provvedono all'omeostasi e alla regolazione del sistema. D'altronde il controllo automatico richiede la coerenza e l'ordine sequenziale di eventi ben definiti e anche che siano realizzate le condizioni fisiche affinché ciò avvenga. Solo in questo modo si forma un livello omogeneo di eventi ordinati capaci di sostenere un processo di comunicazione. Si comprende da qui l'importanza delle dinamiche coerenti e degli orologi biologici.

*"Il controllo gerarchico nei sistemi viventi a tutti i livelli – egli afferma – richiede un insieme di vincoli coerenti che in qualche modo crea un contenuto simbolico o un messaggio in strutture fisiche, in altre parole, un insieme di vincoli che stabilisce una struttura di linguaggio."* *"In quanto vincoli individuali – egli continua – essi devono apparire come accidentalità congelate, ma in quanto collezioni essi devono apparire integrate e funzionali."* *"Vita e linguaggio sono concetti paralleli e inseparabili."*

Inoltre, Pattee indica le seguenti proprietà dei linguaggi operativi a livello di controllo:

- 1) *Gli elementi di un linguaggio sono discreti, preformati, e arbitrari.*
- 2) *Combinazioni di elementi sono sequenziali e numerabili.*
- 3) *Non tutte le combinazioni di elementi formano un messaggio.*
- 4) *Operazioni che formano o trasformano combinazioni coinvolgono livelli contigui.*
- 5) *Il metalinguaggio è contenuto nel linguaggio.*
- 6) *Il linguaggio cambia gradualmente e continuamente, senza mai mancare di avere una struttura grammaticale.*

L'autore parla di "gerarchie di controllo" perché le gerarchie dei livelli di complessità strutturale che si osservano nei sistemi biologici (organelli, cellule, organi, organismi, popolazioni ecc.) richiedono corrispondenti gerarchie di livelli di controllo funzionanti a scale temporali diverse; ma forse sarebbe più appropriato usare l'espressione "*stratificazione di livelli di comunicazione*", poiché non si può escludere che uno stesso segnale sia operativo in più livelli di comunicazione e che tra livelli diversi non si stabiliscano scambi incrociati di messaggi; come non si può escludere che più livelli distinti si affianchino sopra o sotto uno stesso livello intermedio.

Sequenze spazialmente ordinate di acidi nucleici o di aminoacidi equivalgono a stringhe di lettere alfabetiche. Esse possono essere trascritte, decodificate e codificate in altra forma, e così partecipare a un processo di comunicazione; ma questo può avvenire solo se le sequenze spaziali sono convertite in sequenze temporali e viceversa, e ciò richiede l'esistenza fisica di opportune strutture operatrici. Chiaramente, i fattori di ordinamento spaziale e temporale sono altrettanto indispensabili per l'esistenza dei processi di comunicazione quanto lo sono le strutture fisiche che veicolano l'informazione. L'informazione, benché sia una qualità emergente astratta, può esistere solo in un mondo di macchine strutturalmente stabili e dotate di fattori di ordinamento temporale.

Nei sistemi informatici artificiali, dove l'informazione è veicolata da segnali elettrici, ottici ecc., i significati consistono di procedure di attivazione delle periferiche (monitor, emettitori acustici, servomotori ecc.). Nelle cellule viventi, dove l'informazione è veicolata dalle macromolecole (RNA e proteine) o da piccole molecole organiche (neurotrasmettitori, neuroregolatori, cAMP, cGMP ecc.) o inorganiche (NO, ossido nitrico; CO monossido di carbonio ecc.) o da ioni calcio  $Ca^{++}$ , i significati consistono di attivazioni di processi chimico-fisici; ma in questo caso, a differenza dai sistemi artificiali, questi significati sono essenziali per l'esistenza stessa del sistema.

Infatti, ogni parte di un organismo vivente può esistere solo perché è assistita da processi di regolazione che ne garantiscono la stabilità strutturale e funzionale. Doppie eliche di acidi nucleici, molecole proteiche, ioni, segnali elettrici, meccanici ecc., costituiscono i vincoli strutturali-operazionali di una stratificazione di linguaggi esplorata solo in minima parte. Essi istruiscono tutte le operazioni di controllo, calcolo e costruzione che sono indispensabili per l'esistenza e la riproduzione dell'organismo.

Di solito, ogni messaggio generato a un livello di questa stratificazione è decodificato a un livello più elevato e complesso e il suo significato consiste nell'uso che di questo messaggio è fatto a un livello superiore. Lo stesso messaggio può essere decodificato a livelli diversi in modi diversi; ciò significa che lo stesso messaggio veicola in generale una molteplicità di significati diversi.

Questo pone il problema di come sia organizzata la stratificazione dei livelli di comunicazione in rapporto a quella che si manifesta nel mondo naturale.

## **9. L'ordinamento parziale delle emergenze**

Se potessimo descrivere la gerarchia delle emergenze, dovremmo rappresentarla non come una scala infinita che si erge sopra il livello infimo autoriflessivo, ma piuttosto come un *ordinamento parziale* di livelli; vale a dire, come un sistema complesso di scale che ascendono da un comune livello infimo, che si ripartiscono in vari rami che s'incontrano a livelli intermedi, sopra i quali si aggiungono altre scale che salgono a loro volta a livelli superiori variamente dislocati; e così via, o all'infinito o a un livello supremo ultimo che non ha sopra di sé altri livelli.

Come abbiamo descritto nei precedenti paragrafi, questo ordinamento parziale accede, lungo un ramo, ai livelli delle emergenze macroscopiche della materia e quindi al livello dei sistemi termodinamici in equilibrio e fuori equilibrio, e, lungo un altro ramo, accede ai livelli dei sistemi mesoscopici prebiotici dotati di memoria e capacità costruttive, sui quali si innestano i metalivelli di omeostasi, regolazione automatica e circolazione dell'informazione. Com'è stato stupendamente argomentato da von Neumann in *The Theory of Self-Reproducing Automata* (1966), sono questi i livelli in cui le capacità costruttive possono diventare *universali*, nel senso delle macchine universali di Turing, e, in particolare, *autocostruttive*. Come ha spiegato Hofstadter (1979), le stesse capacità autoriproduttive delle cellule viventi possono interpretarsi come capacità autoriflessive, giacché tutti

sistemi capaci di autocostruirsi devono contenere al loro interno i programmi della loro costruzione, i quali non sono altro che rappresentazioni compresse della loro stessa struttura.

Procedendo verso l'alto la complessità dei livelli e dei metalivelli di sistemi biologici diventa in pratica indescrivibile. È stato stimato che il numero di specie viventi nell'intero orbe terraqueo sia circa 8.7 milioni (Mora et. al, 2011) e ovviamente quelle estinte sono assai più numerose e in gran parte sconosciute. Da questo stadio in poi l'ordinamento parziale dei metalivelli stessi prende la forma di una rete di comunicazione che governa a ritroso tutti i livelli delle funzioni biologiche. È da questo stadio da cui emergono i linguaggi.

Sebbene in linea di principio sia ipotizzabile una progressione infinita di livelli, non si può a priori escludere che esista un livello supremo nel quale il linguaggio acquista capacità interpretative universali e diviene autoriflessivo, e nel quale ogni messaggio trova i suoi significati completi e definitivi. Di fatto, un livello di questo tipo esiste, è quello del pensiero autoriflessivo che è capace di pensare il pensato; vale a dire, il livello dell'autocoscienza individuale. Tuttavia potrebbe non essere questo il livello supremo, giacché le menti autocoscienti sono collegate tra loro dalla rete della comunicazione intersoggettiva.

In conclusione, possiamo affermare che la fenomenologia delle emergenze si presenta come un ordinamento parziale di livelli che inquadra la totalità dei fenomeni naturali. Questo si estende tra il livello infimo delle particelle elementari a quello supremo del pensiero autocosciente, passando attraverso quello intermedio dei sistemi capaci di autoriprodursi; tutti e tre questi livelli essendo dotati di proprietà autoriflessive.

Se, come postula la fisica quantistica, l'esistenza fenomenica del mondo naturale è il prodotto di un rapporto di reciproca determinazione tra il livello infimo degli stati quantistici elementari e il livello informativo supremo degli osservatori, bisogna riconoscere che questa relazione è resa possibile soltanto attraverso la mediazione dei sistemi viventi.

Infine, facendo astrazione dalla partizione dell'universo realmente esistente in un mondo di cose osservate e un mondo di osservatori, possiamo affermare che l'universo fisico-informativo nel suo insieme, così dualmente costituito, è stato capace, nel suo corso storico, attraverso i processi di elaborazione universale dell'informazione, di raggiungere la capacità di rappresentare e comprendere la sua stessa struttura materiale al punto di saper ricostruire la sua storia cosmologica.

A questo punto della nostra indagine si porrebbe il problema di capire se la stessa struttura fisica dell'universo e delle leggi che lo governano siano state univocamente determinate dalla condizione di possedere tutte le capacità autoriflessive su indicate; ma questo è un argomento d'altro genere.

---

### Bibliografia

- Anderson, P.W. (1972) More is different. *Science*, **177**:393-396.
- Anderson, P.W. (2000) *Basic Notions of Condensed Matter Physics* (Addison-Wesley).
- Planck, M. (1901) [On the Law of Distribution of Energy in the Normal Spectrum](#). *Annalen der Physik*, vol. 4, p. 553 ff.
- Hofstadter, D. R. (1979) *Gödel, Escher and Bach. An eternal golden braid*. Basic Books, Inc.; trad. it. *Gödel, Escher and Bach. Un'eterna ghirlanda brillante*. Adelphi Edizioni (1985).
- Turing, A.M. (1936), On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem. *Proceedings of the London Mathematical Society*, 2 **42**: 230–265; (1937) On Computable Numbers etc.: A correction", *Proceedings of the London Mathematical Society*, 2 **43**: 544–46.
- Von Neumann, J. (1966) *Theory of Self-Reproducing Automata*. University of Illinois Press, Urbana.
- Russell B. Whitehead A.N. (1913) *Principia Mathematica*, Cambridge University Press, Cambridge UK.
- Landau, L.D., Lifshitz, E.M. e Pitaevskij (1986) *Fisica statistica*, parte 1. Editori Riuniti.
- Von Bertalanffy, L. (1968) *General System Theory. Development, Applications*, Georg Braziller, New York; trad. it. *Teoria Generale dei Sistemi*, Oscar Saggi Mondadori, 2004.
- Schrödinger, E. (1946) *What is life?*; trad. it. *Che cos'è la vita?*

- Glansdorff, P., Prigogine, I. (1971) *Thermodynamic Theory of Structure, Stability, and Fluctuations*, Wiley-Interscience, London.
- Cantor, G. (1955, 1915). *Contributions to the Founding of the Theory of Transfinite Numbers*. New York: Dover. Traduzione dei lavori del 1885 e 1887.
- De Broglie, L. (1924) *Recherches sur la théorie des quanta*. Tesi, Parigi.
- Heisenberg, W.K, (1925) Über quantumtheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen. *Zeitschrift für Physik*, 33:879-893.
- Faddeev, L D and Popov, V N (1967). Feynman Diagrams for the Yang-Mills Field. *Phys. Lett.* B25: 29-30.
- Okun, L.B. (1986) *Leptoni e Quarks*, Editori Riuniti, Roma.
- Nambu, Y. and Jona-Lasinio, G. (1961). Dynamical Model of Elementary Particles Based on an Analogy with Superconductivity. I. *Physical Review* **122**: 345–358; Dynamical Model of Elementary Particles Based on an Analogy with Superconductivity. II. *Physical Review* **124**: 246–254.
- Umezawa, H., Matsumoto, H. and Tachiki, M., (1982) *Thermo Field Dynamics and Condensed States*, North-Holland Pub.Co., Amsterdam.
- Von Neumann, J. (1932) *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Princeton University Press.
- Kibble, T.W.B. (1967) Coherent Soft-Photon States and Infrared Divergences. I. Classical Currents, *Journal of Math. Phys.* 9:315–324; Coherent Soft-Photon States and Infrared Divergences. II. Mass-Shell Singularities of Green’s Functions. *Physical Rev.* 173:1527–1535; Coherent Soft-Photon States and Infrared Divergences. III. Asymptotic States and Reduction Formulas. *Physical Rev.* 174:1882–1901; Coherent Soft-Photon States and Infrared Divergences. IV. The Scattering Operator. *Physical Rev.* 175:1624–1640.
- Von Neumann, J. (1939) On infinite direct products. *Compositio Mathematica*, 6:1-77.
- Wiener, N. (1948) *Cybernetics, or control and communication in the animal and in the machine*. MIT Press, Camb. Mass. USA. Trad. it. (1982) *La cibernetica: controllo e comunicazione nell'animale e nella macchina*. Il Saggiatore.
- Fröhlich, H. (1968) Long range coherence and energy storage in biological systems. *Int. J. Quant. Chem.* 2:641–649.
- Davydov, A.S. (1982), *Biology & Quantum mechanics*, translated by D. Oliver, Pergamon Press.
- Kauffman, S.A. (1993) *The Origins of Order – Self-Organization and Selection in Evolution*, Oxford University Press.
- Nobili, R. (2009) *Fondamenti di biofisica. Capitolo I*. Reperibile fino alla fine del 2013 presso il sito <http://pd.infn.it/~rnobili> .
- von Neumann, (1932) *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Princeton University Press.
- Shannon, C.E. and Weaver, W. (1949) *A Mathematical Theory of Communication*, Illinois University Press, Urbana.
- Szilard, L., (1964) On the Decrease of Entropy in a Thermodynamic System by the Intervention of Intelligent Beings. *Behavioral Science*. Traduzione dal tedesco dell’articolo pubblicato in *Zeitschrift für Physik*, 53:840-853 (1929).
- Brillouin, L. (1956) *Science and Information Theory*. Academic Press, New York.
- Aiello, M., Albano, A., Attardi, G. e Montanari, U. (1976) *Teoria della computabilità, logica, teoria dei linguaggi formali*. Materiali didattici ETS (Pisa).
- Pattee, H. H., (1972) The Nature of Hierarchical Controls in Living Matter. In R. Rosen (ed.) *Foundations of Mathematical Biology, vol. 1*, New York: Academic Press, pp. 1-22; (1995) [Evolving Self-Reference: Matter, Symbols, and Semantic Closure](#). *Communication and Cognition - Artificial Intelligence*, 12(1-2):9–27.
- Mora, C., Tittensor, D.T., Adl, S., Simpson, A.G.B. and Boris Worm, B. (2011) How Many Species Are There on Earth and in the Ocean? *PLoS Biol* 9(8): e1001127.

## Osservazioni di alcuni studiosi e commenti dell'autore

**Franco Chiereghin** (*Professore emerito di Filosofia Teoretica presso l'Università di Padova*).

Con riferimento al § 4, faccio un po' fatica a comprendere, a proposito della *rinormalizzazione*, come da dati provvisori falsi e applicando tecniche ricorsive si possa pervenire a risultati veritieri. A meno di non adottare la concezione logica stoica che prevede che nelle proposizioni condizionali (se  $p$  allora  $q$ ) la premessa può essere falsa e l'inferenza invece vera.

**Renato Nobili**

I procedimenti di rinormalizzazione, introdotti da F. J. Dyson nel 1948 (*Physical Review*, 75:486-502 e 75:1736-1755), si sono rivelati di importanza capitale per l'autoconsistenza logica della fisica quantistica. A dispetto della struttura rigorosamente logico-classica della matematica usata nei calcoli teorici, tali procedimenti sono in pratica procedure di calcolo costruttive di tipo ricorsivo che possiamo definire *dialettiche*. Il carattere dialettico è inerente al fatto che, in generale, la costruzione di una teoria fisica può generare contraddizioni che devono essere superate in qualche modo, se si vuole che la teoria si presenti alla fine logicamente autoconsistente (il che non sempre è possibile). Il procedimento di rinormalizzazione consiste in una successione teoricamente infinita di stadi di calcolo volti a produrre livelli di descrizione fenomenologica viepiù precisi: i risultati ottenuti a ciascuno stadio devono essere tuttavia opportunamente modificati e corretti affinché le costanti fisiche inizialmente introdotte al livello fondamentale (masse e cariche elettriche) siano le stesse anche a livello fenomenologico. Come spiega Richard Feynman nelle sue celebri *Lectures*, anche l'elettromagnetismo classico è affetto da contraddizioni che possono essere sanate ridefinendo la massa delle particelle cariche al livello fenomenologico (*La Fisica di Feynman*, Vol.II, Edizione Zanichelli, 2007). Soltanto le teorie fisiche assiomatiche, vale a dire quelle che si ottengono per deduzione logica da un insieme fondamentale di assiomi, come ad esempio la Meccanica Razionale, sono esenti da contraddizioni. È importante considerare che, mentre le teorie costruttive sono feconde e aperte a imprevedibili sviluppi, quelle assiomatiche sono invece sterili, rigide e generalizzabili soltanto per abolizione di qualche assioma. Possiamo dire che le prime stanno alle seconde come l'architettura civile sta a quella funeraria.

La necessità di ridefinire le costanti fisiche deriva dal fatto che i valori introdotti nel livello fondamentale si riferiscono a particelle "nude", vale a dire non rivestite dalle nubi di particelle virtuali che in realtà le accompagnano. Attribuendo a queste particelle le costanti fisiche sperimentali, non si tiene conto del fatto che tali costanti includono importanti contributi che provengono dalle nubi di particelle virtuali.

Ad esempio, l'elettrodinamica quantistica di Dyson parte dalla definizione di un livello di descrizione fondamentale in cui gli elettroni e i fotoni son assunti come entità puntiformi libere di muoversi nello spazio – come se non interagissero tra loro – e dall'adozione di una legge d'interazione tra elettroni e fotoni che soddisfa a certe proprietà di simmetria. A questo livello di descrizione le costanti fondamentali della teoria (masse e cariche elettriche) sono assunte uguali a quelle osservate in natura, che sono in realtà proprie del livello di descrizione fenomenologico che ci si aspetta di ottenere alla fine calcolo ricorsivo. Le contraddizioni dei procedimenti di rinormalizzazione originano precisamente da questo *qui pro quo*. Infatti, assumendo che le costanti fisiche assunte a livello fondamentale siano uguali a quelle del livello di descrizione fenomenologico, si ignora che a questo secondo livello gli elettroni si presentano in realtà circondati dal campo elettrico da essi generato, che li avvolge e li segue in tutti i loro movimenti; campo che, essendo quantizzato, può essere descritto come una nube di fotoni virtuali. S'ignora altresì che un fotone confinato in una regione dello spaziotempo abbastanza piccola tende a decomporsi in una coppia di particelle virtuali formata da un elettrone e un antielettrone.

Ora, la nube di fotoni virtuali che circonda un elettrone a riposo possiede un'energia che, a calcoli fatti, è infinita positiva, mentre le coppie virtuali in cui si decompone un fotone hanno, a calcoli fatti, un'energia infinita negativa. Poiché la teoria della relatività identifica l'energia a riposo come massa moltiplicata per il quadrato della velocità della luce (secondo la nota formula  $E = mc^2$ ), ne seguirebbe che un elettrone dovrebbe avere una massa infinita positiva e i fotoni una massa infinita negativa, il che è totalmente insensato prima ancora che sbagliato. Inoltre, a calcoli fatti, anche la carica elettrica di un elettrone ottenuta a livello fenomenologico, cioè la costante d'interazione tra elettroni e fotoni, risulta avere un valore infinito.

Queste contraddizioni, apparentemente fatali, si superano assumendo che sia lecito sottrarre dalle masse delle particelle puntiformi, introdotte al livello fenomenologico fondamentale, delle quantità infinite e

ridefinendo le costanti di accoppiamento tra elettroni e fotoni in modo tale da far tornare i conti con i valori che si riscontrano a livello fenomenologico.

Possiamo dire che, in partenza, la descrizione del livello fondamentale è *falsa* perché conduce a una descrizione fenomenologica che contraddice i dati sperimentali, ma che, alla fine, con la ridefinizione delle masse e della carica assunte a livello fondamentale, la descrizione fenomenologica è fatta diventare *vera*. Nota che non è possibile introdurre a priori, già a livello fondamentale, le correzioni delle masse e della carica, giacché queste si ottengono solo dai calcoli che si devono fare di volta in volta per determinare la struttura del livello fenomenologico. È precisamente questo il procedimento di rinormalizzazione.

### Franco Chiareghin

Il vuoto originario, da cui si scatena il Big Bang, è da concepirsi come vuoto-vuoto o come vuoto percorso da fluttuazioni? In altre parole, vale anche per il vuoto originario il principio d'indeterminazione, per cui i suoi valori non possono essere uguali a zero (perché sarebbero assolutamente determinati), ma occorre concepirlo come "pieno" del 'ribollire' di particelle virtuali? In tal caso, il Big Bang potrebbe essere frutto di una fluttuazione dotata di sufficiente energia per fare passare il virtuale a reale?

### Renato Nobili

Nella teoria dei campi quantizzati il vuoto infinitamente esteso è definito come lo stato di minima energia dei campi. In questo stato, i campi non sono nulli ma costituiti da quanti virtuali fluttuanti attorno a un livello minimo di campo medio di densità energetica finita, secondo una legge imposta dal principio d'indeterminazione. È interessante considerare che l'energia totale di fluttuazione del vuoto di un campo di *bosoni* (particelle di spin 0 o 1) è infinita positiva, mentre quella di un campo di *fermioni* (particelle di spin  $\frac{1}{2}$ ) è infinita negativa. Se l'energia di fluttuazione quantistica del vuoto fosse infinita, anche il campo gravitazionale sarebbe infinito, giacché la sorgente di questo campo è proprio l'energia; il che è palesemente falso. Bisognerà pertanto che i bosoni e i fermioni esistano in proporzioni tali, e abbiano parametri fisici tali, da rendere possibile la cancellazione reciproca delle energie di fluttuazione positive e negative. Questa condizione di perfetto bilancio energetico ha avuto un'importanza fondamentale per la predizione teorica della massa del bosone di Higgs recentemente scoperto (Degrassi *et al.*, [arXiv:1205.6497](https://arxiv.org/abs/1205.6497), 2012).

*Nota: Le fluttuazioni quantistiche differiscono da quelle termodinamiche nel fatto che le prime sono processi reversibili di creazione e distruzione di particelle virtuali, mentre le seconde sono variazioni di densità di particelle reali.*

Nel caso del Big Bang, l'ipotesi che l'universo si sia generato dallo sviluppo esplosivo di una fluttuazione di un vuoto originario di energia nulla è assai seducente sia da un punto di vista fisico sia da uno filosofico. Se così è, allora il principio di conservazione dell'energia imporrebbe che anche lo stato presente dell'universo abbia energia nulla. Questo è in linea di principio ammissibile perché l'energia della materia è positiva mentre quella del campo gravitazionale è negativa, cosicché la somma delle due potrebbe essere rigorosamente nulla. Questo si accorderebbe molto bene col fatto che la geometria spaziotemporale dell'universo, deducibile dalle osservazioni astronomiche, appare con grandissima precisione mediamente piatta, ciò che succede se l'energia totale media dell'universo è mediamente nulla.

Purtroppo la teoria della Relatività Generale di Einstein, nella quale la geometria spaziotemporale è fatta coincidere col campo gravitazionale, appare in contrasto con questa ipotesi del Big Bang. Le equazioni del campo gravitazionale di Einstein stabiliscono che l'energia della geometria, vale a dire del campo gravitazionale, e quella della materia (particelle e radiazione elettromagnetica) si conservano separatamente, cosicché non è possibile alcun trasferimento netto di energia dalla geometria alla materia. Chiaramente questo implica che è impossibile che le energie della geometria e della materia del vuoto originario fossero entrambe nulle, giacché in tal caso sarebbero rimaste separatamente nulle anche dopo il Big Bang.

Personalmente, sono convinto che il superamento di questa contraddizione richieda una riformulazione della teoria Generale della Relatività e che l'unica generalizzazione possibile della geometria gravitazionale di Einstein sia quella che rimpiazza la struttura *metrica* dello spazio-tempo, che postula l'invarianza delle lunghezze degli intervalli spaziotemporali infinitesimi rispetto ad arbitrarie deformazioni geometriche, con una geometria *conforme*, che postula invece l'invarianza degli angoli formati da due direzioni spaziotemporali uscenti da uno stesso punto dello spazio-tempo (Weyl, 1918; Cartan, 1922). La geometria conforme è una generalizzazione di quella metrica perché anche nelle geometrie con struttura metrica gli angoli tra le direzioni

locali si conservano. La proprietà caratteristica più importante della geometria conforme è che l'unità di misura delle lunghezze può variare nel corso del tempo, producendo in tal modo variazioni di scala dello spazio-tempo.

### **Franco Chiereghin**

Relativamente al § 5, ho una domanda di carattere generale. Nella lettura dal basso verso l'alto, le emergenze di proprietà macroscopiche di estensione finita in quale rapporto si pongono con l'entropia del sistema? Le rotture spontanee di simmetrie aumentano o diminuiscono l'entropia di un determinato sistema? Sono fattori di disordine o di ordine? Leggendo l'ultimo capoverso di questo §, mi trovo in imbarazzo, perché, nella mia abissale ignoranza, mentre mi sembrerebbe che il recupero delle simmetrie originarie e lo sparire dei bosoni di Goldstone vadano nella direzione dell'aumento di entropia, il formarsi di cristalli dai materiali amorfi, lo sparire dei difetti dei cristalli e il migrare delle impurità verso le superfici mi sembrerebbero processi d'incremento di ordine e quindi di diminuzione di entropia (a meno di non considerare proprio i difetti e le impurità come ciò che mantiene il sistema lontano dall'equilibrio e lo rende più ricco di possibilità. Così, ad esempio, una goccia di ambra che contiene imprigionata in sé l'"impurità" di una zanzara di milioni di anni fa si può apprezzare di più di una goccia di ambra pura.

### **Renato Nobili**

Le perdite di simmetria di un sistema macroscopico comportano sempre aumenti di entropia. Ciò dipende dal fatto che le simmetrie sono imposte da vincoli microscopici interni al sistema che tendono a rompersi quando la temperatura aumenta. La rottura di questi vincoli si manifesta come una produzione di nuovi gradi di libertà del sistema. Per rompere questi vincoli e fornire energia cinetica ai nuovi gradi di libertà bisogna somministrare al sistema una certa quantità di calore  $Q$  a una temperatura  $T$ . Si ha pertanto un aumento di entropia  $\Delta S = Q/T$ , come insegna la termodinamica.

Nel caso dei campi quantizzati, la rottura spontanea di una simmetria determina quello che Hirumi Umezawa chiama un riarrangiamento della simmetria: si ottiene un sistema con un grado di simmetria inferiore e la produzione compensativa di un campo di bosoni di Goldstone, che introducono nel sistema nuovi gradi di libertà (Umezawa *et al*, *Thermofield Dynamics and Condensed States*, North Holland, 1982). Pertanto le considerazioni finali espresse nell'osservazione sono corrette.

### **Franco Chiereghin**

Nel § 6 si parla più volte di una "naturale tendenza alla formazione di strutture ordinate". Certo, ciò è attestato ovunque, ma non per questo tale tendenza è meno sorprendente né cessa di meravigliare. Non è proprio questa "tendenza" (che è un concetto eminentemente qualitativo) il vero 'miracolo', per cui si potrebbe chiedere, variando Leibniz, "perché la tendenza all'ordine e non al caos?".

### **Renato Nobili**

La tendenza alla formazione di strutture ordinate è una proprietà caratteristica dei sistemi quantistici che non ha l'analogo classico. La ragione principale risiede nel fatto che le relazioni tra le parti di un sistema classico si modificano per gradi insensibili, cosicché in vicinanza di ogni stato fisico esistono infiniti stati che differiscono per variazioni arbitrariamente piccole di energia. Di conseguenza, anche a bassa temperatura, le configurazioni possibili del sistema nell'intorno di ogni stato sono infinite e pertanto tendono a migrare l'una nell'altra in modo caotico. Al contrario, le relazioni tra le parti di un sistema quantistico sono discrete, cosicché nell'intorno di ogni stato esiste un numero finito di stati, che pertanto richiedono variazioni di energia finite per transitare l'uno nell'altro. È questa la ragione per cui, a basse temperature, gli stati possibili di un sistema quantistico sono pochi e resistenti alle perturbazioni termiche e i sistemi quantistici tendono a "cristallizzarsi" e ad assumere forme massimamente ordinate.

### **Franco Chiereghin**

Relativamente al § 7, sentirei il bisogno che mi fossero spiegati meglio i capoversi 3 e 4 del paragrafo e cioè quelli che supportano l'importantissima affermazione che "l'informazione è l'emergenza fondamentale del mondo macroscopico". Vorrei, infatti, capire bene: a) il significato entropico della



dispersione all'infinito di un infinito sciame di fotoni conseguente alla registrazione di una quantità non nulla d'informazione: b) se l'affermazione che l'informazione è l'emergenza fondamentale del mondo macroscopico, comporta la sua contraria e cioè che tale emergenza sia assente o non fondamentale nel mondo microscopico.

### Renato Nobili

Circa la domanda a): la dispersione non osservabile delle radiazioni infrarosse all'infinito comporta un aumento di entropia equivalente alla perdita dell'informazione relativa alla descrizione dello stato fisico di tali perdute radiazioni. Circa la domanda b): affermare che "l'informazione è l'emergenza fondamentale del mondo *macroscopico*" non significa che non possano esistere "emergenze fondamentali del mondo *microscopico*". Se la teoria del Big Bang descrive la formazione esplosiva dell'universo generata da una fluttuazione del vuoto originario, allora bisogna considerare il Big Bang come un'emergenza fondamentale del mondo *microscopico*.

### Franco Chiareghin

Infine un'osservazione generale al tema dell'informazione. Se è vero (ammesso e non concesso che abbia capito bene) che l'informazione è strettamente correlata al linguaggio e che si dà messaggio di un linguaggio là dove sussistono vincoli coerenti che correlano strutture e operazioni e che istituiscono controlli gerarchici tra i diversi livelli della realtà fenomenica, mi verrebbe da tradurre tutto questo nel modo di pensare degli antichi greci. Si è detto che la qualità che ha reso eccezionale quel piccolo popolo è stata la capacità di vedere ovunque all'opera le "forme". Ora tu ci dici che l'emergenza fondamentale della realtà fisica è l'informazione, che l'informazione "non è un'entità fisica né una proprietà della materia", che essa è un "vincolo coerente" o "arbitrario, ma definito" che collega gerarchicamente i diversi livelli della realtà fenomenica. Mi chiedo: tutto questo i greci non lo avrebbero chiamato "forma" o sono fuori strada?

### Renato Nobili

Penso proprio che tu abbia ragione. Del resto anche da un punto di vista etimologico "informare" significa "mettere in forma". Claude Shannon definisce l'informazione come una *riduzione d'incertezza aprioristica* (*A Mathematical Theory of Communication*, Bell System technical Journal, 27, 1948). Prima di lanciare una moneta, che supponiamo non truccata, le due facce, poniamo testa e croce, possono uscire con probabilità uguali a  $\frac{1}{2}$ . Si può dire che, a priori, c'è un bit (binary digit = cifra binaria, come 0 e 1) d'incertezza riguardo all'esito possibile del lancio, mentre, dopo il lancio, l'incertezza si è annullata, giacché è certo che o è uscita la testa o è uscita la croce. Adottando la definizione di Shannon su citata, si può dire che il lancio della moneta ha ridotto l'incertezza di un bit producendo in tal modo un *bit d'informazione*.

Nel caso che si abbia a che fare con un insieme di  $N$  possibili eventi, a priori equiprobabili, dunque di probabilità  $1/N$ , si ha un'incertezza aprioristica pari a  $\log_2 N$  bit ( $\log_2 =$  logaritmo di base 2). Se uno particolare di tali eventi si realizza, possiamo affermare che l'informazione fornita dall'evento è pari a  $I = \log_2 N$  bit. Nel caso generale che le possibilità abbiano probabilità  $P_1, P_2, \dots, P_N$ , l'incertezza a priori è

$$P_1 \log_2 1/P_1 + P_2 \log_2 1/P_2 + \dots + P_N \log_2 1/P_N \text{ bit}$$

e altrettanta è l'informazione che si guadagna quando una delle possibilità si realizza.

Questo ci porta a definire l'informazione come *determinazione specifica entro un insieme di possibilità a priori*. È evidente che la stessa nozione aristotelica di atto in rapporto alla potenza coinvolge in qualche modo la nozione d'informazione, giacché l'atto è una determinazione specifica di ciò che è in potenza. Secondo questa definizione anche la forma di una statua è un'informazione giacché, come mi è stato raccontato, sia Fidia sia Michelangelo immaginavano di produrre la statua togliendo il marmo in eccesso che ne avvolgeva la forma.

**Gian Luigi Brena** (*Padre Gesuita, Professore di antropologia filosofica, epistemologia e fenomenologia della religione presso l'Istituto di Studi filosofici Aloisianum di Padova*).

### 1. Informazione e informatica

Un'esperienza da principiante mi ha fatto provare quanto sia difficile trovare precisazioni sulla domanda: che cos'è l'informazione? Si trovano più facilmente spiegazioni su che cos'è l'informatica. Ma questa è già una *teoria* dell'informazione o dell'automazione dell'informazione, e sono questioni molto diverse. Un altro problema è quello di specificare se ci sia una differenza qualitativa tra le interazioni causali della fisica e la trasmissione di informazioni, e in che cosa consista.

Ci poniamo quindi questi interrogativi: 1. differenziare la trasmissione di informazione dal linguaggio ordinario; 2. distinguere relazioni causali fisico-chimiche e relazioni informazionali (cibernetiche?) (= Monod); 3. precisare la differenza tra ciò che io definirei causalità puntiforme e quella che definirei causalità strutturale. Mi rendo conto che le espressioni "causalità puntiforme e strutturale" sono vaghe e più o meno riguardano l'opposizione tra analogico e digitale, ma più precisamente si potrebbe dire che c'è sotto anche l'idea aristotelica che le disposizioni o potenzialità (forme) abbiano una vera e propria funzione causale anche se non di causa efficiente.

### Renato Nobili

Nell'accezione comune *l'informatica* è intesa come tecnica di elaborazione dell'informazione, quella che tutti i programmatori devono conoscere per creare delle buone applicazioni per i calcolatori. L'informazione è invece una nozione che nasce principalmente dalla fisica (von Neumann, 1929), dalla termodinamica (Szilard, 1929) e dalla teoria della comunicazione (Shannon, 1948) – già citati nel mio testo sulle emergenze – per significare ciò che può essere memorizzato nella materia o trasmesso da segnali di varia natura. Essa è oggetto di una teoria matematica che si occupa principalmente della sua misura quantitativa e della capacità di un sistema materiale di memorizzarla e trasmetterla in modo ottimale. Naturalmente bisogna conoscere un po' di teoria dell'informazione per applicarsi all'informatica, ma non è necessario conoscere a fondo tutti gli sviluppi della teoria, che interessano principalmente ai matematici e ai teorici puri dell'informatica e della teoria dei linguaggi. Prima della nascita di questa teoria l'informazione era intesa solo in senso letterario o giornalistico, e ancor oggi lo è dalla maggioranza delle persone. Non è necessario cambiare il nome di questo termine, perché l'informazione, scientificamente intesa, comprende anche i significati letterario o giornalistico. Questa nozione più ampia abbraccia un campo di significati che appartengono al dominio scientifico complementare delle scienze fisiche (biologia, teoria dei linguaggi, neuroscienze ecc), perciò è importante diffonderne la conoscenza. La più importante trattazione generale della nozione d'informazione è *Science and Information Theory* (Academic Press Inc, New York 1956) del fisico canadese Leon Brillouin.

Circa il punto 3., credo di aver capito il senso della sua distinzione tra causalità fisica (puntuale) e causalità formale (strutturale). Il cenno che lei fa ad Aristotele mi suggerisce subito la distinzione aristotelica tra "cause efficienti" e "cause finali". Non c'è difficoltà a riconoscere nelle prime le cause della fisica. Quanto alle seconde, so che Aristotele riteneva necessario introdurle per spiegare lo sviluppo degli esseri viventi.

Come spiegare che da un semino cresce un albero, se non si ammette che esista una tendenza del semino a raggiungere quella precisa forma di albero? Se questo è il senso della sua distinzione, allora potrei intanto suggerire di modernizzare la nozione di "causalità finale" (formale, strutturale) chiamandola "causalità biologica". In questo caso si solleverebbe un argomento molto interessante, perché la causalità biologica si spiega con l'esistenza dei programmi genetici (RNA, DNA) e di "macchine costruttrici universali" capaci di utilizzarli per la riproduzione e l'embriogenesi e l'esecuzione di processi ricorsivi generatori della complessità biologica. Qui siamo interamente fuori dall'ambito della fisica e invece pienamente dentro la teoria dell'informazione e della complessità.

### Gian Luigi Brena

#### 2. Informazione e linguaggio ordinario

Weizsäcker presenta l'informazione sulla falsariga del linguaggio ordinario. La lingua è il modello più chiaro e articolato di informazione, mentre la scrittura e la stampa sono sue oggettivazioni. Se ci si pone il problema di *misurare* l'informazione, occorre anzitutto ridurre il linguaggio ordinario con le

sue ridondanze al suo contenuto di informazione<sup>1</sup>. Per questo egli porta l'esempio del linguaggio telegrafico. Per scrivere un telegramma e rendere più rapida e meno costosa la sua trasmissione si riducono al minimo le parole, eliminando le ridondanze. Da "Sono contento di poter arrivare a Milano lunedì 17 gennaio alle cinque del pomeriggio" si passa a: "Arrivo lunedì ore 17", il resto è ovvio dal contesto.

Si devono chiarire le ambiguità del linguaggio ordinario. Ad esempio Eraclito sentenzia che la guerra (pòlemos) è il padre di tutte le cose, una frase che può avere un senso profondo, ma come misurarlo? Questa espressione non ha solo un senso letterale e uno figurato, ma molti sensi, non precisabili in modo esauriente. Tuttavia chiarendo le ambiguità e sfrondando le ridondanze, possiamo misurare l'informazione analizzandola in scelte tra singole alternative sì/no, oppure 1/0 (= 1 bit) e con la loro combinazione. Per scrivere l'informazione si possono usare codici diversi. Il telegrafista usa l'alfabeto Morse: la corrente elettrica consente una scelta tra due possibilità acceso/spento, di fatto si è scelta l'alternativa punto/linea. In base a queste scelte binarie si può ricostruire l'alfabeto, usando diversi raggruppamenti di punti e linee che funzionano *come gruppi ordinati*. Se usiamo due scelte sì/no abbiamo quattro combinazioni possibili: sì/sì, no/no, sì/no, no/sì, e a ciascuna di esse si può far corrispondere una lettera dell'alfabeto. Con sequenze di tre sì/no si hanno a disposizione altre otto combinazioni, e con un gruppo di 4 sì/no si arriva a 16 combinazioni, e questo basta per scrivere tutte le lettere dell'alfabeto ( $16+8+4+2=30$ ).

Ciascuna lettera corrisponde a una *combinazione* determinata di punti e linee o di 1/0. In modo analogo si possono rappresentare i numeri da uno a nove, e si può simulare l'addizione anche con una macchina calcolatrice, facendo confluire insieme due raggruppamenti, in modo da avere la loro somma. E all'addizione si possono ricondurre tutte le operazioni dell'aritmetica e affidarle a un calcolatore.

Ma "informatica" è un'abbreviazione di *informazione automatica*. Come automatizzare l'informazione? Qui non si tratta più di trascrivere i suoni o la scrittura di un linguaggio, bensì di esprimerne secondo le stesse esigenze di precisione il suo senso legato a concetti e ragionamenti. Per mostrare come questo si possa realizzare Weizsäcker fa l'esempio di una legge logica che riproduce il seguente ragionamento: "se non è vero che c'è il sole e piove, allora o non c'è il sole o non piove". Per dirlo in modo ridondante: se non è vero che c'è il sole e al tempo stesso piove, allora deve essere vero che o non c'è il sole o non piove. Detto altrimenti: se le due proposizioni non sono vere nello stesso tempo, allora una delle due deve essere falsa. Questa è una legge logica che è sempre vera. Possiamo indicare con *a* la proposizione "c'è il sole" e con *b* la proposizione "piove" e introdurre i segni che sono abituali per indicare le connessioni logiche: e ( $\square$ ), o ( $\square$ ), se ... allora ( $\rightarrow$ ), e per la negazione ( $\neg$ ), e scrivere in simboli:  $\neg(a \square b) \rightarrow \neg a \square \neg b$  (che si legge: se non è vero che *a* e *b*, allora è vero che non *a* o non *b*). Dire che è una legge logica significa affermare che essa è sempre vera, qualsiasi proposizione si sostituisca ad *a* e *b*. Non solo ma le regole dell'implicazione logica ( $\rightarrow$ ) dicono che nei calcoli logici all'antecedente  $\neg(a \square b)$  si può sostituire il conseguente  $\neg a \square \neg b$  senza che cambi il valore di verità. Così le leggi logiche del ragionamento si possono ridurre a calcoli, ed essi possono a loro volta essere affidati a una macchina.

Ma è possibile dire esattamente tutto quello che si può pensare, (o viceversa)? Ed è possibile anche comunicarlo chiaramente e misurarlo esattamente? Ognuno di questi passi implica un impoverimento: non si riesce a dire tutto quello che si pensa, né tanto meno a dirlo esattamente al punto che sia misurabile. A ogni passo ciò che si guadagna in chiarezza (e in possibilità di automazione) lo si perde appunto in ricchezza, ridondanza e molteplicità di significati. Si potrebbe pensare che così si perda solo la confusione e che dunque, almeno in campo scientifico, si possano e debbano creare dei linguaggi essenziali e univoci, lasciando perdere il linguaggio quotidiano. Certamente occorre creare dei linguaggi rigorosi, ma è impossibile eliminare del tutto il linguaggio corrente con le sue possibili ambiguità e imprecisioni.

---

<sup>1</sup> L'informatica però si limita a essenzializzare l'informazione eliminando le ridondanze e le plurisignificanze e riducendo al minimo gli algoritmi che esprimono e consentono di trasmettere l'informazione. Ora tali ridondanze giocano un ruolo decisivo ad esempio nell'efficienza della nostra percezione e del linguaggio ordinario.

### Renato Nobili

Purtroppo non sono riuscito a reperire testi di Weizsäcker contenenti gli argomenti citati. Da quanto posso evincere dal testo su riportato, i commenti di Weizsäcker riflettono in modo sommario i contenuti del testo di Shannon del 1948. Quanto alla connessione tra teoria dell'informazione e logica, è per me chiaro che una *proposizione* logica, in quanto a priori non si sa se sia vera o falsa, contiene un bit d'incertezza, come quella del dilemma testa o croce. Un *enunciato* logico (non una proposizione), per esempio "la neve è bianca" (da intendersi come la proposizione "la neve è bianca è vera") contiene un bit di informazione, in quanto riduce l'incertezza aprioristica. Come si può notare, la teoria dell'informazione è presente anche nella logica classica.

Quando si parla d'informazione, è importante distinguere tra *supporto* dell'informazione (un telegramma, un segnale elettrico, un treno di onde sonore ecc.) e *contenuto* d'informazione (*significato* del messaggio telegrafico o del segnale elettrico, acustico ecc.). È evidente che il supporto ha sempre una consistenza fisica mentre il contenuto dipende dal significato che l'informazione ha per il destinatario. In altri termini, non è possibile separare la nozione d'informazione dai suoi possibili contesti interpretativi. È proprio per questo che l'informazione non è un'entità fisica. Bisogna tuttavia osservare che la nozione di *quantità d'informazione* ha un significato oggettivo indipendente sia dal contesto interpretativo sia dal supporto fisico dell'informazione. Se un messaggio è corrotto, questo difetto sussiste per tutti i suoi possibili destinatari e in tutti i supporti fisici. L'opportunità di distinguere la *misura* dell'informazione dal suo *significato* è stata sottolineata da Brillouin, che identifica il significato col *valore d'uso* dell'informazione.

### Gian Luigi Brena

Rifacendosi a Tarski, Weizsäcker mostra che è impossibile sganciarsi del tutto dal linguaggio ordinario. Al tempo stesso questo procedimento mostra come collegare l'aspetto sintattico e quello semantico in un linguaggio. Tarski ha definito la verità usando degli esempi come: è vero che "la neve è bianca" se e solo se la neve è bianca. La proposizione citata tra virgolette (che può essere considerata un linguaggio scientifico o una proposizione di una lingua sconosciuta non interpretata) è vera solo se è vera la proposizione corrispondente, che è ripetuta senza virgolette *nel linguaggio ordinario* ed è considerata vera. Il linguaggio ordinario è usato per parlare della proposizione tra virgolette, e funziona come un linguaggio di secondo livello, un metalinguaggio. Ed è un linguaggio non formalizzato e di cui si dà per scontata la verità. Si potrebbe cercare di dimostrare la verità del metalinguaggio, usando il linguaggio ordinario come meta-metalinguaggio. Ma così si avrebbe un regresso all'infinito e si resterebbe sempre con un linguaggio ordinario di ordine superiore, del quale non si può controllare la verità e che è quindi accettabile come solo intuitivamente vero.

Insomma il linguaggio ordinario può parlare di se stesso e così anche in parte disambiguarsi e formalizzarsi, senza tuttavia fare a meno di se stesso e quindi dovendo sempre essere usato come linguaggio non formale. Così si mostra l'imprescindibilità del linguaggio ordinario, un punto che Heisenberg ribadisce per quanto riguarda la fisica quantistica, e che vale anche per quanto riguarda il riferimento semantico della matematica. Ma simili asserzioni dicono solo che il linguaggio ordinario è indispensabile *in funzione della scienza esatta* mentre non si dice quali siano la validità propria del linguaggio ordinario, con le sue risorse e le sue ricchezze. Per questo bisognerebbe non solo considerare la semantica, ma anche l'uso e la pragmatica.

Dunque l'informazione è una formalizzazione parziale del linguaggio ordinario e ha la sua stessa struttura sintattica, semantica e (se si pensa al suo uso e trasmissione) anche il linguaggio formale ha una pragmatica. Ma non abbiamo ancora detto che cosa sia l'informazione. Il telegramma è informazione o *contiene* informazione? Certo l'informazione non è un pezzo di carta che hanno in mano sia il mittente che il ricevente e neppure ciò che vi è scritto né ciò che ciascuno di essi pensa, dato che si tratta di diverse realtà, mentre in tutti questi casi l'informazione è *identica*. In particolare non si può identificare l'informazione né con la materia o l'estensione né con il pensiero e l'intelligenza, ma piuttosto con ciò che Platone e Aristotele hanno chiamato "eidos", sostiene Weizsäcker, e cioè forma.

Il termine "informazione" può indicare la messa in forma di qualsiasi materiale e non richiama direttamente la coscienza. La forma o struttura non è neppure identica alla forma geometrica o alla figura, e può esser espressa o codificata in diversi modi, mediante suoni e onde sonore, mediante

impulsi di corrente elettrica, mediante linee e punti. Quello che conta è di volta in volta un *ordinamento complessivo* strutturalmente equivalente a ciò che codifica.

Weizsäcker sottolinea inoltre la natura linguistica, o comunicativa, come essenziale al concetto di informazione, nel senso che la codificazione della struttura informativa deve poter essere comunicata: deve poter essere trasmessa e letta in modo da produrre degli effetti pratici riscontrabili. Questo non implica necessariamente la coscienza, e la genetica ci mostra dei fenomeni che sono interpretati a ragione nei termini della comunicazione linguistica.

### **Renato Nobili**

La teoria di Tarski, riguardante la distinzione tra linguaggio e metalinguaggio, è stata una delle più importanti conquiste del pensiero logico moderno. Il fatto che la nozione di “verità” non sia definibile livello linguistico ma solo a livello metalinguistico, ha il suo analogo nel teorema di indecidibilità di Gödel e nel teorema dell’*halting* (arresto) di Turing. Questo secondo dimostra l’impossibilità, in generale, per un calcolatore di predire in tempo finito se il processo di calcolo di un altro calcolatore prima o poi si arresterà.

Non deve meravigliare che la teoria di Tarski sia la trasposizione della tematica Gödeliana alla teoria del linguaggio, giacché le idee di Tarski, di Turing, e più tardi quelle di von Neumann sugli automi capaci di autoriprodursi, coinvolgono tutte, seppure in forma diversa, i teoremi logici e meta-matematici scoperti da Gödel (e da von Neumann stesso, che nel 1930 aiutò Gödel a mettere bene a fuoco le sue idee).

Credo però che la visione di Tarski non tenga conto degli sviluppi che la teoria gödeliana ha subì dopo l’introduzione del concetto di *macchina universale* di Turing. Turing definì *universale* una macchina che è capace di simulare una qualsiasi altra macchina. Con lo stesso criterio una lingua potrebbe essere definita *universale* se riesce a tradurre ogni altra lingua. L’italiano di Dante è una lingua universale, come d’altro canto lo sono l’inglese di Shakespeare, il tedesco di Lutero e il francese (progressivamente perfezionato da Rabelais, Joachim Du Bellay, Montaigne e altri grandi autori), visto che i capolavori scritti in queste lingue, come pure i più elevati contributi allo sviluppo di concetti scientifici e filosofici, sono stati tradotti molto bene in ciascuna di tali lingue. Potremmo propriamente chiamare lingue solo quelle universali, in pratica tutte le lingue nazionali occidentali e orientali, chiamando invece *dialetti* o *gerghi* quelle non universali. Non so se la linguistica moderna sia andata in questa direzione; ma se non l’ha ancora fatto è presumibile che il completamento della teoria di Tarski, alla luce delle idee di Turing e von Neumann, possa dare risultati di grande importanza.

Quanto alla possibilità di dire tutto quello che si può pensare, direi che non è possibile perché ritengo che il pensiero sia un processo ricorsivo di complessità indescrivibile.

### **Gian Luigi Brena**

#### *3. Informazione genetica*

Rispetto alla fisica e alla chimica (che secondo Weizsäcker sono a loro volta esprimibili in termini di informazione) nella biologia entra in gioco un nuovo fattore: non tanto l’*informazione* quanto la *cibernetica*, che potremmo caratterizzare come informazione autogestita. La cibernetica si è proposta fin da principio come simulazione dei fenomeni finalizzati propri dei viventi. In sede biologica di solito si fa riferimento alla trasmissione della vita, e cioè all’insieme fondamentale di istruzioni e messaggi iscritti nel genoma, e più precisamente nel DNA (Acido DesossiriboNucleico). Le macromolecole che costituiscono il DNA sono quattro nucleotidi (adenina, citosina, guanina, e timina) che si indicano con le lettere dell’alfabeto A C G T. Esse hanno un’affinità che le accoppia come AT e CG, ma si tratta di un’affinità debole rispetto a quella vigente nella chimica inorganica. Ed è l’affinità debole che conferisce alle catene di nucleotidi una prima virtù, quella di sdoppiarsi facilmente, dopo di che, approfittando di nucleotidi liberi, ciascuna metà ricostituisce una catena di DNA uguale a quella di origine.

Con questa reduplicazione non è ancora emersa la funzione comunicativa del DNA. In quanto veicoli di comunicazione i quattro nucleotidi che costituiscono l’Acido RiboNucleico (RNA messaggero) prodotto dal DNA, comportano una variazione: l’Uracile sostituisce la Timina (ACGU). Tali nucleotidi agiscono a gruppi di tre (triplette) e la loro attività consiste nel selezionare uno dopo l’altro i 20 tipi fondamentali di aminoacidi che costituiscono, in lunghe e varie sequenze, le proteine. Se ACGU sono paragonabili a lettere dell’alfabeto, le triplette sono invece come le parole; esse hanno un senso “comprensibile”, in quanto sono in rispondenza ordinata con determinati aminoacidi, e

sono quindi “leggibili” da essi. Le combinazioni delle quattro lettere sono dunque biologicamente attive o “significative” solo a tre a tre. Ciascuna di queste triplette è ricevuta o “compresa” o interpretata da uno solo dei venti amminoacidi fondamentali che costituiscono le proteine, anche se alcuni amminoacidi sono selezionati da più di una tripletta.

L’RNA-messaggero seleziona un solo amminoacido alla volta e lo aggiunge, passo dopo passo e secondo varie combinazioni alla proteina in costruzione. Monod sottolinea che non c’è nessuna *necessità chimica* nella corrispondenza tra le triplette e gli amminoacidi da esse individuati, e neppure nell’ordine in cui essi sono scelti per formare la proteina specifica. E tuttavia le proteine sono costituite ogni volta in modo identico.

Le proteine poi agiranno come *enzimi* per regolare ulteriori complessificazioni delle macromolecole: esse acquisiscono la loro funzione regolatrice grazie a un ripiegamento tridimensionale su se stesse, che produce le *configurazioni* necessarie alla loro attività: si tratta di nuovo di un processo spontaneo di tipo informazionale. La funzione enzimatica delle proteine è legata alla configurazione tridimensionale o globulare. Essa non è determinata solo dal genoma, ma anche dalle condizioni generali dell’organismo. La *conformazione* globulare delle proteine avviene in forza delle proprietà idrofobe di certi amminoacidi: molecole d’acqua vengono espulse e la proteina si compatta, presentando delle combinazioni o complessi stereospecifici. Questi sono in corrispondenza solo con determinate altre macromolecole, che fanno da *sostrato* all’enzima, e si combinano esclusivamente con esso, poste determinate condizioni “ambientali”.

Ora, proprio queste condizioni ambientali sono quelle che mostrano l’effetto dell’organismo intero sulle dinamiche specifiche della riproduzione macromolecolare che sono osservabili anche sperimentalmente in quanto si possono ricreare in modo sufficientemente approssimato le condizioni garantite dall’organismo. Si può quindi sostenere che l’incremento di informazione è certamente determinato dal meccanismo genetico, ma entro le condizioni garantite dall’organismo. E questo vale per tutto lo sviluppo epigenetico.

In questi processi constatiamo che solo *determinate combinazioni* di elementi base costituiscono un’informazione capace di essere trasmessa e raccolta, attivando così una reazione determinata. La costituzione di certi codici consente la trasmissione e interpretazione dell’informazione. È una comunicazione automatica, che, al crescere della complessificazione, costituisce le cellule, orientate a loro volta, passo dopo passo, alla formazione dei tessuti e dell’intero organismo.

Wicken ritiene importante chiarire l’equivoco che consiste nel presentare l’alfabeto di base nella teoria dell’informazione come un microlivello termodinamico. È vero che anche l’alfabeto è disordinato e, in se stesso, è senza valore informativo, ma esso è *noto* (a differenza dei microstati entropici). In secondo luogo i messaggi che saranno costruiti con questo alfabeto, pur non essendo ancora noti, saranno costruiti *secondo regole*, mediante “scelte” o selezioni combinatorie, e ci saranno solo certe combinazioni che danno origine a “parole”, che possono essere trasmesse e “comprese”. La differenza è proprio tra il caos e la struttura. Ogni carattere “scelto” a differenza di altri comporta un bit di informazione, misurabile secondo il codice binario come una scelta tra 1 e 0. Il punto importante è che l’informazione misura il grado di strutturazione e non il grado dispersione entropica<sup>2</sup>.

Ma il problema di ridurre all’essenziale l’informazione e di trasmetterla nel modo più economico e senza ridondanze è proprio dell’*informatica*<sup>3</sup>. Sembra che solo dal punto di vista dell’informatica si

<sup>2</sup> Ma emerge un punto di contatto se noi ci poniamo il problema di misurare nel modo più economico possibile la struttura di un insieme. Se la struttura è ordinata in modo regolare, essa può essere misurata in modo abbreviato: ad esempio una serie anche molto lunga di 10101010 è comprimibile in due bit moltiplicato per il numero delle ripetizioni. Ma questo ordine non è propriamente struttura, che è un ordine complesso. Ora se si cerca di stabilire l’algoritmo o il programma minimo che determina il grado di informazione presente in un messaggio complesso, ci si trova di fronte a un paradosso: sia il *massimo di struttura*, sia il *massimo di destrutturazione* richiedono programmi minimi più lunghi, l’uno per l’intensità della struttura, l’altro per l’estensione del disordine (misurabile). Wiener nota che i fisici sono più interessati al disordine che all’ordine (che è scontato): *Introduzione alla cibernetica. L’uso umano degli esseri umani*, trad. it di D. Persiani, Boringhieri Torino 1966, p. 36. E nella pagina precedente si parla di due serie di modelli, uno piccolo selezionato da uno più grande a probabilità uno. Una cosa che risulta chiara è la necessaria *formalizzazione* del segnale da trasmettere.

<sup>3</sup> Shannon si limita all’aspetto sintattico, tutto teso a riprodurre nel modo più fedele, economico ed efficiente dei linguaggi *verbali* già esistenti e comprensibili, presupponendo quindi una comprensione e fornendo solo una tecnica di riproduzione estremamente ingegnosa e accurata di comunicazione come trasmissione di messaggi. – e su questa linea si è sviluppata in

possa parlare di complessità sia nel caso dell'ordine strutturato, sia in quello del disordine (che non è sempre entropia. Intuitivamente: la difficoltà di capire l'alta matematica, non è minore di quella di descrivere adeguatamente un completo nonsenso).

### Renato Nobili

Concordo completamente con quanto scritto nell'osservazione. Mi permetto solo di notare, in primo luogo, che nella fisica quantistica l'informazione emerge fin da subito in corrispondenza del rapporto tra osservato e osservatore. Riguardo ai fenomeni biologici, aggiungo che il termine "enzima" riflette ancora una tendenza a far prevalere la visuale macroscopica della chimica su quella funzionale caratteristica del livello di descrizione mesoscopico. Questa consuetudine è ancora prevalente tra i biochimici e i fisiologi di formazione medica, ma lo è sempre di meno tra i biofisici e i fisiologi di formazione ingegneristica.

Gli enzimi sono in realtà nanomacchine proteiche che eseguono una grande varietà di operazioni mesoscopiche: taglio, incollaggio, trasporto di macromolecole, monitoraggio di segnali ecc. Esistono proteine capaci di trasportare attivamente, attraverso la membrana cellulare, ioni di vario genere e piccole molecole; altre capaci di camminare sui filamenti del citoscheletro trasportando con sé i capi di sottili funi formate da proteine intrecciate, come nel caso dei *tip-links* che tengono legate tra loro le stereocilia delle cellule ciliate dell'apparato acustico; altre che convertono azioni meccaniche in azioni elettriche ecc.

### Gian Luigi Brena

#### 4. Riflessioni romanizzate sul problema dell'informazione.

J.S. Wicken (*Evolution, Thermodynamics, and Information. Extending the Darwinian Program*, Oxford University Press, Oxford - New York 1987) sostiene che nello sviluppo dell'universo la degradazione termodinamica dell'energia e delle forme è necessaria al sorgere e al complessificarsi delle strutture fisico-chimiche e viventi: il flusso di materia e di energia è necessario per il sorgere di atomi e molecole sempre più complessi e finalmente dei sistemi viventi. Nell'espansione dell'universo è in opera dell'energia libera: parte di essa viene assorbita nella formazione di strutture più complesse (atomi, molecole e così via) e parte viene dispersa in modo tendenzialmente irrecuperabile per ulteriori sintesi.

Entropia e informazione sono grandezze correlate ma opposte: sia l'entropia che l'informazione tendono a crescere, ma in direzioni opposte. La loro somiglianza strutturale si fonda sul fatto che per codificare sia l'aumento di *strutturazione* sia l'aumento di *destrutturazione* si richiede un aumento di informazione. «Nonsense sequencies require as much information for specification as do those that carry functional meaning» (Wicken, p. 27).

Riguardo alla formula dell'entropia di Boltzmann e alla cosiddetta entropia di Shannon (che è piuttosto neghentropia) l'osservazione di Wicken sopra riportata mi sembra giusta. Tuttavia forse si possono trovare delle analogie, se noi consideriamo la situazione di partenza – non già a partire da un alfabeto, bensì a partire dalla fonte dei possibili messaggi. Non abbiamo certo l'indeterminatezza dei microstati delle molecole di gas rispetto ai valori misurabili di temperatura, pressione e volume. Ma l'ambiente dal quale "estrarre" un possibile messaggio si presenta ugualmente come dotato di una complessità che è fonte indefinita di messaggi possibili, nessuno dei quali si impone a priori e come da sé. In entrambi i casi, dal punto di vista del calcolo, la descrizione puntuale della complessità e quella del disordine possono implicare un numero simile di biforcazioni.

Il contenuto di informazione non è dunque direttamente leggibile a partire dalla quantità di informazione. È più facile stabilirlo nel caso degli organismi: «In principle the information content of an organism translates to the algorithm sufficient to produce this organism» (p. 28). Ma anche in questo caso l'ambiente favorevole è decisivo (aggiunge informazioni ugualmente essenziali, anzi selettivamente più importanti).

È importante osservare che la somiglianza delle formule dell'entropia termodinamica e di quella informatica si basa su ragioni opposte: nel caso dell'informazione la complessità riguarda elementi strutturati ma diversamente descrivibili; al contrario l'entropia vera e propria riguarda un insieme di

elementi in disordine e non strutturabili né organizzabili. Questa entropia è caratterizzata dalla relazione tra macro- e microstruttura, dove quest'ultima è irrecuperabile sia energeticamente che strutturalmente e cognitivamente. C'è un'entropia termica che riguarda la degradazione e dispersione dell'energia di un sistema; c'è un'entropia configurazionale che riguarda la distribuzione più probabile degli elementi. Dove c'è struttura l'entropia è zero. Occorre però distinguere tra un cristallo e una proteina: nel primo caso l'ordine è ripetitivo e basato su leggi fisiche; nel secondo è strutturato e basato su affinità configurazionali. Wicken considera fondamentale la distinzione tra complessità ed entropia (p. 26).

Le osservazioni precedenti sono di buon senso, anche se è la scienza che ci ha reso attenti ad esse. Il problema specifico di Shannon mi pare quello della *misurazione* dell'informazione. Qui sembrano importanti due passaggi, quello della *riduzione* dell'informazione al suo contenuto *oggettivo*. L'esempio del telegramma di C.F. von Weizsäcker dice: «Arrivo col treno delle 17». Aggiungere «Sono contento di passare il fine settimana con te» è superfluo. Sono sottintese molte altre informazioni: se si tratta di vecchi amici, di fidanzati, di parenti o di conoscenti. Anche il programma per computer «assumes implicit information by both designer and reader» (p. 27). Su queste informazioni sottintese fa affidamento la riduzione delle ridondanze.

La *trasmissione* del messaggio che richiede un altro passaggio, quello della codificazione, che lo riduce ad elementi fisici, ad esempio impulsi discontinui di corrente elettrica, come l'alfabeto Morse, oppure alla digitalizzazione binaria. In quest'ultimo caso abbiamo un altro esempio di massima vicinanza e opposizione, quella tra analogico e digitale, tra continuo e discontinuo. La vicinanza sta nel fatto che moltiplicando la densità dei punti discontinui si può avvicinarsi sempre più alla nostra percezione del continuo. La differenza sta nell'opposizione tra continuo e discontinuo. La mediazione sembra stare nel fatto che per simulare l'analogico il digitale viene sempre utilizzato mediante la *combinazione di elementi ordinati che funzionano come gruppo*.

Non sembra un'idea felice quella di considerare come entropia l'incertezza connessa al passaggio dai codici o dai simboli al messaggio da trasmettere. Mentre l'incertezza dell'entropia termodinamica è oggettiva, fondamentale e insuperabile, invece quella del processo di codificazione è provvisoria e scompare quando il messaggio è stato specificato; inoltre il messaggio è costruito in base a una probabilità di scelte, secondo i criteri di ordine di Markov, e non secondo la probabilità entropica di una distribuzione casuale. Siamo di nuovo alla differenza tra una maggiore complessità e una maggiore destrutturazione.

La prestazione di Shannon sembra essere stata quella di mostrare che è possibile ricostruire i messaggi linguistici a partire da procedimenti puramente statistici e sintattici.

Secondo Weizsäcker l'informazione può essere ricostruita solo sulla falsariga di quella linguistica come sintassi, semantica e pragmatica e come comunicazione, termini che si usano comunemente anche per parlare della genetica.

### **Renato Nobili**

Sono d'accordo su quanto ha riportato da Wicken tranne che in un paio di punti:

- 1) L'affermazione "Dove c'è struttura l'entropia è zero" è a stretto rigore errata. L'entropia zero si avrebbe a temperatura zero, che non è fisicamente raggiungibile (terzo principio della termodinamica), quando l'energia sistema è minima (che può richiedere un tempo praticamente infinito per essere raggiunto). Prendiamo ad esempio una proteina a temperatura prossima allo zero assoluto formata da una sequenza ordinata di aminoacidi. Quasi certamente quel particolare ordinamento di aminoacidi ha una struttura ben definita ma non è quello di energia minima e minima entropia. In un tempo praticamente infinito una serie di piccolissime fluttuazioni termiche di forme assai fortunate la porterà alla configurazione di minime energia e minima entropia.
- 2) Il punto in cui è scritto "Riguardo alla formula dell'entropia di Boltzmann e alla cosiddetta entropia di Shannon (che è piuttosto neghentropia)". La confusione tra entropia e informazione (o neghentropia) di Shannon è piuttosto frequente. Essa è dovuta al seguente fatto. Nella Teoria della Comunicazione Shannon definisce l'*entropia a priori* come la misura dell'*incertezza di attesa del destinatario* circa i possibili messaggi che può ricevere, possiamo chiamarla  $E_i$ ; essa è una precisa funzione delle probabilità *a priori* di questi messaggi. Un messaggio può avere un'incertezza anche dopo essere stato ricevuto se la sua lettura è



difettosa o incompleta; anche l'entropia associata a questa incertezza, che possiamo chiamare entropia *a posteriori*, che possiamo chiamare  $E_2$ , è una precisa funzione delle probabilità. La quantità d'informazione ricevuta  $I$  è data dalla differenza tra le due entropie, vale a dire  $I = E_1 - E_2$ . Se l'incertezza a posteriori è zero, cioè  $H_{\text{dopo}}=0$ , la quantità d'informazione ricevuta è pari all'incertezza a priori, cioè  $I = E_1$ . La misura dell'informazione è uguale a quella dell'incertezza, ma i significati sono diversi.

## Gian Luigi Brena

### 5. Alcuni spunti in più.

Platone e Aristotele hanno chiamato l'informazione "eidos", sostiene Weizsäcker, e cioè forma. In effetti è vero che la medesima informazione è ripetibile in materie diverse, ma anche secondo codici diversi ... questo sì. Ma non si tratta di forme sostanziali o di essenze immutabili. Bensì di forme contestualizzate, esprimibili in modelli o immagini, o anche di teorizzazioni differenti e dipendenti da equilibri contestuali che anche quando sono stabili, non sono invarianti ...

La *cibernetica* potremmo caratterizzarla come informazione autogestita. Mi chiedo se i segnali di richiamo degli uccelli siano messaggi percepiti come tali e attivanti dei comportamenti simili, oppure se siano come delle "cause" che scatenano automaticamente certi comportamenti. Ma anche in questo secondo caso tutto dipende da *come* agisce il richiamo, se per configurazione sonora o come causa "efficiente". (Difficile però da paragonare all'urto di una boccia da biliardo) ... Ad esempio l'attività selettiva dell'RNA nella sintesi delle proteine fondamentali non trasmette propriamente un messaggio (o forse sì, se si considera tale una certa conformazione) che si accoppia solo a una conformazione corrispondente.

E la vita? Informazione nella quale programma, realizzazione ed esecuzione sono inseparabili. E l'informazione linguistica? Sembra caratterizzata (al di là delle tecniche di trasmissione) dalla identità del codice che consente la riproduzione del messaggio da parte del ricevente. Con una doppia contingenza, dato che sia il procedimento di codificazione da parte del mittente sia la decodificazione da parte del destinatario hanno un aspetto di tendenziale identità nei contenuti, ma di contingenza o libertà sia nella formulazione del messaggio che nella risposta (Paul Grice).

## Renato Nobili

Riguardo la trasmissione di informazione, ad esempio un certo cinguettio di passerotto, essa ha sempre luogo grazie alla propagazione di un segnale, vale a dire attraverso un processo fisico causale e inoltre irreversibile. Ma se vediamo solo questo aspetto ci ridurremmo a cercare di spiegare il comportamento dei passerotti analizzando come si propagano gli impulsi nevosi in tutte le minute parti dei loro cervelli, ciò che non è possibile. Se cerchiamo di ridurre tutto a cause ed effetti perdiamo di vista l'informazione.



## Pier Luigi Albini (*Saggista, recensore e editore del sito web Ticonzero*)

Il saggio mi sembra straordinario. Per dirla in una impropria battuta, mi sembra davvero una "teoria del tutto", non secondo la classica ricerca del "Santo Graal" nella fisica delle particelle, ma proprio dal punto di vista di un'unificazione teorica di tutti i livelli della realtà. In più – ma occorrerebbero molte riflessioni e il saggio è ricco di spunti e rimandi - mi sembra molto fertile, perché credo che renda possibile una serie di aggiustamenti e di riconsiderazioni di fenomeni esaminati fin qui in modo disgiunto e spesso distorto, specialmente dai filosofi. Anzi, forse più che di aggiustamenti si deve parlare di un cambio radicale di prospettiva. Ci sono alcuni passaggi che richiederebbero un supplemento di riflessione, per evitare equivoci o, almeno, quelli che a me appaiono tali.

Molto d'accordo sul fatto che "le emergenze non possono trovare alcuna spiegazione nell'ambito della fisica e della logica classiche"; ma dici che sarebbe insensato "spiegare la vita sulla base delle leggi della chimica etc. etc.", ora, mi sembra che Kauffman, che tu citi in seguito e che è tra i miei autori preferiti faccia proprio questo, pur parlando di "emergenza" e "complessità" nel *suo Esplorazioni evolutive*, dedicato alla reiterazione e ricorsività dei sistemi molecolari. Poi, ad un certo punto (l'emergenza) si passa al linguaggio della biologia; ma ciò non toglie che dalla chimica (e dalla fisica) si parta. Non so, dovrei andarmi a rileggere gli appunti stesi di qualche anno fa. Peraltro,

sempre Kauffman in *Reinventare il sacro* si avvicina all'area delle domande che fai nel finale di saggio, virando su una sorta di panteismo: cosa che tu giustamente non fai.

Più nel merito, il concetto di informazione, centrale nel tuo saggio, sollecita diverse domande. Una su tutte. Esiste una "memoria" della "materia" (e, potremmo dire, dell'evoluzione)? Ho interpretato in questo modo quello che dici.

Sul rapporto osservato/osservatore a livello macro mi pare di poter dire questo: in buona sostanza, sarebbe come per il colore. A livello di manifestazione fisica si tratta di onde e di frequenze, a livello di interpretazione (come se noi fossimo, come siamo, lo strumento che fa "precipitare" una interpretazione), il ricevente fa "collassare" un fenomeno. Ci sarebbe quindi una sorta di isomorfismo tra il mondo quantistico e il mondo macro. Il che mi sembra coerente con l'intera tesi di fondo che sostieni.

### **Renato Nobili**

Penso che la cosmogenesi, dall'istante del Big Bang alla dispersione di tutto ciò che esiste nel vuoto finale dell'universo, possa definirsi come un processo termodinamico irreversibile di messa in forma della natura. Nei corsi di meccanica quantistica non si usa il termine "precipitare" per indicare che un processo di osservazione ha prodotto uno stato fisico di definite proprietà osservabili, si usa invece il termine "proiettare". Circa il termine "collassare", esso è stato introdotto nella meccanica quantistica per descrivere il comportamento della "funzione d'onda" quantistica all'istante dell'osservazione, quando ancora non si riusciva a trovare una spiegazione plausibile di questo fenomeno. Oggi sappiamo che ciò che determina questo "collasso" è in realtà una transizione di fase dello stato termodinamico dell'universo, che è concomitante con la dispersione all'infinito di radiazione infrarossa.

### **Pier Luigi Albini**

Per quanto suggestiva, non mi convince molto l'affermazione di von Bertalanffy che la fiamma della candela è il più semplice paradigma del vivente. Qui il linguaggio, così impreciso, può tradire anche se non nego che, vedendola dal punto di vista fisico esiste una continuità e, se mi passi l'espressione impropria, una successione ordinata dei fenomeni che si manifestano (con salti di "emergenza"). Oppure anche io sono vittima della stessa prospettiva dei fisici che considerano l'infinito come "un continuo discreto molto fitto"?

### **Renato Nobili**

A dire il vero non convince neanche me. Ma ai tempi di Bertalanffy si credeva che la linfa vitale della vita fosse dovuta alla produzione di entropia negativa all'interno di un sistema termodinamico per dispersione di entropia positiva all'esterno. Idea che sarà poi portata avanti, da Prigogine fino all'esaurimento della sua autorità. Circa la questione dell'infinito, la situazione non è così grave tra i fisici, ma dilania i logici matematici che si sono attestati su posizioni filosofiche furiosamente contrapposte: platonismo, finitismo, intuizionismo. Devo dire che, diversamente da quello che generalmente si crede, i matematici incontrano serie difficoltà a capire la fisica teorica.

### **Pier Luigi Albini**

La faccenda della "rottura spontanea" della simmetria, per quanto in grado di spiegare un numero enorme di fenomeni mi ha sempre generato una profonda incertezza: perché avviene una "rottura spontanea"? Non è che la definiamo così perché non siamo in grado di individuarne la causa (che potrebbe benissimo essere una componente della materia primordiale, senza chiamare sulla scena fattori esterni?). Mi riferisco ovviamente al chiarissimo esempio che fai sull'asse del cappello. Non c'è forse qui una transizione da uno stato all'altro (emergenza?) che non abbiamo ancora spiegato? Sospetto che sostieni, non così rozzamente ovviamente, una cosa del genere quando osservi che forse bisognerebbe assumere il mondo dei leptoni e dei quark come fenomenologico. E poi, chiarisci che dovremmo interrogare la materia oscura e il collegamento tra gravità e il resto delle leggi fisiche. Che è appunto una delle strade aperte. A dire la verità, personalmente sono molto più affascinato da Smolin&C. che dagli "stringaroli". Tu dai una risposta con il concetto di "sistema non in equilibrio". È così?

D'accordo, poi, sulle domande vertiginose che ti fai a proposito del Bing Bang e dintorni. Penso che questo tipo di approcci sia proprio quello che, come dicevo all'inizio, può risultare più fertile per fare dei passi in avanti. Mi piace l'idea dell'infinito come un "sotto" e un "sopra".

### **Renato Nobili**

Di solito, quando si parla di rottura spontanea di una simmetria, s'imputa la perdita della simmetria originaria dello stato del sistema alla destabilizzazione dello stato di massima energia (sommità del cappello messicano) provocata da una fluttuazione. Tuttavia di solito non si fa notare che nella fisica moderna si distinguono due tipi di fluttuazioni: quelle quantistiche e quelle termiche. Qui che sorge un problema assai serio: le fluttuazioni quantistiche sono processi di creazione e distruzione di quanti virtuali, quelle termiche sono processi di creazione e distruzione di quanti reali. Solo le seconde possono innescare processi irreversibili. Per spiegare come una fluttuazione virtuale possa innescare il processo irreversibile di creazione dell'universo, Sidney Coleman (*Phys. Rev D*, 15: 2929-2936, 1977) ha ipotizzato che la cima del cappello messicano abbia una fossetta, in modo che un quanto virtuale localizzato in questa ha la possibilità di attraversare la parete della fossetta per "effetto tunnel", così da determinare l'improvviso decadimento dello stato simmetrico iniziale (falso vuoto) in uno stato asimmetrico finale (vero vuoto). Come vedi, qui si entra nel difficile.



### **Fabrizio Giacomelli** (*Ingegnere informatico, studioso di Intelligenza Artificiale*)

L'articolo è molto interessante e dovrebbero leggersele tutti quelli che non comprendono i diversi livelli su cui è costruita la realtà (e sono tanti!). Devo rivedermi gli appunti ma una prima critica posso farla: nella parte finale del passaggio all'informazione (e poi al linguaggio), questa entra in gioco nella gestione tra i vari livelli (una cosa molto interessante e per me importante è il fatto che l'interazione cibernetica avviene in modo multi-livello). Credo però che qui sarebbe meglio non usare il concetto di informazione, anche se molti, parlando di retroazione, lo usano. Qui vale la retroazione cibernetica che è comunque un "meccanismo" di "basso" livello. Spesso, però, come detto, a questo punto si parla di "informazione", di gestione informativa del fenomeno e questo comporta due problemi: ci fa perdere di vista la "meccanicità" della retroazione e ci induce nel mondo dei desiderata terminologici, come diceva McDermott, per cui poi il passaggio, pericoloso e forzato al linguaggio è quasi automatico. Inoltre, esprimo delle perplessità sull'uso reiterato del rapporto tra osservatore e osservato, che potrebbe rischiare di incoraggiare derive soggettivistiche dei filosofi postmoderni.

### **Renato Nobili**

Introdurre il concetto d'informazione anche a proposito del circuito a retroazione meccanica del regolatore di Watt può sembrare azzardato. In realtà non lo è.

In primo luogo perché non si vede per quale ragione dovrebbero essere inclusi nel novero dei mezzi di trasporto d'informazione i segnali elettrici, ottici, acustici ecc., ma non quelli meccanici. Oltretutto, la macchina a vapore e il suo regolatore, essendo prodotti dalla mente umana, sono ricchissimi d'informazione in tutte le loro parti e producono essi stessi informazione, giacché i loro comportamenti sono utili e significativi per l'attività umana. D'altronde anche un sasso che casca sulla testa produce informazione, giacché questo evento ci comunica che era pericoloso passare lì sotto. Purtroppo è difficile sradicare la tendenza a considerare l'informazione come qualcosa che appartiene alla materia e non invece al rapporto tra i comportamenti della materia e i possibili sistemi di decodificazione e interpretazione del mondo vivente.

In secondo luogo perché ciò che distingue l'informazione dalle semplici trasformazioni di stato fisico è il suo correlato termodinamico, in particolare il fatto che ogni utilizzo d'informazione comporta un congruo aumento di entropia, che ne misura il costo termodinamico (Szilard, 1929). Questo costo termodinamico esiste anche in un circuito a retroazione meccanica perché la trasduzione di un "messaggio meccanico" in un processo di controllo non può avvenire se il circuito è completamente privo di attriti. Infatti, gli attriti, che comportano sempre un aumento di entropia, sono necessari per evitare che il processo di controllo si destabilizzi entrando in un regime oscillatorio inarrestabile.

Debbo anche dire che l'uso della nozione d'informazione nei processi di controllo automatico (regolatore di Watt compreso) e dei relativi problemi di stabilizzazione, è già presente in *La Cibernetica* di

Norbert Wiener (Bompiani, 1956). Non credo che la nozione d'informazione, usata dallo stesso padre della cibernetica anche nella descrizione dei processi di controllo di basso livello, debba denunciarsi come fallacia dei "desiderata terminologici".

Per quanto riguarda l'uso che faccio del rapporto osservato-osservatore (intendo quello che s'insegna nei corsi di meccanica quantistica) devo dire che l'alternativa a questo "dualismo" è il dualismo classico materia-spirito che ha prodotto per tre secoli la radicalizzazione dell'opposizione tra il realismo materialista e l'idealismo spiritualista. Dualismo non sradicabile, data la cogenza del *cogito ergo sum* cartesiano. Se ne accorse bene Hegel, che cercò di superare il dualismo razionalista di Leibniz col dualismo dialettico oggettività-soggettività, intendendo questi termini come prodotti bilateri di un'attività naturale unitaria. Si potrebbe dire che Hegel avrebbe anticipato il dualismo quantistico osservato-osservatore se non avesse inteso la dialettica come un processo deterministico (lo sviluppo della contraddizione originaria) invece che come uno probabilistico; vale a dire secondo la visione del suo contemporaneo Lamarck invece di quella del suo ... postero Darwin (scusa l'anacronismo).

---