



DIPARTIMENTO DI MATEMATICA E FISICA  
"Ennio De Giorgi"

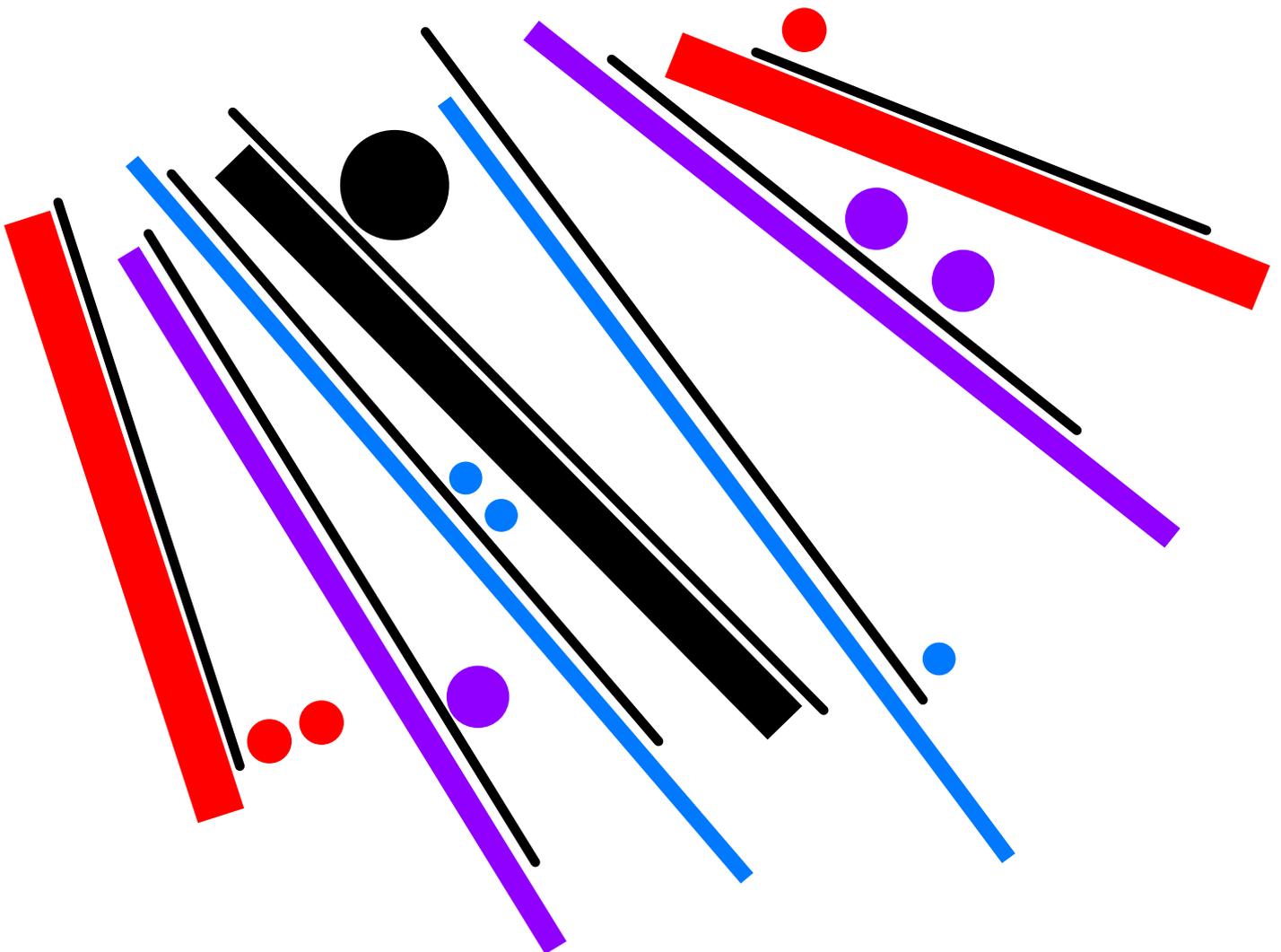


UNIVERSITÀ  
DEL SALENTO



# Ithaca

## Educational



Numero II Anno 2020

---

## **Ithaca: Viaggio nella Scienza**

---

Una pubblicazione del Dipartimento di Matematica e Fisica “Ennio De Giorgi” dell’Università del Salento.

Registrazione presso il Tribunale di Lecce n. 6 del 30 Aprile 2013.  
e-ISSN: 2282-8079

Direttore Responsabile  
**Luigi Spedicato.**

Ideatore  
**Giampaolo Co’.**

Comitato di Redazione  
**Adriano Barra,**  
**Rocco Chirivì,**  
**Paolo Ciafaloni,**  
**Maria Luisa De Giorgi,**  
**Vincenzo Flaminio,**  
**Luigi Martina,**  
**Giuseppe Maruccio,**  
**Marco Mazzeo,**  
**Francesco Paparella,**  
**Carlo Sempi.**

Segreteria di Redazione  
**Daniela Dell’Anna.**

© 2013-2023 Dipartimento di Matematica e Fisica “*Ennio de Giorgi*”.

© 2023 per i singoli articoli dei rispettivi autori.

Il materiale di questa pubblicazione può essere riprodotto nei limiti stabiliti dalla licenza  
“*Creative Commons Attribuzione – Condividi allo stesso modo 3.0 Italia*” (CC BY-SA 3.0 IT).

Per il testo della licenza: <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/it/deed.it>

**Ithaca: Viaggio nella Scienza**

è disponibile sul sito:

<http://ithaca.unisalento.it/>

Scriveteci all’indirizzo:

[ithaca@unisalento.it](mailto:ithaca@unisalento.it)

---

# Ithaca

## Viaggio nella Scienza

---

Educational-II 2020

- 3** In questo numero
  
- 5** Riduzionismo ed olismo nelle scienze  
Ferdinando Boero, Giampaolo Co'
  
- 15** Pollicino e la Bella Addormentata  
Luigi Martina
  
- 35** Riduzionismo metodologico vs riduzionismo ontologico  
Claudio Garola
  
- 41** La complessità e la sua entrata in scena da pensiero laterale  
Mario Castellana
  
- 51** Il mondo fatto a scale. Spazio geografico e complessità  
Stefano De Rubertis
  
- 59** La società come sistema: dalla cibernetica alla teoria dei sistemi sociali  
Gianpasquale Preite

## **67** **Discussione**

**Ferdinando Boero, Giampaolo Co', Claudio Garola, Marco Mazzeo**

**La lezione mancata**

## **79** **Diverse concezioni dell'entropia**

**Gaia Sacquegna**

---

# In questo numero

---

L'emergenza pandemica legata alla SARS COVID-19 ha fatto cancellare molte iniziative culturali programmate nell'anno 2020. Tra queste, anche il ciclo di seminari sui Sistemi complessi rivolto agli studenti della Scuola Superiore ISUFI dell'Università del Salento.

Abbiamo invitato i colleghi che avevano programmato di partecipare a questa iniziativa a mettere per iscritto il loro intervento. Questo numero di *Ithaca Educational* raccoglie i contributi che ci sono pervenuti.

Per rendicontare nel modo più fedele possibile quello che sarebbe potuto accadere, abbiamo anche inserito una sezione in cui appare una discussione su alcuni temi presentati, proprio come un dibattito dopo il seminario.

Il pubblico a cui si rivolgono i contributi di questo numero di *Ithaca Educational* è quello degli studenti della scuola ISUFI, cioè studenti dei primi anni di università.

Il numero inizia con un contributo a quattro mani, anche se ben separato in due parti. Il ciclo di seminari prevedeva un incontro/scontro tra Ferdinando Boero e Giampaolo Co' sulle definizioni e concezioni di complessità nell'ambito della Fisica e della Biologia, più specificamente la Zoologia. Ne risulta un confronto tra metodologie scientifiche definite riduzionistiche e olistiche ed una discussione sulla loro validità. Questo dibattito prosegue nel contributo detto Discussione e coinvolge altre persone.

Segue un contributo di Luigi Martina che fa una panoramica della situazione attuale della Fisica Teorica nella prospettiva dello studio di sistemi complessi.

Il contributo di Claudio Garola è indirizzato a chiarire differenze e limiti del riduzionismo

nell'ambito della Fisica, e fornisce un'altra visione della definizione di complessità.

L'articolo di Mario Castellana discute di come il concetto di complessità si sia affermato nell'ambito degli studi di epistemologia e filosofia della scienza.

La complessità nell'ambito della Geografia economica è discussa e presentata da Stefano De Rubertis nel suo articolo.

Gianpasquale Preite discute di complessità nell'ambito delle scienze sociali.

La sezione Discussione è una collezione di interventi di varie persone riguardanti alcuni dei temi presentati nei precedenti articoli.

Il numero si conclude con una Lezione Mancata scritta da Gaia Sacquegna in cui vengono presentate varie definizioni della quantità detta entropia in vari contesti scientifici.

*Ithaca Educational* è un esperimento editoriale che affianca le pubblicazioni ordinarie di *Ithaca* che proseguono indipendentemente. Speriamo che questo esperimento sia di gradimento ai nostri lettori.

Buona lettura,  
il Comitato di Redazione



---

# Riduzionismo ed olismo nelle scienze

**Ferdinando Boero**

*Dipartimento di Biologia, Università di Napoli "Federico II",  
Stazione Zoologica Anton Dohrn, Napoli*

**Giampaolo Co'**

*Dipartimento di Matematica e Fisica "Ennio De Giorgi" - Università del Salento,  
e Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sez. di Lecce, Lecce*

---

**Giampaolo Co'**

## Elogio, ma non troppo, del riduzionismo in Fisica

La discussione su cosa sia la Scienza, quali siano i suoi scopi e le appropriate metodologie per conseguirli, coinvolge studiosi di tutte le discipline, ed è aperta. Per questo motivo, io partirò da una definizione dei compiti della Scienza sicuramente parziale, cioè di parte, la mia, ma questo mi permette di argomentare da una dichiarata ipotesi di lavoro. Considero scopo della Scienza quello di comprendere il comportamento del sistema studiato. A questo punto devo precisare cosa intendo per comprensione. Ritengo che si comprenda un sistema se si è capaci di descriverne il comportamento passato e prevederne il comportamento futuro. Queste due fasi, la descrizione del passato e la previsione del futuro, sono essenziali, a mio avviso, per definire lo scopo dello studio scientifico.

Penso che, nelle scienze naturali, le discipline che ricadono sotto l'etichetta di Fisica sono quelle che hanno ottenuto il maggior successo dal punto di vista degli obiettivi che ho indicato sopra. L'enorme sviluppo tecnologico sviluppatosi con inaspettata velocità nel secolo scorso, e che ha portato a profondi, ed inattesi, cambiamenti sociali, ne è una prova evidente. Un esempio molto recente di sconvolgimento sociale provo-

cato da uno sviluppo tecnologico è quello legato al *World Wide Web*, tecnologia nata nel 1991 al CERN di Ginevra allo scopo di coordinare esperimenti gestiti da un enorme numero di persone dislocate su tutta la superficie del globo.

Il successo della Fisica nella comprensione dei fenomeni che studia è strettamente legato ad un processo di analisi teorica che chiamerò **Riduzionismo**. L'idea riduzionista è quella di analizzare un fenomeno classificandone i vari aspetti che lo caratterizzano in termini gerarchici, e quindi considerare gli aspetti più importanti e trascurare quelli meno importanti. Questo processo implica, per definizione, che lo studio di un sistema richiede l'identificazione di varie parti che lo compongono. Il secondo passo è quello della classificazione gerarchica delle sue parti e, per ultimo, lo studio delle interazioni reciproche.

Mi piace fare una analogia tra il processo di costruzione di una teoria fisica e la cartografia. Evidentemente, la cartografia è una rappresentazione ideale della realtà geografica. Anche in questo caso si rinuncia ad una descrizione iperfedele del paesaggio, a favore di una costruzione che considera solo le caratteristiche più importanti per la sua comprensione. Ciò che ci interessa è concepire lo spazio del paesaggio in modo da poter capire il passato, che strada è stata percorsa, o prevederne il futuro, che strada si percorrerà.

La storia della mappa della metropolitana di Londra [1] è esemplare come analogia con la Fi-

sica. Per informare gli utenti sui percorsi della metropolitana, prima del 1931, le mappe descrivevano la rete della metropolitana di Londra con una concezione da cartina geografica. I percorsi del treno sotterraneo erano disegnati come effettivamente dislocati nel territorio. Nel 1931, un impiegato della *London Underground* ebbe l'idea di descrivere la rete metropolitana non in termini geografici, ma in termini di connessioni tra le varie stazioni e le loro intersezioni. In questa cartina esistevano solo linee verticali, orizzontali, o a 45°. L'enorme semplificazione visiva della cartina, che produce una rappresentazione semplificata ed astratta della rete della metropolitana, ha avuto un successo enorme. Oggi questo schema teorico e rappresentativo è utilizzato per descrivere quasi tutte le reti di trasporto metropolitano del mondo.

Anche in Fisica si segue una procedura analoga. Si cerca di identificare le quantità essenziali che permettono di descrivere il fenomeno nella sua essenzialità, trascurandone, cioè, i dettagli. L'identificazione delle entità teoriche utili per la descrizione dei fenomeni, è un processo lungo, tortuoso e non privo di piste infruttuose. Un esempio eclatante è quello del concetto di calore. Il più semplice dei fenomeni termici, osservato da tutti, consiste nel fatto che due corpi con differenti temperature, messi in contatto, raggiungono una condizione di equilibrio con una temperatura intermedia tra quelle iniziali. In parole semplici, il corpo più caldo si raffredda e scalda quello più freddo. L'idea iniziale è che il calore fosse un fluido invisibile che passava da un corpo all'altro. Questa concezione teorica si è dimostrata incapace di spiegare il riscaldamento dei corpi per attrito, e quindi inadatta a descrivere in maniera sintetica ed efficace i fenomeni termodinamici. Molto più utile la formulazione di quella entità teorica che chiamiamo energia. Questa si conserva sempre in ogni fenomeno a noi noto. Calore e lavoro insieme operano scambiandosi i ruoli ma conservando l'energia del sistema.

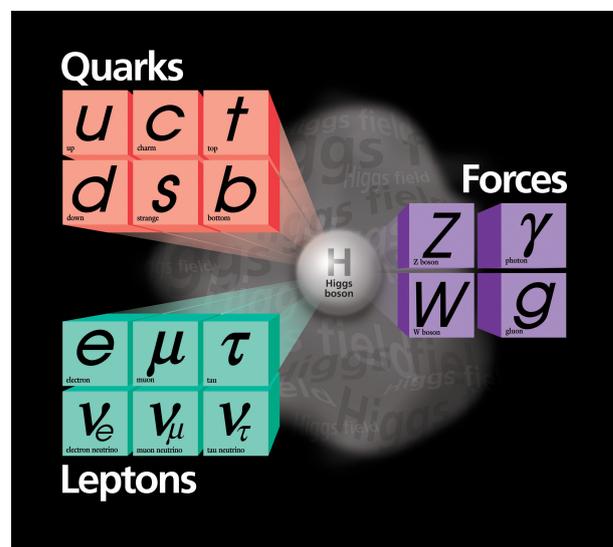
Il concetto di energia, e la sua conservazione nei processi fisici, è uno strumento potentissimo per identificare ciò che può avvenire. Nella mappa di Londra sono identificati quegli elementi importanti per potersi muovere, la posizione relativa delle stazioni, le connessioni tra loro: è

quindi chiaro quali sono le stazioni da superare per arrivare a quella desiderata. La corretta sequenza delle stazioni indica gli unici eventi possibili: una informazione analoga a quella indicata in Fisica dalla conservazione dell'energia.

Il Riduzionismo è essenziale nel processo di comprensione della fenomenologia che ci circonda. La fisica ha utilizzato fortemente il Riduzionismo, costruendo entità teoriche che permettono enormi semplificazioni delle descrizioni dei fenomeni che osserviamo. Ho fatto l'esempio dell'energia, ma sono state costruite altre entità teoriche che si conservano nei processi, permettendoci di selezionare quelli che possono avvenire.

Le entità teoriche che abbiamo prodotto non sono soltanto utili per identificare i fenomeni possibili. Siamo riusciti ad individuare delle relazioni tra loro. Di più, siamo anche riusciti ad esprimere queste relazioni in termini matematici, e così facendo abbiamo avuto l'opportunità di fare descrizioni, e previsioni, quantitative dei fenomeni che osserviamo.

L'insieme di queste relazioni, organizzato in maniera coerente, senza contraddizioni, e utilizzando il minor numero possibile di ipotesi di lavoro, costituisce quello che normalmente definiamo teoria.



**Figura 1:** Rappresentazione grafica delle entità fondamentali della materia secondo il Modello Standard.

Probabilmente il più recente, ed eclatante, successo della teoria riguarda la Fisica delle Alte Energie dove, per completezza e coerenza, nel

1964 è stata prevista da Peter Higgs, e indipendentemente da François Englert e Robert Brout, l'esistenza di una particella detta bosone di Higgs che è stata identificata nel 2012 al CERN di Ginevra dagli esperimenti ATLAS e CMS.

L'identificazione di questa particella completa il quadro teorico che oggi, in Fisica, viene identificato come Modello Standard. L'idea è che tutti i fenomeni della natura possano essere ridotti all'interazione tra 6 tipi di leptoni e 6 tipi quark che interagiscono tra loro con 4 interazioni fondamentali: gravitazionale, elettromagnetica, nucleare forte e nucleare debole. Ognuna di queste interazioni è mediata dallo scambio di bosoni: i fotoni, per quella elettromagnetica, i gluoni per la nucleare forte, i bosoni  $W^\pm$  e  $Z^0$  per la nucleare debole, e del gravitone per quella gravitazionale.

L'identificazione del bosone di Higgs è forse l'ultimo anello di una catena di successi dell'approccio riduzionistico della Fisica. È umanamente comprensibile l'orgoglio per il successo di una impresa andata a buon fine, e questo può portare ad esaltare i metodi utilizzati senza considerarne i limiti di applicabilità, e a considerare la Fisica con un senso di superiorità intellettuale rispetto ad altre discipline scientifiche.

Un esempio di questo atteggiamento si trova negli scritti di Pierre Simon de Laplace [2]:

"Noi dobbiamo considerare lo stato presente dell'universo come l'effetto di un dato stato anteriore e come le causa di ciò che sarà in avvenire. Un'intelligenza che, in un dato istante, conoscesse tutte le forze che animano la natura e la rispettiva posizione degli esseri che la costituiscono, e che fosse abbastanza vasta per sottoporre tutti i dati alla sua analisi, abbraccerebbe in un'unica formula i movimenti dei più grandi corpi dell'universo come quello dell'atomo più sottile; per una tale intelligenza tutto sarebbe chiaro e certo e così l'avvenire come il passato le sarebbero presenti."

Ma la lezione di umiltà inflittaci dalla fisica moderna non ha prodotto insegnamenti universali. Ad esempio, Antonino Zichichi, nel 1999, afferma che [3]:

"L'evoluzione biologica non è una teoria scientifica in quanto mancante di un'equazione matematica che la spieghi."

Comprendere la validità ed i limiti dei metodi utilizzati in Fisica è essenziale per conoscere l'affidabilità dei risultati ottenuti, e per valutare la possibilità di estendere con successo queste metodologie allo studio di fenomeni differenti da quelli studiati dalla Fisica.

Il grande successo del Modello Standard è legato ad una procedura riduzionista che mi piace definire **Riduzionismo descrescente**. Con questo intendo lo studio di un sistema composto per comprendere da cosa è composto. In Fisica è chiaro il protocollo che permette di identificare se un sistema è composto da altre particelle. Se si sottopone questo sistema a stimoli esterni e questo si eccita, emettendo fotoni, o si spezza, è evidentemente composto da parti più piccole. Da questo punto di vista, al momento, le entità che ho menzionato come fondamentali nel Modello Standard, leptoni quark e bosoni vettori, non mostrano alcuna evidenza di struttura interna.

Un'allegoria che permette di illustrare il processo di studio basato sul Riduzionismo descrescente è quella del bambino che smonta il giocattolo per vedere cose c'è dentro. Ma una volta che tutte le parti del giocattolo sono state identificate, sappiamo rimetterle a posto in modo che il giocattolo continui a funzionare? Come mi ha provocato uno zoologo olista: "Ti dò tutte le parti che compongono una lucertola. Sai ricomporla?" [4]. Partire dalle parti per costruire il sistema è quello che chiamo **Riduzionismo crescente**.

La tradizionale obiezione fatta per giustificare le difficoltà legate al progetto di Riduzionismo crescente è che queste difficoltà sono generate da un problema tecnico, non di principio. Trovare una soluzione delle equazioni da risolvere è molto difficile quando il numero di elementi da considerare è molto grande. Se avessimo a disposizione tempi di calcolo illimitati e computer con memorie sufficienti, la soluzione delle equazioni prodotte dalle nostre teorie ci permetterebbe una descrizione completa dei sistemi composti. Questa ipotesi di lavoro è in realtà un atto di fede, confortato dal fatto che tutte le volte che si ha avuto la possibilità di comprovarla, nei limiti

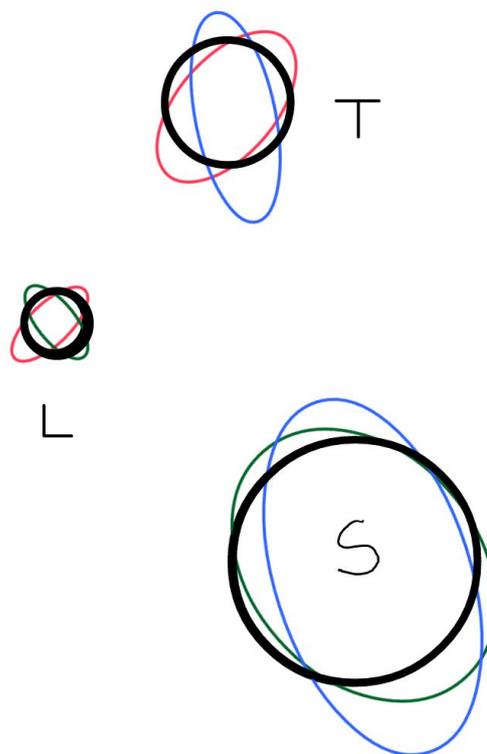
delle incertezze sperimentali e di quelle legate al calcolo numerico, è stata verificata.

Dal punto di vista operativo il *modus operandi* del Riduzionismo crescente è estremamente pragmatico e riproduce il metodo riduzionista come in un insieme di scatole cinesi, a questo punto sempre più grandi. Per studiare la stabilità di un ponte non si parte dall'interazione tra le molecole che compongono il cemento, l'acqua, il tondino di ferro. In maniera analoga, quando si studiano sistemi compositi, o a molti-corpi come piace definirli a noi fisici, il punto di partenza consiste nell'identificazione delle parti che compongono il sistema e delle loro interazioni. Ad esempio, per descrivere un protone di dovrebbero risolvere le equazioni che descrivono l'interazione nucleare forte, la teoria si chiama **Cromodinamica quantistica** o, più brevemente QCD. Il numero di quark e antiquark previsto dalla teoria è addirittura infinito, e, di fatto, nonostante gli sforzi numerici fatti, non si riescono a risolvere queste equazioni. Per una descrizione del protone si passa a considerare delle componenti del protone dette **quark costituenti** che sono solo tre e che rappresentano le particelle che generano le caratteristiche macroscopiche del protone. A questo punto potremmo considerare i quark costituenti per descrivere i protoni e i neutroni che formano il nucleo. Anche in questo caso, la soluzione delle equazioni è difficile, quindi, per la descrizione del nucleo, si passa a considerare protoni e neutroni come privi di struttura interna. Ed il processo continua in *crecendo*. Nella descrizione degli atomi il nucleo è trattato come un'entità unica, e si considera la sua interazione con gli elettroni che compongono l'atomo. Per la descrizione delle molecole, si considerano gli atomi privi di struttura interna. Per quella dei liquidi e dei gas, sono le molecole le particelle puntiformi da considerare. A questo punto, risulta conveniente passare da una descrizione discreta della materia ad una continua, nella quale il fluido è considerato nel suo insieme con delle proprietà macroscopiche come volume, pressione, temperatura.

È evidente che la scelta dei gradi di libertà è guidata da un principio riduzionista: cogliere l'essenziale e trascurare il dettaglio. L'essenziale ed il dettaglio sono da definire per ogni sistema studiato e nelle modalità di come questo sistema

è studiato. Sappiamo che le parti che compongono il sistema sono a loro volta composite. La nostra descrizione del sistema composito perde di validità quando la struttura interna delle parti produce effetti sul sistema composito.

La scelta delle componenti del sistema implica anche la definizione della loro interazione. Il sistema può essere descritto semplicemente considerando le componenti che interagiscono tra loro a due a due? Questo problema è definito in letteratura come quello della *pairwise additivity* [5], ed è ampiamente discusso nella Fisica dei sistemi a molti-corpi microscopici.



**Figura 2:** Schema di interazione a tre corpi per il sistema Terra-Sole-Luna. I cerchi neri rappresentano i tre corpi celesti se non ci fosse deformazione. Ma l'interazione tra Terra e Luna le deforma, elissi rosse, ed è in questa configurazione che adesso interagiscono con il sole. Le elissi verdi e blue indicano le deformazioni prodotte dall'interazione con il Sole.

Per semplificare la discussione, uso un esempio legato all'interazione gravitazionale. Se il nostro obiettivo è lo studio del sistema Terra, Sole e Luna possiamo in prima approssimazione considerare questi tre corpi come puntiformi, ognuno dotato dalla sua massa. È noto che il campo gravi-

tazionale esterno ad una distribuzione di massa a simmetria sferica è identico a quello che si ottiene se tutta la massa fosse concentrata al centro della sfera. Quindi il sistema Terra-Sole-Luna può essere descritto considerando l'interazione dei tre corpi a due a due come se fossero puntiformi, privi di struttura interna: Terra-Sole, Terra-Luna e Sole-Luna. Se i tre corpi celesti fossero delle sfere rigide questa sarebbe la fine della storia. Invece, i tre corpi sono deformabili. Quando Terra e Luna interagiscono la loro forma non è più sferica, ma a causa dell'interazione reciproca si trasformano in ellissodi i cui assi di simmetria sono orientati sulla linea che unisce i loro centri. In questo assetto deformato interagiscono con il sole, che a sua volta viene deformato. Questa situazione non può essere descritta come somma di interazioni tra due corpi, la *pairwise additivity*, ma è un termine nuovo dell'interazione; una interazione a tre corpi, nel gergo della Fisica dei multi-corpi.

Forze di questo tipo, a tre, quattro ...  $n$ -corpi, sono presenti in tutti i sistemi composti da particelle che hanno struttura interna. La procedura riduzionista analizza gerarchicamente il ruolo di queste forze a multi-corpi, nella speranza che siano molto meno importanti rispetto a quelle a due corpi. In questo modo, si possono risolvere le equazioni che descrivono il sistema considerando solo le interazioni a due corpi, e fare, quindi, piccole correzioni per considerare le altre interazioni.

L'approccio riduzionista è essenziale nel nostro modo di analizzare i fenomeni naturali che ci circondano. Anche la scelta delle parole che usiamo per comunicare è adeguata ad un principio riduzionista. L'affermazione "È arrivato in auto", trascura tutti i dettagli relativi alla composizione dell'automobile, alla velocità d'arrivo, a come e chi guidava l'auto, perché la sola informazione di interesse nel contesto è quella che il soggetto ha viaggiato con un automezzo. In maniera analoga, anche quando affrontiamo lo studio di un sistema con un approccio scientifico, adottiamo un atteggiamento riduzionista.

In Fisica l'approccio riduzionista ha prodotto dei successi enormi, e per questo è spesso considerato l'unico modo di affrontare la descrizione di sistemi composti, senza fare alcuna analisi sui limiti di questa metodologia. Le difficoltà nella

descrizione di sistemi composti sono attribuite a problemi tecnici di soluzione delle equazioni che comunque hanno una loro validità descrittiva, a prescindere.

La situazione è in realtà molto più complicata. Per poter descrivere un sistema composto, è necessario ipotizzare che le parti che lo compongono siano prive di struttura interna. Questa ipotesi funziona fino a quando l'ambito dello studio del sistema è limitato a situazioni in cui le componenti del sistema non vengono modificate. Nel momento in cui l'interazione tra le parti ne modifica la struttura interna rispetto alla situazione in cui le parti sono isolate, il metodo riduzionista perde significato e valore. Un sistema che non può essere diviso in parti che mantengono una loro identità quando interagiscono è un sistema non trattabile in termini riduzionistici, e, in questo senso, lo definirei **sistema complesso**.

## Elogio, ma non troppo, del'olismo nelle scienze della vita

Ci sono tante definizioni di scienza. Trovo particolarmente significativa quella riportata sopra da Giampaolo Co', nella prima parte di questo contributo:

"Considero scopo della Scienza quello di comprendere il comportamento del sistema studiato. A questo punto devo precisare cosa intendo per comprensione. Ritengo che si comprenda un sistema se si è capaci di descriverne il comportamento passato e prevederne il comportamento futuro. Queste due fasi, la descrizione del passato e la previsione del futuro, sono essenziali, a mio avviso, per definire lo scopo dello studio scientifico."

Io ho una definizione differente:

la scienza ha due scopi principali, il primo è di identificare l'ignoranza e il secondo è di ridurla.

Facendo questo, gli scienziati si scontrano con l'ignoranza irriducibile, cioè con cose che non possiamo sapere, per quanto proviamo. Tipo: prevedere il futuro, almeno in certi ambiti. La fisica pretende di prevedere il futuro, e lo fa con equazioni. Ovviamente lo fa con sistemi che Darwin chiama semplici.

Prendiamo un sistema complesso: la storia. Possiamo pensare di avere un sistema di equazioni che ci permetta, letto il giornale di oggi, di scrivere il giornale di domani? Possiamo prevedere il corso futuro della storia? Certo, gli economisti ci provano con i loro modelli. Ma abbiamo visto con quale accuratezza. La storia è fatta di contingenze, altrimenti... non ci sarebbe storia. Basterebbe un bel sistema di equazioni, un computer, e il futuro verrebbe fuori da lì. Ma se riuscissimo ad avere quel computer, quelle equazioni, probabilmente ci comporteremmo in un certo modo, e influenzeremmo il sistema, inficiando le nostre previsioni. Certo, potremmo prevedere l'esito della nostra influenza ma, tenendone conto, eserciteremmo un'altra influenza

e l'indeterminazione procederebbe comunque all'infinito.

I sistemi in cui, conosciuto il passato, si prevede il futuro sono governati da vincoli. Sono sistemi semplici. Per quanto possano essere complicate le loro equazioni, sono sempre semplici. Appena entrano in gioco le contingenze, i vincoli, che pure restano, perdono la loro forza e le contingenze spostano il corso degli eventi. Lo hanno dimostrato anche i fisici, con la teoria del caos. I sistemi caotici sono deterministici ma sono intrinsecamente imprevedibili, nel medio e lungo termine. I sistemi di Lorenz sono relativi alla meteorologia, e ci spiegano perché i meteorologi non possono prevedere il tempo con precisione, nel medio e lungo termine.

Sempre fisica è: ora proviamo a metterci la vita, e noi. Il numero di variabili da considerare diventa talmente grande che solo un ipotetico dio potrebbe pensare di prevedere il corso degli eventi. Chi produce equazioni, di solito, non è in grado di riconoscere l'importanza delle variabili che dovrebbe mettere nel modello, tipo: un virus presente nei pangolini della Malesia, o nei pipistrelli frugivori.

La fisica si confronta con sistemi semplici, i biologi studiano quanto di più complesso esista nell'universo conosciuto. Cosa è molle e cosa è duro?

La biologia è una scienza storica, proprio come la storia umana. L'evoluzione è la storia della vita. Solo chi ha scarsa dimestichezza con l'epistemologia può pretendere di chiedere un'equazione a chi studia fenomeni di questo tipo. E, visto che non c'è l'equazione, solo chi ignora i rudimenti dell'epistemologia può dire che allora chi li studia non pratici la scienza.

Cosa fanno le scienze storiche? Prima di tutto descrivono un *pattern*, uno schema di eventi. È per questo che sono descrittive: ricostruiscono gli eventi del passato e descrivono gli eventi odierni. Poi, una volta identificati i *pattern*, cercano di comprendere i processi che li hanno determinati, e di interpretarli: *pattern* e *process*. La conoscenza di *pattern* e processi ci permette di disegnare scenari futuri, usando un po' di saggezza, ma gli storici non si sognano neppure di descrivere il futuro in termini matematici. Il motivo è semplicissimo: i fenomeni complessi sono spesso determinati da cause molteplici che in-



**Figura 3:** Connessioni trofiche nella colonna d'acqua. Al centro la via microbica. Lato superiore destro: proliferazione microbica. Lato inferiore destro: la via microbi-crostacei-pesci-umani. Lato inferiore sinistro: La via microbi-plancton gelatinoso erbivoro. Lato superiore sinistro: la via microbi-crostacei-pesci-plancton gelatinoso carnivoro. Il Carbonio si deposita e viene sequestrato sul fondo. Concetti di F. Boero, Arte: Alberto Gennari. da [6].

teragiscono tra loro. Se le analizziamo una ad una, separatamente, non possiamo capire. Col riduzionismo, in effetti, le analizziamo una ad una, ma poi dobbiamo passare al passo successivo, e le dobbiamo mettere assieme. Cercando di capire quali possono essere i loro effetti sul sistema che stiamo studiando. Ma solo a posteriori possiamo capire l'importanza di un virus che vive nei pipistrelli, o dell'11 settembre. Tanto per citare due contingenze recenti che hanno cambiato il corso della storia e che nessuno aveva predetto, in termini matematici.

È già difficile scoprire tutte le microcause e i microeffetti che, assieme, determinano i processi che portano alla realtà osservata: il *pattern*. Certo, possiamo pensare a piani inclinati senza attrito, a liquidi senza turbolenze, a gas perfetti. Ma la

vita non è così o, almeno, lo è per un po'. Poi arriva l'attrito, la turbolenza.

Che possiamo dire, allora, del futuro? Possiamo dire che se la situazione è A, allora potrebbe diventare B; se questo non succede c'è qualcosa di strano. Ma, prima o poi, qualcosa di strano succede. Potrebbe essere l'11 settembre, o il coronavirus, o il crollo dei mutui subprime, o... l'elenco delle contingenze è infinito. Qualcuno aveva predetto la pandemia da coronavirus. Un momento... qualcuno, avendo visto altre pandemie del passato, aveva predetto che, prima o poi, ne sarebbe arrivata una più forte delle precedenti. Ma non aveva predetto, con una formula, quando questo sarebbe avvenuto, e quale sarebbe stato il virus.

Io posso prevedere che tutti i lettori di questo

pezzo moriranno. Ma non posso dire quando morirà ogni singolo lettore. Anche se prevedo che una buona parte dei lettori farà gli scongiuri dopo aver letto la mia predizione. Non ho detto tutti, ho detto una buona parte. Magari qualcuno, come me, pensa che essere superstiziosi porti male, e quindi non avrà fatto gli scongiuri. Posso fare predizioni probabilistiche. Ma non uso equazioni per farle. Uso la conoscenza del sistema, una conoscenza che va oltre il mero calcolo matematico.

Una volta compreso il fenomeno, la matematica ci aiuta a produrre modelli che, in modo probabilistico, ci permettono di prevedere l'esito di nostri comportamenti, tipo: fare la quarantena oppure no, quando riprendere le attività. Ma bisogna conoscere molto bene le variabili, e le loro interazioni, prima di produrre formule.

I sistemi complessi sono come la lingua. Si fondano su una realtà semplice, come l'alfabeto. Poche lettere. Poi le assembliamo e facciamo parole. Ecco il dizionario, con tutte le parole di una lingua. Poi prendiamo la letteratura di quella lingua. È stata fatta assemblando le parole del dizionario e le lettere dell'alfabeto. Possiamo leggere quelle opere (il *pattern*) e possiamo studiare i processi che hanno portato ogni autore a produrre le sue opere. Possiamo, fatto questo, scrivere la letteratura che sarà prodotta dagli autori del futuro? Dove ci manderebbe uno storico se gli chiedessimo di prevedere il futuro dei sistemi che studia? Soprattutto con formule matematiche? Beh, risponderebbe: non sono mica un economista!

La materia vivente è costruita attraverso un alfabeto fatto di adenina, guanina, citosina e timina. I geni sono fatti da triplette di queste basi azotate (il dizionario). I loro assemblaggi portano alla codifica di strutture che noi chiamiamo organismi, ognuno appartenente a una specie. Basta una piccola modificazione nelle sequenze di geni e abbiamo specie differenti. È come con la punteggiatura, basta cambiare un poco e le sequenze di parole assumono significati completamente differenti:

I fisici dicono: i biologi sono scienziati di serie B.  
I biologi dicono: i fisici sono scienziati di serie B.

Le specie sono come opere letterarie. Possiamo pensare, con sistemi di equazioni, di prevedere

come saranno le specie del futuro? Non è scienza. Ha ragione Zichichi. E non è quello che vuol fare la biologia evuzionistica. Però è quello che vuol fare l'ingegneria genetica. Modifichiamo i geni, una volta scoperto cosa codificano, per ottenere organismi che rispondano meglio alle nostre necessità. Ma i geni interagiscono tra loro, e con l'ambiente. Dopo un po' le cose non vanno come pensavamo. Il futuro che avevamo previsto non arriva.

Ora, va benissimo studiare le espressioni semplici della natura. È essenziale conoscerle. Non possiamo capire la letteratura se non conosciamo l'alfabeto. E abbiamo anche bisogno del dizionario per capire la letteratura. Ma che i detentori dell'alfabeto o del dizionario pensino di essere i detentori della conoscenza intima della letteratura ...è troppo. Il bello è che lo fanno (vedi Zichichi) e arrivano a etichettare come dure le proprie scienze predittive e come molli le scienze che, con un malcelato disprezzo, chiamano descrittive.

Prendiamo la realtà conosciuta. Poniamola su una sorta di cursore. Ad un estremo di quel cursore c'è la fisica delle particelle: la scomposizione della materia nelle sue componenti elementari. Ora andiamo all'altro estremo del cursore, e arriviamo all'astrofisica, con l'universo. Tra questi due estremi c'è tutto il resto. Nell'universo conosciuto c'è un posticino piccolo piccolo in cui una parte infinitesima della materia che compone tutto l'universo ha assunto una forma molto particolare: è viva. Non esiste altro posto, nell'universo conosciuto, in cui la materia abbia quelle proprietà. Certo, è fatta di particelle elementari, e si trova nell'universo. Ma ha qualcosa di diverso dal resto della materia. Bene, la biologia studia quella singolarità. Non può esprimere verità universali, esprimibili con equazioni che prevedono il futuro.

Può solo prendere atto di questa condizione della materia e cercare di descriverla, descrivendo anche i processi che la governano, e la storia delle sue condizioni, visto che cambiano continuamente. Anche i fisici hanno trovato cose analoghe, hanno espresso principi di indeterminazione sulla posizione e la velocità delle particelle elementari. Ma come sono semplici questi problemi, se confrontati con le innumerevoli azioni

e reazioni che determinano i rapporti degli otto milioni di specie che, oggi, abitano il pianeta formando gli ecosistemi che permettono la nostra vita, e la storia che, in milioni di anni, ha portato alla situazione attuale! La mente vacilla.

Meglio tornare alle particelle e all'universo. E a rassicuranti equazioni. Magari senza attrito e senza turbolenze. La fisica equazionale è elegantissima, come una danza. La biologia è uno scontro fisico in un vicolo buio (si chiama lotta per l'esistenza). A volte può persino sembrare una danza, ma è un gioco dove si vive o si muore. C'è l'attrito, ci sono le turbolenze, niente è perfetto.

Se prendiamo un ballerino e lo buttiamo in una rissa in un vicolo buio, può darsi che riesca, con qualche passo di danza, a mettere in difficoltà qualche avversario, ma lo farà seguendo regole che non sono rispettate da tutti gli altri, e si troverà a mal partito, nel medio e lungo termine, a meno che non si metta a giocare con le loro regole, che non sono le sue. E probabilmente prenderà un sacco di botte, visto che non ha grande esperienza a seguire quelle regole. I colpi bassi ci sono, così come l'attrito e le turbolenze, i gas non sono perfetti. Magari, se oltre ad essere un ballerino fosse anche un buon fisico, potrebbe avere con sé qualche apparecchio da lui inventato. Tipo una pistola. Ma non basta avere una pistola, bisogna saperla usare, ed essere abituati ad essere sotto stress, in situazioni che richiedono di affrontare contingenze che non sono previste a priori. Ma abbiamo visto che le armi della biologia sono molto più potenti di quelle della fisica, se vogliamo fare a gara a chi è più duro. Un futile esercizio, ma se ci lanciano una sfida... siamo pronti.

Ora siamo pronti per capire la domanda del Ministro Boccia che, di fronte alle incertezze dei virologi, chiede alla scienza certezze inconfutabili. Boccia chiede agli scienziati di fare quello che promettono visto che dicono di essere: capaci di descriverne il comportamento passato e prevederne il comportamento futuro... la descrizione del passato e la previsione del futuro, sono essenziali... per definire lo scopo dello studio scientifico.

Chiaro? Non è colpa di Boccia, è colpa della reputazione che una certa branca della scienza si è costruita: scienza predittiva, che predice il

futuro! E se non riesce, Boccia si arrabbia. Giustamente. Perché gli scienziati duri dicono che la scienza predice il futuro. E che, se non è in grado di farlo, allora non è scienza. E uno potrebbe dire: ma allora è scienza solo quello che fai tu, e il resto? Studiare l'organizzazione della materia vivente non è compito della scienza? Certo, la legge dell'entropia mi dice che aumenta sempre. E ogni ordine generato dall'organizzazione della materia vivente genera maggiore disordine nella materia da cui trae risorse. Bene, lo sappiamo, grazie. Ma questo è come dire che la Divina Commedia è fatta di lettere dell'alfabeto, e pretendere di averla capita.

Dobbiamo spiegare a Boccia, e a Zichichi, che la scienza non è solo fisica. E che le scienze storiche non sono molto matematizzabili. Non perché chi le pratica è un inetto, ma perché ci vogliono altri linguaggi, meno precisi ma certamente più accurati nel descrivere e comprendere la realtà complessa.

Da biologo, sono felicissimo che ci siano i fisici. Solo che il loro concetto di scienza non è universale, è esistenziale. E qui dobbiamo tirare in ballo Karl Popper. Il quale ci ha insegnato che la scienza deve produrre enunciati falsificabili, tipo "tutti i corvi sono neri": una legge universale che si riferisce al colore dell'universo corvi. Quel "tutti", infatti, la identifica come universale. La legge non prova che tutti i corvi siano neri, perché non possiamo vedere tutti i corvi, ma la riteniamo vera fino a quando non la falsifichiamo. Già, perché gli enunciati scientifici, secondo Popper, devono essere falsificabili. Se trovo un corvo bianco, ecco che ho falsificato "tutti i corvi sono neri". Devo rigettare l'enunciato. E vabbé, ma ora cosa posso dire una volta che ho trovato un corvo bianco? Un biologo direbbe: "ok, è un corvo albino". Posso spiegare perché si è verificata questa deviazione dalla norma. Ma Popper non è contento. È una spiegazione *ad hoc*, e non salva dalla falsificazione quel "tutti" di tutti i corvi sono neri. OK, allora possiamo dire che quel "tutti" si trasforma in qualcosa di statistico, e posso dire con quali percentuali i corvi si presentano neri e in quali si presentano invece bianchi. Ma non è più una legge universale. La falsificazione di tutti i corvi sono neri in effetti falsifica l'universalità dell'affermazione che, quindi, deve essere trasformata in un enunciato esistenziale: "esisto-

no corvi neri, ma alcuni possono essere bianchi". Ci sono scienze che possono produrre enunciati universali, e altre che producono enunciati esistenziali. Gli enunciati universali sono l'alfabeto, gli enunciati esistenziali sono la letteratura.

Chiarito questo, è chiaro perché, se ci ammaliamo, non andiamo da un fisico ma andiamo da un medico (persino i fisici vanno dal medico...). E il medico non ha un sistema di equazioni con cui predice il futuro. Proceede per prove ed errori. Soprattutto se arriva un virus sconosciuto. Durante una trasmissione televisiva, una nota conduttrice ha chiesto a un luminare della virologia di effettuare predizioni sulla pandemia da coronavirus. Il virologo ha esordito dicendo: "non sono nè un fisico nè un matematico, e quindi quel che dico non sarà precisissimo...". Esprimeva sottile ironia che, temo, sarà rimasta oscura ai più. E infatti il ministro Boccia, proprio come Gruber, chiede ai virologi di essere come i fisici: predittivi. E vuole predizioni di precisione matematica.

Non esistono scienze che siano meglio di altre scienze, anche se alcune pensano di esserlo. Sono tutte necessarie e nessuna è sufficiente. Le scienze devono interagire, devono uscire dai buchi iperspecializzati in cui si sono annidate e devono parlare tra loro, proprio come stiamo facendo ora.

Nella Genesi, il Creatore affida un solo compito ad Adamo: dare il nome agli animali. E, in effetti, la nostra cultura nasce con una scienza: la zoologia. Le pitture rupestri rappresentano animali e sono la prima forma di arte e di scienza espressa dalla nostra specie. Da zoologo non sono così fesso da pensare che questo incarico divino conferisca una supremazia logica alla zoologia. Anche se il più grande scienziato di tutti i tempi, un tale Charles Darwin, era proprio uno zoologo. Ha risposto a domande a cui i filosofi hanno cercato di rispondere per millenni, e che altri scienziati non hanno neppure affrontato: da dove veniamo??? Da progenitori scimmieschi, deficiente! Ma questa, per Zichichi, non è scienza, visto che Darwin non ha scritto la formula dell'origine della nostra specie e non siamo in grado, oggi, di fare un esperimento che trasformi una scimmia in un uomo. E così, per rispondere, Zichichi scrive "Perché credo in colui che ha fatto il mondo" [3]! Ovviamente pensa che se una

domanda non trova risposta con una formula e un esperimento, non resti che la religione per darle risposta. La scienza sa fare di meglio, per fortuna.

Le scienze devono interagire, devono colmare gli spazi di ignoranza che le dividono e devono acquisire una caratteristica che ad alcune manca: l'umiltà.



- [1] I. Russell: *Images, representations and heritage: moving beyond modern approaches to archaeology*, Springer, Berlino (2006).
- [2] P. S. de Laplace: *Essai philosophique sur les probabilités*, Rachelier, Parigi (1825).
- [3] A. Zichichi: *Perché credo in colui che ha fatto il mondo*, Il Saggiatore, Milano (1999).
- [4] F. Boero, Comunicazione privata a margine del ciclo di seminari su *Semplice e complesso*, Università di Lecce (2001). <http://www.dmf.unisalento.it/~gpco/bio/home.html>
- [5] D. L. Goodstein: *States of matter*, Prentice-Hall, Englewoods Cliffs, New Jersey, USA (1975).
- [6] F. Boero, F. De Leo, S. Fraschetti, G. Ingrosso: *The Cells of Ecosystem Functioning: towards a holistic vision of marine space*, *Advances in Marine Biology*, 82 (2019) 129.
- [7] W. Allen: *Citarsi addosso*, Bompiani, Milano (1980).
- [8] <http://www.treccani.it/vocabolario/dizionario/>
- [9] N. Eldredge, S. J. Gould: *Punctuated equilibria: an alternative to phyletic gradualism* pp. 82 - 115. In: T. J. M Schopf, ed. *Models in Paleobiology*, Freeman, Cooper and Co.; San Francisco, Calif. (1972).
- [10] F. Boero: *Ecco perché i cani fanno la pipì sulle ruote delle macchine. L'uomo e il suo rapporto con gli altri animali e le leggi della natura*, Manni Editori, San Cesario, Le (2018).



**Ferdinando Boero:** è Professore di Zoologia presso l'Università di Napoli Federico II, Associato a CNR-IAS e Stazione Zoologica Anton Dohrn. Si occupa di biodiversità e funzionamento degli ecosistemi.

**Giampaolo Co':** è Professore Associato di Fisica Nucleare presso l'Università del Salento. Si occupa di sistemi a molti corpi.

---

# Pollicino e la Bella Addormentata

*Not till we are lost, in other words not till we have lost the world, do we begin to find ourselves, and realize where we are and the infinite extent of our relations.*

H. D. Thoreau

---

**Luigi Martina**

*Dipartimento di Matematica & Fisica "Ennio De Giorgi" - Università del Salento  
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sez. di Lecce, Lecce, Italy*

---

**L**e nostre limitate conoscenze scientifiche ci offrono un panorama assai variegato della Natura, con aree abbastanza esplorate e interconnesse, assieme a vaste lande di ignoranza. Esse però lasciano amplissimo spazio alla creatività, edificatrice di arditi ponti concettuali. Ma in quest'opera l'improvvisazione è destinata al fallimento.

## Premessa

Queste note sono frutto di osservazioni personali, quotidiane e senza pretendere di essere particolarmente originali e controllate con metodo professionale scientifico. Perciò esse potranno risultare incoerenti e naturalmente soggette a critiche, le quali saranno le benvenute. Poiché non ho intenzione di stabilire paragoni, contraddittori e citazioni illuminanti, limiterò al massimo le argomentazioni dettagliate, rimandando ad altra sede una analisi puntuale delle varie affermazioni e il riferimento preciso alle fonti. Pertanto mi scuso in primo luogo con quanti abbiano già fatto le stesse considerazioni e, soprattutto, con tanti autori, fonte della mia ispirazione, che ringrazierò in una esposizione meglio ordinata, ma mi limiterò a citare alcune letture che mi col-

pirano particolarmente in anni ormai da tempo trascorsi. L'intenzione originaria del lavoro era quella di fornire una prospettiva soggettiva di come si sviluppino le Scienze. Ma procedendo nella scrittura mi sono reso conto di non avere né spazio né tempo a sufficienza per esemplificare ed esplicitare le varie argomentazioni, in primis a me stesso. Perciò mi scuso con il paziente lettore nel costringerlo a cercare (leggere) le briciole (cioè la scansione per punti del mio ragionamento) in una foresta oscura ed insidiosa, senza contare i passi nel frattempo compiuti per giungere allo scopo, al sogno e all'ideale. Di questa percorso le favole ne sono da sempre la metafora più aderente. A chi avrà tempo e voglia di chiedermeli, sarò felice di offrire dettagli e chiarimenti.

## Considerazioni generali

Personalmente non credo che il compito della Scienza sia descrivere gli oggetti della Natura, o della Società o dello Spirito tal quali. Né prevedere il futuro o esercitarsi ad usare una strumentazione ben nota della Matematica, che pure è Scienza. Ma nemmeno pretendere di calcolare (che qualcuno calcoli) quanti virus ci siano

attorno. Lo scopo della Scienza consiste in primo luogo nel fornire delle rappresentazioni mentali della fenomenologia, in senso lato, le quali abbiano una coerenza razionale tra di loro. Naturalmente il razionale è dipendente dai processi cerebrali, sottendenti a tutto. Che piaccia o meno alla corrente filosofica preferita dal lettore. Infatti, che le proposizioni A e NON A siano necessariamente una vera e l'altra falsa è una scelta razionale da un punto di vista dell'economia del pensiero, ma non l'unica scelta possibile. Fatto ben noto e studiato in vari modi (*fuzzy logic*), senza bisogno di evocare *Rashomon*. Rimanendo più vicini alla nostra tradizione culturale, se il nucleo del mio pensiero è che Dio interviene costantemente nel mondo, non c'è nulla di irrazionale nel porre che sia il miracolo il concetto esplicativo delle manifestazioni dell'universo. Ma questa concezione non è quella che abitualmente noi indichiamo come Scienza.

Ora, parafrasando gli scolastici, io so che Dio può muovere le montagne, ma di solito non lo fa. Il perché lo sa solo Dio. Quindi questa non è una domanda scientifica, sulla base dei precedenti criteri, e alla quale si possa sperare di rispondere. Quesiti scientifici, invece, possono essere: perché il mare rimane piano (uhm... !?) mentre le montagne si innalzano, perché i torrenti vi discendono e come vi scavano i loro letti, perché e come si fratturano le rocce e come le breccie si ricompongono e consolidano. O ancora: perché si cade? "E se Galileo con il suo telescopio, invece di vedere le stelle a forma di palla le avesse viste a forma, che so ... , di spazzolino da denti? ..." chiese la Pio a Marcello [1]. Tutte domande/risposte che cercano di costruire/rintracciare un ponte esplicativo, che ponga in relazione tra loro concetti, immagini e modelli già residenti nel pensiero, limitatamente ad una certa classe di osservazioni/misurazioni e partendo da alcuni presupposti teorici. Questi possono provenire da esperienze e concettualizzazioni pregresse, forse antecedenti ad ogni espressione verbale e formale, magari assorbite durante la gestazione materna, senza necessariamente scomodare le forme *a priori* kantiane. Tra di essi certamente la scelta di una scala (o più di una), che fissano il livello di dettaglio nella discussione una certa categoria di fenomeni. Tale scelta avviene sulla base di numerose, eterogenee e, spesso, implicite

considerazioni. Difficilmente la scienza egizia poteva fare osservazioni al di sotto del centesimo di *dito*  $\approx 1.88$  cm, o al di sopra del centinaio di *fiumi*  $\approx 10.5$  km. Questo per motivi fondamentalmente tecnologici, non concettuali. Eppure si nota subito che queste unità sono circa le stesse scale di lunghezza alle quali facciamo riferimento nella vita quotidiana. Entro queste scale ci sentiamo psicologicamente tranquilli. Eppure dall'interno di queste scale in epoca ellenistica Eratostene riuscì a misurare il raggio terrestre con un errore relativo massimo del 2.5%: ben al di sotto di quanto ci si aspetterebbe da una sommaria analisi di metodi e dati e, soprattutto, ottenendo il primo risultato di valore cosmologico della storia (almeno per l'epoca ... e non solo!). Mentre sull'altro versante la scienza greca non si spinse molto oltre, soprattutto a causa del preconetto che i fenomeni ottici fossero in gran parte affetti da illusioni sensoriali, non consentendo di cogliere la reale essenza del mondo. Tale limitazione rimase in auge per i duemila anni successivi, violata solo all'epoca di van Leeuwenhoek e la scoperta dell'universo microscopico. È chiaramente ai confini di aree, che riteniamo già esplorate e familiari, che le nostre considerazioni diventano incerte e può diventare interessante approfondirne lo studio: *hic sunt leones*. Una Scienza è tale se ha la consapevolezza di tali limiti, perché è lì che le nostre idee sul mondo possono scontrarsi con la realtà, essere confermate o rigettate. La tradizione e la pura speculazione alla lunga ci portano fuori strada, come appena illustrato, ma allo stesso tempo la mera conoscenza empirica, l'artigianato dell'esperienza tecnica, soggettiva e quotidiana ci fa perdere la visione d'insieme e le nuove possibili strade.

## Rappresentazioni

In questa discussione la maggior parte dello spazio sarà dedicata a quella parte della Scienza che viene denominata Fisica. Questo dipende dalla personale esperienza formativa e lavorativa, nonché dal tentativo di non dire troppe schiocchezze su campi che non conosco, o appena superficialmente. Quindi mi scuso con il lettore per questa preferenza, senza che questo implichi nessuna visione gerarchica tra le varie branche della Scienza, nè che la Fisica sia un modello di riferimento

speciale. Nello sviluppo storico delle Scienze si possono riscontrare dei tratti comuni a tutte loro e, forse, il punto di vista parziale e partigiano contiene concetti, idee e ragionamenti, per così dire, universali.

Spesso, però, nel pensiero corrente la Fisica viene associata al meccanicismo deterministico (o newtoniano) sviluppato tra XVIII e XIX secolo, secondo il quale lo scopo ultimo della Fisica era quello di spiegare l'Universo e i numerosi fenomeni in esso contenuti. In effetti dietro questa ideologia si celavano accuratamente credenze cosmogoniche e teologiche non più accettate dai fisici, almeno fin dagli anni '30 del XX secolo. Incidentalmente vorrei ricordare che la formulazione rigorosa e "ideologica" del determinismo, attribuita a P. S. Laplace, si trova in effetti nella prefazione del primo trattato organico di teoria della probabilità (bayesiana) che la storia della Scienza riporti.

Quindi, secondo me, l'accento dell'argomento di Laplace non andrebbe posto sul carattere predittivo della Fisica, quanto sull'incapacità tecnica/strumentale di giungere alla conoscenza completa. In altri termini, i limiti della nostra ignoranza del mondo si possono forse ridurre, affinando gli strumenti di misura e di analisi in un processo ciclico tra Scienza e Tecnologia. In ogni caso, risolvere le equazioni del moto per grandi insiemi di particelle rimane un problema tecnico formidabile, inattaccabile e mal posto. Perciò si è costretti ad un nuovo tipo di descrizione, che viene sviluppata nel resto del trattato laplaciano, attraverso l'idea di probabilità. A questa visione si contrappone quella dell'ignoranza intrinseca, epistemica o fondazionale: esiste comunque un limite alla conoscenza. Questa potrebbe non escludere progressi, anzi aprire alla possibilità di una infinità di possibili percorsi alternativi e non esclusivi, sovrapponibili in qualche senso tecnico.

Come si accennava nel paragrafo precedente, è preferibile affermare che la Fisica descriva i fenomeni per mezzo di rappresentazioni o immagini, che sono costruite secondo procedure rigorose, cioè delle quali si possiede consapevolezza al massimo grado. Che cosa sia una rappresentazione di un fenomeno nell'ambito della Fisica, o in oggetto ad ogni altra Scienza, e come essa si costruisca è un argomento filosofico

molto serio. Altrettanto seria è la valutazione di quanto queste immagini debbano essere considerate di successo o reali. Ovviamente nel presente scritto non si possono affrontare queste difficili domande in profondità ed estesamente. Comunque una risposta ad esse si deve pur dare, se si vuole sviluppare una qualsiasi teoria su una solida base concettuale ed evitare molti fraintendimenti, domande oziose e, soprattutto, discussioni oscure. Normalmente si chiede che un fenomeno sia descritto da un insieme di quantità che misurano/caratterizzano l'organizzazione dei sistemi, i quali partecipano al fenomeno. Queste quantità fisiche sono gli elementi che definiscono il quadro. Si concorda sul fatto che il quadro di un fenomeno abbia successo se descrive/spiega/prevede entro una precisione tecnicamente accessibile e approssimazioni realistiche il risultato dell'organizzazione dei sistemi fisici pertinenti al fenomeno.

Quanto sopra conduce alle seguenti domande:

- A Come specificiamo/descriviamo una quantità fisica?
- B Quanto devono essere equivalenti le descrizioni di una quantità fisica?
- C Le rappresentazioni di una determinata quantità fisica sono sempre le stesse?

Tutte queste domande, e molte altre dello stesso tipo, sono state e saranno poste nel corso della storia umana. A queste domande non esistono risposte definite e uniche. Esse spesso sono dovute a valutazioni ragionevoli che, a loro volta, si basano su altre credenze più fondamentali e così via.

Una simile infinita sequenza di ragionamenti può rapidamente divergere nel regno delle ipotesi e delle congetture indimostrabili, delle credenze parascientifiche e dei riti magici. Ma nella Scienza, e in particolare in Fisica, non possiamo permetterci una serie infinita in atto di domande e risposte ambigue e non circostanziate. Questo perché la Scienza ha aspetti che acquistano significato e sostanza nella pratica quotidiana, che coinvolge ciascuno di noi. Ovviamente non ci può essere spazio per credenze relativamente al decollo di un aereo, al livello di sicurezza di un reattore nucleare, all'efficacia di una cura della polmonite. In conclusione, gli aspetti pratici

della vita stessa ci impongono un preciso mondo reale di fenomeni oggettivi a cui la Scienza è chiamata ad offrire idee e proposizioni, formulate dopo un insieme necessariamente finito di ragionamenti e operazioni concrete conseguenti.

Ovviamente altri autori hanno un approccio diverso e il lettore può avere il suo. Tuttavia, indipendentemente dall'approccio adottato, esiste un tacito accordo (spero) secondo il quale:

- 1 non esiste un approccio corretto, ma alcuni di essi hanno significativamente più successo di altri relativamente ad alcuni gruppi di fenomeni;
- 2 qualunque sia l'approccio adottato relativamente ad un insieme di fenomeni, le risposte finali (numerica, se si vuole) che esso fornisce devono complessivamente collocarsi entro l'accuratezza delle misurazioni/osservazioni sperimentali correnti, altrimenti esso non è accettabile.

Questi due punti rimangono dei cardini per ogni disciplina scientifica.

## Realtà, Linguaggi e Teorie

1. Esiste un *Universo* del quale Noi siamo parte. La Scienza riguarda l'organizzazione mentale/concettuale della nostra percezione dell'Universo, sia materiale (esterno) che mentale (interiore).
2. Il processo organizzativo delle percezioni è interiore, esso può essere svolto in molti modi differenti, tenendo conto della conformità delle loro conseguenze, concettualmente elaborate, rispetto agli esiti delle nostre percezioni pregresse e future. Il tentativo di stabilire delle relazioni non contraddittorie, relative a entità terze autonome tra loro e dal nostro "IO" appercepente, distingue il discorso scientifico da ogni altro. La necessità di comunicare in modo organico tali relazioni tra individui diversi costituisce la base della conoscenza scientifica e delle sue leggi o dell'informazione, se si preferisce una terminologia contemporanea
3. Non possediamo alcuna rappresentazione scientifica globale dell'Universo, né è detto

che potremmo mai raggiungerla. Le limitazioni potrebbero non essere meramente di carenza di conoscenze e di tecniche, ma di carattere epistemico generale.

4. Non sapendo (ancora) se e quale sia il senso di tale limite, ci si accontenta di rappresentazioni parziali, riguardanti aspetti particolari dell'Universo. Questo non è necessariamente un male in sé: semplicemente potrebbe essere il riflesso di una organizzazione intrinseca della Natura stessa. Tuttavia siamo spinti alla ricerca di un quadro unitario. Conseguentemente gli ambiti di rilievo nell'indagine scientifica sono i confini tra le rappresentazioni di differenti classi di fenomeni.
5. La storia delle Scienze è la storia delle indagini dei confini tra rappresentazioni differenti della stessa classe fenomenica o tra realtà fenomeniche percepite differenti. Per tale intrinseca natura della ricerca scientifica i percorsi che legano due ambiti scientifici sono in entrambi i sensi e, in generale, ne coinvolgono più di due. L'idea dominante nella Scienza è quella di sistema, che è complementare a quella particolarità e specializzazione. A seconda del contesto culturale, formativo e produttivo nel quale lo scienziato opera, i due aspetti possono accentuarsi su uno o sull'altro. Abbastanza genericamente si può affermare che non è il desiderio di risolvere un particolare specifico problema a motivare uno scienziato, ma piuttosto il credo che nel risolvere quel particolare problema si fornisca un contributo alla risposta a più ampie domande sulla Natura e, in definitiva, sul senso della nostra stessa vita.
6. Le procedure di indagine possono essere le più varie e disparate. Non c'è un Metodo definito a priori, anche se per molti scopi può essere comodo averne uno a disposizione. In particolare, non esiste un processo regolare, costruttivamente meccanico, che consenta di "spiegare" il piccolo dal grande o viceversa. Nei passaggi di scala bisogna sempre rinunciare a dettagli, operando medie ed analisi.

Tuttavia solo le rappresentazioni che ampliano le classi di fenomeni che vi trovano collocazione hanno speranza di sopravvivere nel processo di costruzione della Scienza.

7. Una rappresentazione, che si sostituisce ad altre concezioni parziali precedenti, deve essere compatibile con esse. Sono i limiti di validità (intesi sia come incertezze strumentali, che interpretativi) dei vecchi modelli ad essere superati e risolti in qualche schema teorico più fondamentale e generale. Quindi le vecchie strutture concettuali assumono nuove interpretazioni, vengono meglio definiti i loro limiti, la loro efficacia esplicativa ed applicativa. Esse non vengono cancellate definitivamente. Spesso sono dimenticate dai manuali, ma non dal processo di formazione del pensiero umano.
8. A livello individuale, e anche all'interno di comunità scientifiche, il processo di ampliamento delle rappresentazioni di una certa classe di fenomeni non avviene senza costi: bisogna adattare, modificare, integrare, rigettare, confutare, sostituire, rinnovare l'intero impianto delle rappresentazioni già in possesso.
9. Rappresentazioni parziali possono permanere a lungo nella cultura generale ed eventualmente produrre delle idee para/pseudoscientifiche (*misconceptions*). Normalmente sono associate a fasi diverse dello sviluppo individuale dell'essere umano. Tuttavia, è facile riconoscerne tracce nella cultura generale e sono abbastanza indipendenti dal particolare contesto culturale nel quale siamo individualmente collocati.
10. Il processo di costruzione di una rappresentazione mentale del mondo richiede, in qualche modo, la formazione, manipolazione, correlazione, trasmissione e interpretazione di concetti astratti. Essi costituiscono un lessico e delle regole grammaticali e sintattiche, cioè un linguaggio. L'analisi su di esso conduce ad un linguaggio formale, che può specificarsi ulteriormente a seconda del campo di applicazione.
11. Una rappresentazione mentale di una porzione qualunque del reale è priva di significato scientifico se non è comunicabile ad altri ed interpretabile da essi, sulla base di un comune accordo sul linguaggio da adottare. Da questo punto di vista, un linguaggio formale offre alcuni vantaggi pratici.
12. La formazione di una rappresentazione scientifica è costituita da una gerarchizzazione e correlazione di rappresentazioni particolari in una struttura di pensiero la più coerente possibile, nel senso indicato nei punti precedenti. Non è sicuro che il completamento di questa operazione possa mai essere condotta a termine.
13. Il processo di formazione di una rappresentazione (parziale/globale) dell'Universo espresso attraverso un linguaggio formale viene chiamato *teoria*. Non esistano affermazioni scientifiche al di fuori di una *teoria*, cioè al di fuori di un linguaggio formale costituito da un lessico, da assiomi e regole di inferenza e deduzione.
14. L'analisi di ogni linguaggio formale è equivalente a quella branca della Scienza che noi chiamiamo comunemente *Matematica*.
15. Non esistono teorie, per quanto complesse (nel senso comune dell'aggettivo italiano), strutturalmente articolate e più o meno assiomaticamente complete (in senso hilbertiano), che non possano essere matematizzate.
16. La *Matematica* è il prodotto formale del quotidiano pensiero umano. Essa non esiste *a priori* in un ipotetico mondo delle idee. Se anche così fosse, bisognerebbe lavorare duramente per cavarla da esso.
17. La *Matematica* si estende naturalmente assieme alle altre scienze. Nego l'esistenza di una *Matematica* data per sé: essa è una costruzione dell'Uomo, di carattere astratto e perfettibile. Autonoma dalle altre scienze, essa trae ispirazione da tutte loro ed è a tutte applicabile, essendo un distillato della creatività umana originantesi della riflessione scientifica. La modifica appropriata di

alcuni assiomi conduce a matematiche nuove: la creatività in Matematica ha la stessa portata di quella in campo musicale. Beethoven non è Bach e il Jazz non è Classica. Esattamente come la probabilità non è la teoria dei numeri, né la geometria euclidea è la stessa di quella algebrica. Eppure tutte si parlano, esattamente come un bravo pianista può eseguire Mozart e interpretare Scott Joplin. Immagino di non poter ricevere la benedizione di Gödel per queste affermazioni.

18. Da aggregati concettuali informali la Matematica estrae strutture regolari, il suo interesse principale consiste quindi nel regolarizzare le singolarità: categorizzandole, correlandole, combinandole. Quello che ormai riteniamo regolare, normale e ripetitivo non è un argomento di interesse della Matematica, casomai della ragioneria. Ovviamente, si necessita della conoscenza di tutta la Matematica antecedente il nostro attuale oggetto di studio.
19. Questo non vuol dire che non esistano altre forme di conoscenza. Semplicemente tali altre forme non rendono espliciti i legami tra i concetti manipolati. Facilmente si adottano procedure argomentative su una pluralità di percorsi logici e di rappresentazioni non collegate tra loro, spesso solo apparentemente, e comunque sempre ancorati all'"IO", magari nel senso fichtiano del termine. Questo comporta l'esaltazione della soggettività nella descrizione dell'Universo e una buona dose di incomunicabilità tra gli individui. La conoscenza della Natura si riduce a meraviglia e a tecnica.
20. Una volta scelto il contesto matematico nel quale si vuole giocare (oh: operare!), gli oggetti astratti si combinano con rigide regole. Quindi, una volta scoperte tali regole, il calcolo può essere trasferito ad una macchina. Tuttavia sappiamo che esistono funzioni matematiche che non possono essere computate. Cioè per esse non esiste un algoritmo costituito da un numero finito di operazioni e di istruzioni da eseguire un numero opportuno di volte, o se si preferisce una macchina

di Turing, che ne calcola il valore per ogni possibile assegnazione delle variabili indipendenti. Sebbene esistano dei linguaggi universali che ci consentono di far questo, non tutti i valori della funzione di interesse possono essere effettivamente calcolati tramite un algoritmo. Quindi dobbiamo accontentarci di approssimazioni e sviluppare algoritmi di approssimazione. La (non) computabilità di una funzione costituisce uno dei limiti intrinseci alla nostra capacità di accrescere la conoscenza. Tale ostruzione potrebbe essere superata invocando l'intervento di un oracolo nel senso di Turing, il quale produce la risposta corretta senza eseguire una dimostrazione formale. Forse questo concetto della teoria della complessità computazionale potrebbe avere qualche assonanza con le osservazioni fatte al punto precedente. Oppure si cambia in qualche modo la Matematica ...

21. Il tema della computabilità spalanca le porte al ruolo dell'informazione nell'Universo: il mondo fisico è strutturato da informazioni, con energia e materia come accessori. Queste tre idee, e i loro interscambi, permeano ogni argomentazione scientifica.
22. D'altra parte rimane iconica la domanda di Schrödinger [2]:

"Come possono gli eventi nello spazio e nel tempo che si verificano tra i confini di un organismo vivente essere giustificati dalla Fisica e dalla Chimica?"

Questa domanda è stata riproposta fin dagli albori della Scienza in altri termini: la materia vivente è fondamentalmente la stessa della non vivente, per quanto più complicata, o vi è qualcosa di fondamentalmente differente in essa? Sono richieste altre leggi "esterne" a quelle scienze?

## **Modelli di Fisica Fondamentale**

23. La Fisica Fondamentale possiede una struttura geometrica, che è abbastanza consoli-

- data su scala locale e globale. Ma allo stesso tempo essa è suscettibile di modifiche profonde: le vicissitudini di secoli di rivelazioni in Fisica ci consigliano di non essere dogmatici.
24. Alle entità rilevanti della Fisica sono associati oggetti astratti detti *campi*, che possono essere continui e/o discreti e, in generale, ogni teoria particolare deve esplicitamente dichiarare quali campi si considerino e a quali condizioni locali/globali siano sottoposti. Tra di essi lo spazio-tempo, per esempio descritto dalla Relatività Generale. Esso non è il palcoscenico sul quale si svolgono i fenomeni, ma è esso stesso un fenomeno fisico. A questo livello la nozione di tempo, distinto dallo spazio, è priva di significato. La struttura locale dello spazio-tempo è in genere quella della Relatività Speciale. Su tale spazio di base (tecnicamente parlando), si possono inserire altri campi e strutture geometriche, discrete finite, numerabili, e infinito dimensionali.
  25. Gli osservabili sono funzioni dei campi, che corrispondono a delle specifiche procedure operative (osservazioni/misure) concrete sull'Universo. Essi esprimono quantità numeriche: le grandezze fisiche, sulla cui caratterizzazione qui si rimane nella generalità più ampia possibile.
  26. Il mondo reale non è intrinsecamente conoscibile con un numero finito di misurazioni/osservazioni, cioè di applicazioni di osservabili. Tutte le nostre misurazioni sono condizionate al fatto che una interazione tra strumento di osservazione e osservato sia effettivamente avvenuta. Questo implica che l'esito di ogni osservazione è influenzato in qualche misura dalla presenza dell'osservatore.
  27. Al netto di effetti sistematici, l'osservatore influenza in modo casuale l'oggetto dell'osservazione. Ogni singolo esperimento di misura costituisce un evento a sé stante, il cui risultato non è in generale riproducibile, anche se esso faccia parte di una serie di preparazioni identiche.
  28. Di norma, in una lunga sequenza di procedure preparatorie identiche e di corrispondenti misure di uno stesso osservabile, le frequenze relative dei vari possibili esiti delle singole misure tendono ad una distribuzione limite, stabile in un qualche senso specifico.
  29. Questa idea è esplicita nel caso della Meccanica Quantistica, messa a punto circa un secolo fa. In questo ambito, lo studio di osservabili distinti conduce alla nozione della loro (eventuale) incompatibilità. In altre parole, possono esistere distribuzioni statistiche congiunte di due osservabili, che non sono mai riducibili a singoli punti nei corrispondenti spettri di valori misurabili. Esiste una scala universale, derivante da innumerevoli, continue e qualitativamente distinte osservazioni, al di sotto della quale tale ignoranza epistemica si realizza ed essa è data dalla costante di Planck ( $\hbar = 1.054571800(13) \times 10^{-34}$  joule sec). Tradizionalmente  $\hbar$  è connessa alla distinzione del mondo microscopico da quello macroscopico e alla dualità onda-corpuscolo.
  30. I campi non sono necessariamente essi stessi degli osservabili fisici e possono avere gradi di libertà ridondanti rispetto alle quantità osservabili/misurabili. Queste ridondanze codificano simmetrie dell'intera teoria e la loro esistenza è necessaria per la coerenza globale della struttura matematica. Da questo punto di vista una teoria di fisica può utilizzare oggetti non direttamente misurabili.
  31. La nozione di simmetria gioca un ruolo costitutivo molto importante nella formulazione di qualunque teoria di Fisica e scientifica in generale. La Matematica ha chiarito in maniera approfondita questo concetto e i fisici ne hanno fatto un amplissimo uso. Esso codifica le regolarità di un certo sistema, eliminando la ridondanza descrittiva tra situazioni equivalenti rispetto ad un definito osservabile. Essa può essere continua o discreta e può essere catalogata in una infinità di strutture algebriche distinte. Non

esiste campo scientifico, fisico in particolare, che non ne faccia, o non ne possa fare uso. Esistono varie generalizzazioni del concetto di gruppo e di algebra (nel senso tecnico dei termini), che risultano fecondi in molteplici contesti, anche al di fuori della fisica fondamentale, in quanto riassumono gli aspetti irriducibili di una qualsivoglia fenomenologia.

32. La scelta a priori delle simmetrie, fatta da uno specifico ricercatore, fissa quali campi si debbano considerare in un modello di Fisica e le loro principali proprietà. Con questo linguaggio un cambio di paradigma, nell'epistemologia khuniana [3], corrisponde esattamente alla scelta di una diversa simmetria, almeno nell'accezione che diamo oggi a questa parola, tra diverse teorie storicamente collocate. Conseguentemente, a prescindere dalla dettagliata evoluzione storica del cambio di paradigma, esso non può che creare discontinuità nella struttura teorica accreditata tra gli esperti di una certa disciplina scientifica.
33. Alcune simmetrie corrispondono a leggi di conservazione di familiari grandezze fisiche (energia, momento lineare e angolare totale, carica elettrica ...), che possono essere verificate sperimentalmente con grande precisione. Estensioni di tale struttura e generalizzazioni basate su simmetrie interne dei campi costituiscono una importante guida all'indagine. Le osservazioni empiriche danno delle indicazioni su quali simmetrie si possano considerare, ma naturalmente non le determinano univocamente, data la finitezza delle osservazioni possibili. Ancora una volta è la creatività del pensiero umano, magari condizionato da vissuti e contesti culturali specifici, a determinarne la scelta e la sua plausibilità. Per esempio non c'è nulla di magico ed ontologico nel simbolo  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  per specificare le simmetrie note sperimentalmente nel modello standard delle particelle elementari. Tant'è che coorti di fisici riflettono o hanno riflettuto, con più o meno successo, a possibili generalizzazioni. Appunto, esistono torri infinite di modelli non standard, che pre-

dicono i fenomeni osservati ed altri ancora. Ma quali sono le loro conseguenze osservative? Si calcolano e si torna all'esperimento, come sempre ci è stato insegnato a fare.

34. In ogni teoria di fisica fondamentale le simmetrie fissano le possibili interazioni, cioè come i campi, ed alcuni di essi in particolare, permettano di generare un'unica struttura connessa. Tali campi particolari sono detti mediatori delle forze. Le interazioni quindi rientrano solo entro certe tipologie, compatibili con la assunta struttura generale dell'Universo. Modificare la tipologia di interazione corrisponde a cambiare le simmetrie che descrivono l'Universo, cioè cambiare Universo. Il nostro Universo è vagamente simile a quello descritto da Einstein, lontanamente imparentato con quello di Newton, molto diverso da quello di Archimede e Euclide.
35. Forze effettive nascono dalla rottura delle simmetria dell'Universo. I meccanismi di rottura delle simmetrie possono essere vari, ma sono catalogabili esattamente. Tutte le precedenti narrazioni della Fisica ricadono in questo schema. Ma questa è una visione in retrospettiva.
36. La dualità onda-corpuscolo della Meccanica quantistica e la Relatività Speciale implicano che ad ogni campo sia associata una particella (intesa come categoria di oggetti con uguali proprietà osservabili e virtualmente localizzate in un punto dello spazio-tempo). Lo sviluppo coerente di questa idea si chiama Teoria dei Campi Quantistici (QFT). Le fluttuazioni quantistiche sono selvagge e dominano gran parte del comportamento di questi sistemi anche nello stato fondamentale, che può essere infinitamente degenerare. La stessa nozione di vuoto deve essere rivista: da esso possono emergere particelle a causa di fluttuazioni locali di energia, per poi annichilirsi in altrettanto rapidi ed energetici processi di interazione. Catene infinite di questi processi si possono innescare ovunque nello spazio-tempo, creando situazioni con un numero infinito di particelle, interagenti con diverse modalità tra loro e con altre già presenti.

37. La QFT presenta alcune diramazioni particolari (QED, QCD, CFT) ed è, in assoluto, la teoria sperimentalmente meglio verificata nella storia della Scienza. Per gli aspetti sommariamente descritti sopra, tali teorie sono interpretabili in termini di modelli statistici sugli spazi di tutte le configurazioni dei campi, con una sorprendente corrispondenza tra tempo e temperatura.

Eppure sappiamo che la QFT contiene i tarli dell'inconsistenza interna, della corruzione e della catastrofe. Perciò altre strade si tentano con tenacia (la teoria delle super-stringhe, ad esempio), ma al momento non sembra che negli esperimenti la Natura stia risuonando a campane spiegate nei confronti di esse.

38. Le particelle elementari della teoria fondamentale (il modello standard delle particelle elementari), quali gli elettroni ed altri leptoni tra i quali gli elusivi neutrini, i quark, i mediatori delle interazioni di colore (gluoni) ed elettrodebole (fotoni, W e Z) ed il bosone di Higgs hanno proprietà derivanti dalle simmetrie dei campi ad esse associate ed allo spazio-tempo. Gli effetti quantistici e l'autointerazione dei gluoni generano il confinamento dei quark: essi non si osservano isolati. La fenomenologia che riguarda queste particelle ha una scala tipica di energia dell'ordine del  $\text{TeV} = 10^{12}$  eV.

39. Vale la pena ricordare che, attraverso la sua interazione con le altre particelle, il campo di Higgs è responsabile della trasformazione dell'energia contenuta nell'Universo nella massa delle particelle elementari: la celebre relazione einsteiniana  $E = mc^2$  è in azione! Ma l'idea del campo di Higgs pone nuove problematiche al modello standard.

40. Particelle associate ad uno stesso campo sono identiche ed indistinguibili, nel senso che ogni osservabile fisico è indipendente da un qualunque scambio di due qualsiasi di esse.

41. Analizzando le proprietà generali di osservabili legati alle simmetrie dello spazio-

tempo, in particolare alle rotazioni, si deduce che (in dimensioni spaziali  $\geq 3$ ) tutte le particelle appartengono a due categorie: bosoni (spin intero) e fermioni (spin semi-intero). Lo scambio di due particelle identiche deve essere effettuato concordemente a tale proprietà. Teorie che prevedono la trasmutazione di bosoni in fermioni (e viceversa) si dicono supersimmetriche, ma non sono ancora state confermate sperimentalmente a livello di modello standard. In spaziotempi con dimensioni  $< 3$  le affermazioni precedenti possono essere violate.

42. Nonostante i notevoli successi parziali e molte proposte sul tema, non esiste a tutt'oggi una completa coerenza tra la struttura geometrica dello spazio-tempo (la Relatività Generale) e la Meccanica Quantistica. Il problema è complesso (nel senso tecnico del termine), anche perché cerca di stabilire correlazioni stringenti (olistiche, se piace un termine suggestivo), che debbono pur esistere tra l'universo astronomicamente inteso con il microcosmo fondamentale. In altri termini, esiste il preconcetto che la struttura in grande dell'Universo debba essere coerente con la struttura microscopica quantistica.

43. In modo naturale questo punto di vista conduce allo studio della Fisica negli intorni delle singolarità nello spazio-tempo, quali i suoi bordi (l'infinito nullo passato, futuro, tipo spazio e tipo tempo) e i buchi neri, previsti dalla Relatività Generale e osservati sotto vari aspetti. Il riferimento al premio Nobel della Fisica per il 2020 è d'obbligo.

44. Anche se è impossibile dire cosa si celi dentro un buco nero, attorno ad esso esiste una superficie (puramente matematica) detta orizzonte degli eventi, dalla quale non può emergere nulla (classicamente descritto) e la cui area è proporzionale alla massa dello stesso.

## Informazione - Atto I

45. La conservazione dell'energia e del momento angolare continuano ad essere soddisfat-

te, ma non il II Principio della Termodinamica. Infatti la materia che vi cade dentro cessa di avere ogni sua specificità, comportando così una diminuzione dell'entropia termodinamica dell'Universo.

46. Si può stabilire una equivalenza tra l'entropia termodinamica con l'entropia di informazione. La prima è interpretata da L. Boltzmann in termini del numero di stati microscopici distinti nei quali potrebbero trovarsi le particelle di una porzione di materia in uno specifico stato macroscopico. La seconda fu definita da Shannon come la quantità media di informazione trasmessa da un certo evento (messaggio), quando si considerano le probabilità con cui vengono prodotti tutti i possibili eventi (messaggi). Equivalentemente, essa misura la quantità di informazione di un messaggio in termini del numero di cifre binarie necessarie per codificarlo.

47. L'entropia di Shannon non illumina sul valore dell'informazione, altamente dipendente dal contesto, ma fornisce una misura oggettiva della quantità di informazione ed è alla base dei moderni sviluppi informatici. Osservazione corrente è che, riportando entrambe le quantità ad unità di bit, una memoria con un Terabyte di dati e del peso di 0.3 g possiede circa  $10^{13}$  bit di entropia di informazione contro  $10^{21}$  bit di entropia termica. Questa ENORME differenza nasce dal banale conteggio dei gradi di libertà: lo stato dei transistor della memoria da una parte, posizioni e velocità degli ioni di silicio che costituiscono il chip dall'altra.

48. Il calcolo dell'entropia termica dipende dal livello di descrizione della materia, che nel caso proposto abbiamo supposto essere gli atomi e non le particelle elementari del modello standard. Quando si riuscirà a codificare dell'informazione sul singolo atomo (prospettiva non remotissima) le due entropie saranno uguali. Ma se fossimo anche capaci di codificare un bit di informazione sui quark, o più profondamente su superstringhe o altre fantasticherie, quanta informazio-

ne si potrebbe codificare su un centimetro cubo di materia?

49. Non sono rilevanti i valori assoluti dell'entropia termica/ di informazione, ma quello delle loro variazioni. Maneggiando un chip senza metterlo sulla linea di fascio di LHC, difficilmente si cambierà lo stato dei quark confinati nei nucleoni, che formano i nuclei, che stanno negli atomi di silicio (e/o impurezze), che partecipano ad un singolo transistor costituito da qualche centinaio di migliaia di atomi, in un array di qualche decina di migliaia di transistor per centimetro di lunghezza. Quindi il loro contributo all'entropia non cambia a livello delle energie abituali e nelle variazioni è inutile tenerne conto. Il parallelismo tra le due entropie esemplifica drammaticamente l'aspetto gerarchico, a livelli, nella descrizione del mondo fisico. Inoltre ci conferma nell'idea che l'Universo è fatto di energia e di informazione, che sono allo stesso tempo idee astratte ed estremamente concrete. Nessuna delle due può esistere separatamente dall'altra e insieme organizzano l'Universo.

50. J. Bekenstein ha congetturato che l'entropia di un buco nero sia proporzionale all'area dell'orizzonte degli eventi. La materia che vi cade dentro ne aumenta la sua massa, che a sua volta accresce l'area dell'orizzonte degli eventi, (sovra)compensando la perdita di entropia della materia ordinaria al di fuori di esso. Il II Principio viene quindi generalizzato ed una serie di studi hanno confermato la sua coerenza con gli altri principi della Fisica.

51. Il processo puramente quantistico predetto da S. Hawking dell'irraggiamento da buco nero, quindi con emissione di materia, avviene in accordo con il II Principio generalizzato da Bekenstein. Inoltre è possibile calcolare l'ordine di grandezza dell'entropia. Un buco nero con l'orizzonte degli eventi di un centimetro di diametro possiede un'entropia dell'ordine di  $10^{66}$  in unità di bit: una enormità!!!

52. Il II Principio generalizzato consente di imporre dei limiti alla capacità di informazio-

ne di un qualunque sistema isolato, i quali si riferiscono a tutti i livelli di descrizione dell'Universo.

53. In particolare, poiché l'entropia di un sistema isolato non può diminuire, la massa contenuta entro una superficie chiusa deve avere una entropia che non può superare quella di un buco nero avente tale superficie come orizzonte degli eventi. E questo indipendentemente dal livello di descrizione della fisica e dal processo con il quale la materia collassa nel buco nero. Tale situazione, chiamata limite olografico da G. 't Hooft, corrisponde a dire che la massima entropia possibile dipende dall'area di confine invece che dal volume, come comunemente accade!!!
54. Anche l'informazione cumulabile in una massa, per esempio costituita da transistor, dovrebbe essere proporzionale alla superficie che li contiene, piuttosto che dal volume. Questo risultato controintuitivo è dovuto al fatto che aumentando progressivamente la densità di massa, si raggiungerà anche il collasso gravitazionale, e la formazione di un buco nero, ben prima che l'entropia di volume eguagli quella di superficie.
55. Il principio olografico comporta che alla descrizione fisica completa di qualsiasi sistema che occupa una regione 3-D corrisponde un'altra teoria fisica definita solo sul suo confine 2-D. Ci si aspetterebbe che il contenuto informativo del sistema non debba superare quello della descrizione sul confine.
56. Effettivamente questa idea è stata applicata in una serie di esempi teorici in una varietà di geometrie e dimensioni dello spazio-tempo. Il più celebre dei casi, analizzato da J. Maldacena nel 1997, consiste di un universo descritto dalla teoria delle superstringhe definito sullo spazio-tempo anti-de Sitter in 5-D, che è completamente equivalente a una QFT, che opera sul bordo di quello spazio-tempo (corrispondenza AdS/CFT).
57. Estensioni e applicazioni del principio olografico, anche alla Fisica della materia condensata, sono state sviluppate ampiamente, entrando così nell'ambito delle verifi-

che sperimentali e aprendo nuove e insospettabili interpretazioni della Fisica. Ma il punto più significativo, secondo me, è la reintroduzione prepotente di una sorta di freccia del tempo a livello di fisica fondamentale, implicita nel II Principio. Sembrerebbe quasi che il tempo sia legato all'esistenza di bordi per l'Universo, quindi alla sua struttura globale. Mentre a livello locale c'è una perfetta simmetria tra passato e presente, condizionato dalla relazione di incertezza quantistica  $\Delta E \times \Delta t \geq \hbar$ , per quanto essa rimandi a sua volta ad una corretta (e mancante!) interpretazione del tempo. Ad esempio, dall'analisi dell'ultima relazione esposta, si può argomentare del tempo empirico, quello misurato con gli orologi per intenderci, come una proprietà emergente. Qualcosa di simile alla temperatura, che misura l'andamento medio degli eventi. In tal modo si verifica un distacco dalla struttura spazio-temporale fondamentale ed una necessità di introdurre strumenti di misura specifici.

## Materia Comune

58. Il livello di descrizione dell'Universo appena superiore a quello del Modello Standard è detto Fisica Nucleare. I suoi oggetti di interesse fondamentale sono i nucleoni (protoni e neutroni), tutte particelle composte da quark e gluoni, e altri barioni. La loro massa è dovuta all'energia del legame dell'interazione di colore tra quark e gluoni, ma tali particelle cessano di avere un ruolo diretto nella fisica nucleare. Esiste una cosiddetta scala tipica delle interazioni elettrodeboli ( $\approx 250$  GeV), al di sotto della quale le forze di colore sono mediate anch'esse da particelle composite. Le forze elettrodeboli agiscono come nel Modello Standard sulle nuove particelle e sono alla base del fenomeno del decadimento  $\beta$ .
59. Pur essendo sempre in un regime nel quale gli effetti quantistici e relativistici sono dominanti, nel processo di formazione (condensazione) dei barioni alcune simmetrie del

modello standard vengono rotte, altre vengono evidenziate. Queste residue caratterizzano la Fisica Nucleare, ma non sono sufficientemente ricche per replicare una teoria analoga alla precedente. D'altro canto esse sono capaci di descrivere accuratamente la formazione e le reazioni tra nuclei atomici. Questo aspetto è incredibilmente importante nell'ambito della nucleosintesi stellare, senza la quale la possibilità di forme di vita, qualunque cosa questo significhi, sarebbe impossibile.

60. La regione di confine tra il livello nucleare e quello delle particelle elementari si caratterizza con scambi di energia attorno la scala elettrodebole, che danno luogo al plasma quark-gluonico (QGP). Di fatto un nuovo stato della materia sperimentalmente studiato al di sopra di una temperatura critica di circa 150 MeV per nucleone e corrispondente a  $1.66 \times 10^{12}$  K.
61. Tutti i metodi per trattare tale situazione (teorie di gauge sul reticolo, corrispondenza AdS/CFT, stati skyrmionici) sono di tipo non perturbativo: gli effetti delle autointerazioni combinati con gli effetti quantistici rendono la situazione complessa (nel senso tecnico). Il QGP è il tipico esempio di sistema fisico non trattabile con una procedura di correzioni successive ad uno con proprietà ben note, che faccia da riferimento e guida.
62. La Fisica Nucleare è il prototipo di una stratificazione della Natura, in questo caso segnata dalla scala elettrodebole. La sua riduzione a una teoria più fondamentale è concettualmente proficua alla transizione di fase. In regimi distanti dalla transizione si sta facendo Fisica qualitativamente differente. Risalire dalla teoria fondamentale a quella effettiva è una procedura elaborata, non univoca, né utile in molti casi. I prodotti finali della teoria fondamentale diventano gli oggetti elementari della teoria effettiva, posseggono una loro stabilità e delle proprietà specifiche. In generale non esistono semplici regole che le determinano. Nella maggior parte dei fenomeni che li riguardano tali proprietà sono descrittivamente au-

tonome da quelle dei costituenti, perché da essi emergono da effetti collettivi in sistemi particelle identiche in interazione. L'Universo non sembra tanto una *matrioska*, né un castello di Lego, piuttosto ricorda il Giardino delle Delizie di Hyeronimus Bosch, per di più dilatato in varie dimensioni.

63. Questo quadro si ripresenta a livello atomico, dove le interazioni elettromagnetiche determinano la fenomenologia a scale di energia dell'ordine dei KeV o meno, o a livello molecolare a scale dell'ordine dell'eV o meno.
64. A queste scale si verifica quasi tutto quello che possiamo percepire come fenomeno macroscopico e, in particolare, le strutture che effettivamente partecipano ai processi biologici. Pur essendo lontanissimi dalle scale di energia, tempo e lunghezza della fisica fondamentale, la Meccanica Quantistica funziona ancora per inquadrare il comportamento e le principali proprietà di tali oggetti, alcuni ingenuamente semplici, quali i metalli, altri molto complessi come le proteine e gli acidi nucleici. Ci stiamo avvicinando ad un regime talvolta chiamato semiclassico: ogni grandezza fisica osservabile in dato sistema e che abbia le dimensioni di una azione è molto più grande di  $\hbar$ , ma non infinitamente grande. Allo stesso tempo la nozione di dualità onda-corpuscolo tende a sfumare, poichè le lunghezze d'onda di de Broglie delle particelle che si vogliono descrivere tende ad essere molto più piccola delle stesse particelle. La situazione è simile a quella realizzata nelle stampe di M.C. Escher quando gli uccelli si liberano dalle figure geometriche: non sono più rombi, non sono ancora anatre in volo.
65. Bisogna essere accorti però in questo percorso di avvicinamento. Un pezzo della nostra automobile non è tale perché abbiamo semplicemente accostato degli atomi di ferro, ad esempio, né una catena di DNA è tale perché abbiamo rimestato assieme una manciata di acidi nucleici. Esattamente come una città non è un semplice agglomerato di case.

66. Dal punto di vista fisico-matematico sta accadendo qualcosa di estremamente importante e spesso sottovalutato: le strutture concettuali fondanti la Meccanica Quantistica, basate sul concetto di sovrapposizione lineare degli stati e la loro evoluzione di primo ordine, si sta "ripiegando" in quelle della Fisica Classica, tipicamente non lineare, e in una evoluzione del secondo ordine (nella prospettiva newtoniana). Non è una questione tecnica, si tratta di come noi descriviamo ed interpretiamo l'Universo in una regione di confine.
67. Nel caso dei metalli, o dei cristalli più generalmente, il segreto sta nel fatto che il collante (gli elettroni) è costituito da particelle identiche, come accennato al punto 35. Questo comporta che dall'ammasso di singoli atomi emerga la struttura a bande, la stabilità della fase macroscopica, la conducibilità elettrica e termica, le proprietà ottiche e meccaniche. Quindi, se di fatto l'unica forza, interazione, residua è quella elettromagnetica, la struttura geometrica profonda della nostra concezione di spazio-tempo continua ad agire, così come la nostra incapacità, imposti nella Meccanica Quantistica, di conoscere i dettagli di orbite e moti.
68. In maniera simile, molecole stabili si combinano con deboli legami ad idrogeno alla scala di  $\approx 10^{-1}$  eV, si creano così le flessibili e plastiche strutture proteiche. Ancora una volta ad un salto di scale di energie, e in corrispondenza di tempi e lunghezze tipiche, nuove entità elementari emergono dalle precedenti strutture, che intervengono in maniera relativamente marginale nelle funzioni caratteristiche espresse dalle nuove. La struttura degli orbitali molecolari e dei legami ad idrogeno offrono delle funzionalità sorprendenti, che è difficile descrivere in termini del comportamento di singoli elettroni e ioni. La sovrapposizione coerente di stati molecolari combina atomi e frammenti di molecole con una efficacia ben superiore alla nostra fantasia. Solo recentemente i chimico-fisici hanno sviluppato tecniche di calcolo approssimato, che consentono di progettare molecole che non esistono in Natura, o che forse semplicemente questa le ha rigettate per qualche motivo ancora a noi oscuro. Idea verso la quale protendo.
69. Il panorama diventa quindi molto più disomogeneo, con nuovi e molteplici attori, quasi un prodotto combinatorio di tutte le strutture molecolari. Ormai la Fisica fondamentale è lontana, quasi non agisce, e le forze dominanti, a parte la gravità, sono quasi esclusivamente forze effettive multipolari di origine elettromagnetica. Esse rimangono abbastanza intense da generare quasi ogni oggetto che vediamo, tocchiamo, annusiamo, gustiamo e, in definitiva, noi stessi. Ma loro .... da sole sono stupide!!!!.

## Materia Vivente

70. Le molecole organiche generano questo nuovo fantasmagorico gioco di Lego, potendosi assemblare in strutture microbiologiche: qualcosa che incomincia ad avere a che fare con la vita, avendo allo stesso tempo delle proprietà quantiche, come recentemente è stato evidenziato, assieme a spiccate caratteristiche di particelle classiche. Tipicamente esse interagiscono in maniera anisotropa, formando tessiture omogenee, che si alternano in varie fasi differenti. Spesso la creazione di strutture così complesse può consentire di passare ad una descrizione continuista della materia, elastica o plastica, abbandonando progressivamente la granularità molecolare. Ad esempio basti ricordare come da un doppio strato di molecole fosfolipidiche, si passi al prototipo di membrana cellulare descritto dall'approccio mesoscopico di Helfrich-Landau.
71. In questa progressiva strutturazione dell'Universo per scale, sempre più chiaramente emergono due aspetti: la nozione di tempo, distinto dallo spazio, e il valore dell'informazione. Questo indica che, anche se le caratteristiche chimico-fisica di una certa sostanza definiscono il suo stato, la stessa osservazione ne modifica più o meno ampiamente i valori in relazione al contesto (ambienti acido/basici, presenza di catalizzato-

ri, condizioni luminose e di radiazione, temperatura, isomeria, fase allotropica etc....) nel quale le stesse vengono osservate. Il modo in cui lo stato della sostanza cambia, a causa di questa interazione contestuale, fornisce solo informazioni parziali su come essa si possa comportare in ambienti differenti. Chiaramente questi diversi comportamenti sono la segnatura della struttura quantistica e microscopica delle (macro)molecole, che si estende nel mesoscopico. Se ci immaginiamo le molecole come oggetti che codificano dell'informazione, ridotta a cavallo tra il quantico e il classico, diventa molteplice e dipendente dall'ambiente in cui essa viene estratta e manipolata. In qualche modo, l'indeterminazione quantistica si sta trasferendo in una sorta di indeterminazione dell'informazione, che può assumere uno spettro di espressioni contestualmente significative, che coesistono con un certo livello di coerenza, prima di venir fissate dalla nostra misura in un valore preciso.

72. A causa della struttura molecolare della materia compaiono forze medie macroscopiche, che per semplicità chiamiamo attrito o viscosità. Esse quasi dominavano la fisica aristotelica. In effetti, in molti casi, sappiamo come calcolarle dai principi primi con i metodi propri della Fisica Statistica che, operando su energia e entropia, sta considerando in blocco ogni informazione estraibile dal sistema. Gli effetti a scala macroscopica delle forze dissipative possono essere inseriti esplicitamente in modelli di Fisica Classica e possono dar luogo a parecchi problemi tecnici, alcuni dei quali tuttora irrisolti. Il problema non nasce dall'attrito in quanto tale, ma dalla cascata di scale spazio-temporali alle quali l'energia del sistema complessivo viene progressivamente trasferita grazie alla sua azione. In genere, lo studio di questo aspetto è condotto con metodi statistici e, in parte, con quello dei **sistemi complessi**. Dal punto di vista della descrittiva matematica, tali forze corrispondono a flussi (continui o discreti) privi di struttura simpletica: il gioco è fatto (!?!).

73. L'importanza di tali forze effettive è chiara-

mente basilare per la vita quotidiana: basta provare a correre in una palude o su una pista da pattinaggio, oppure toccare una lampadina ad incandescenza ed una a LED accese, per capirne palpabilmente la differenza. Senza ombra di dubbio la capacità di controllo, utilizzo, riduzione, esaltazione di tali forze costituisce almeno il 90% di tutte le attività tecniche svolte sulla faccia della Terra, sia da esseri umani che non.

74. Tali forze, ovviamente, non hanno nulla a che fare con la Storia, che si colloca su uno strato dell'Universo totalmente differente e, in definitiva, irrilevante per esso nel suo complesso, se non per il fatto che vogliamo viverci e raccontarlo. Sicuramente possono produrre molte analogie e suggestioni, come in Economia e nella Finanza senza truffatori. Ma a volte la Storia sembra solo il racconto di un pazzo, per dirla con re Lear.

## Realtà e Fantasia

75. L'idea di **sistema complesso** è intrinseca alla al processo di sviluppo delle scienze. L'ampliamento delle scale spaziali/temporali relative di osservazione simultaneamente considerate, nonché di energia e di capacità di informazione, inducono ad arricchire il livello delle nostre descrizioni. Ma tale processo non può essere condotto in maniera meccanica, ma piuttosto evidenziando i punti critici delle nostre teorizzazioni. Infatti non è necessario che il sistema possieda molti gradi di libertà, ma più semplicemente sia sensibile alle condizioni iniziali, oppure alle condizioni al bordo. Per la cronaca, vorrei ricordare che il concetto di sensibilità alle condizioni iniziali fu discussa per la prima volta da Maxwell, poi 30 anni dopo da Boussinesq e Poincaré. Nella previsione meteorologiche, l'idea iniziò il suo viaggio nel 1898, come effetto cavalletta in una recensione di un libro di W. S. Franklin. Nel 1963 Lorenz attribuì un effetto gabbiano a un meteorologo anonimo, e nel 1972 lo riconfezionò come effetto farfalla.

D'altro canto un sistema complesso è di per sé un interessante oggetto di interesse scientifico, nel quale lo scienziato desidera porre un ordine, una gerarchia di relazioni (scale), una implicita sottrazione dalla indeterminazione. Ma questi aspetti sono costitutivi della struttura delle nostre teorie. Quindi nuovi concetti appaiono sulla scena, quali quelli di caos deterministico e di sistemi integrabili.

In aggiunta, ancora una volta riappare in questo contesto l'aspetto dell'informazione. Infatti, da tale punto di vista è possibile ordinare i sistemi di nostro interesse in più o meno complessi in relazione a quante linee di programma (algoritmo) siano necessarie per simulare la sua dinamica. In definitiva il moto perfettamente regolare del pendolo e l'estrazione di numeri (pseudo)casuali hanno circa lo stesso ordine di complessità (bassa), come anche la dinamica degli asteroidi e i fenomeni meteorologici (alta).

76. I sistemi complessi costituiscono un vasto e attivo campo di ricerche in Fisica Classica (tipicamente), ma con risvolti non secondari anche a livello fondamentale, come per esempio ai punti 58.-59., in meteorologia e climatologia, nella Fisica dei plasmi, in ogni caso in cui gli effetti non lineari, eventualmente con la presenza di contributi dissipativi, giochino un ruolo significativo per le scale di energia e spazio-temporali di interesse. Questo, ed altri aspetti, possono essere l'origine di moti disordinati, benché deterministici. Perciò spesso si collegano direttamente i sistemi complessi al caos deterministico, che amplificano piccole ed arbitrarie perturbazioni locali (il cosiddetto effetto farfalla). Naturalmente questo è solo una parte del racconto, in generale semplicistico ed ingenuo.

77. Il quadro classico dei sistemi complessi ha la sua controparte quantistica: essa è ben nota e non priva di problematiche, facendo in genere riferimento ai sistemi aperti quantistici e al cosiddetto caos quantistico. Questo ha caratterizzazioni ben diverse dal caso deterministico, riferendosi alle proprietà statistiche dello spettro degli osservabili, piut-

tosto che alla struttura dei campi vettoriali. Tale settore ha contribuito enormemente allo sviluppo della cosiddetta quantum technology, ma getta importanti riflessi su ambiti, lontani dalla Fisica, nei quali le analogie con il mondo quantistico diventano preponderanti (Scienze Cognitive e Processi decisionali).

78. La visione di Poincaré sul caos deterministico consistente nella coesistenza tra instabilità locale (orbite periodiche instabili) e miscelazione globale (intreccio delle loro varietà stabili e instabili) risulta molto potente. In un sistema caotico conservativo una qualsiasi sfera aperta di condizioni iniziali, non importa quanto piccola, in un tempo finito si sovrapporrà a qualsiasi altra regione finita e in questo senso si estenderà sull'intero spazio degli stati asintoticamente accessibili. Una volta compreso ciò, il focus della teoria si sposta dal tentativo di prevedere le traiettorie individuali (cosa impossibile) a una descrizione della geometria dello spazio dei possibili risultati e alla valutazione delle medie su questo spazio. Una teoria della dinamica caotica per attrattori di bassa dimensione viene visualizzata come una successione di moti quasi periodici ma instabili. La Meccanica Statistica trae giustificazione in questa visione.

79. Tuttavia i comportamenti complessi (imprevedibili) non sono necessariamente il risultato della struttura complicata di un sistema (per esempio un elevato numero di componenti), ma possono essere presenti anche in sistemi a bassa dimensionalità. In secondo luogo l'approccio metodologico secondo il quale si cerca di comprendere (e controllare) i comportamenti di un dato sistema a partire solo dalle equazioni che regolano le interazioni delle sue parti possono fallire, perché trascurano condizioni iniziali, emergenza di coerenza non lineare, stabilizzazione topologica, frustrazioni di bordo. In altri termini conoscere la sola equazione di Navier-Stokes non significa aver compreso la turbolenza. Terzo, i sistemi complessi possono nascondere strutture integrabili, che preser-

vano su scale temporali molto lunghe le energie dei modi nonlineari. Questo comporta che si possono instaurare moti quasi periodici, rallentando in maniera significativa i processi di avvicinamento al caos e la termalizzazione del sistema. D'altro canto un moto quasi periodico può risultare indistinguibile da un moto caotico, se esso viene studiato su un intervallo di tempo relativamente breve. Questo relativamente potrebbe essere riferito anche a scale geologiche o del sistema solare.

80. Una caratterizzazione di turbolenza è ancora più difficile da trovare. Intuitivamente, la parola si riferisce al comportamento irregolare di un sistema dinamico a dimensione infinita descritto da equazioni deterministiche del moto. Ma in pratica con turbolenza ci si riferisce a dinamiche disordinate che noi descriviamo solo in termini statistici. Non appena un fenomeno viene compreso meglio, viene rivendicato e ribattezzato: una rotta verso il caos, caos spazio-temporale e così via. Penseremo alla turbolenza nei sistemi spazialmente estesi in termini di *pattern* spazio-temporali ricorrenti. In modo figurato, la dinamica guida un dato sistema spazialmente esteso (nuvole, per esempio) attraverso un repertorio di schemi instabili, eventualmente vincolati da proprietà geometriche globali. Mentre osserviamo evolversi un sistema turbolento, ogni tanto scorgiamo uno schema familiare. Per ogni risoluzione spaziale finita, un flusso deterministico segue approssimativamente per un tempo finito un modello instabile, appartenente a un alfabeto di modelli ammissibili. Le dinamiche a lungo termine possono essere pensate come un cammino in un certo spazio di modelli.

81. L'idea di pattern fa riferimento agli aspetti geometrici globali di una certa configurazione. Pertanto la loro struttura può essere categorizzata e essere discussa con svariati metodi, che vanno dal calcolo numerico, che ora assume il ruolo di laboratorio sperimentale di modelli, allo studio qualitativo delle equazioni differenziali e alle differenze. Tutti metodi che intersecano

la geometria combinatoria e l'analisi degli spazi dei moduli delle curve, i sistemi integrabili classici e quantistici, le varietà di Frobenius e loro simmetrie, gli invarianti della geometria algebrica, la *teoria dei nodi*, le equazioni di Yang-Baxter e le algebre associate, la teoria delle grafi, delle matrici random e dei vetri di spin e tanti altri campi della Matematica moderna. Molti di essi sono stati stimolati in origine dalla teoria delle stringhe e dalla teoria dei campi quantistici e, in forma nuova, ritorna il problema degli osservabili e della loro (in)compatibilità, ovvero la domanda di cosa, come e quanto possiamo spingere la nostra conoscenza. D'altro canto sembra proprio che "la Matematica è come il maiale: non se ne butta via nulla", con Descartes.

82. D'altra parte con sette note e un numero finito di pattern ritmici si è prodotta e riprodotta tutta la musica ascoltabile sotto ogni latitudine e dai primordi dell'umanità. Tutto il resto è rumore.

83. L'analisi dei sistemi complessi nell'intorno dei punti di stabilità ha condotto allo sviluppo della **teoria del controllo**, che ha come concetto centrale quello di **retro-azione**. La teoria, originatesi dai lavori di Maxwell sul regolatore di Watt, costituisce una delle principali applicazioni della matematica all'ingegneria, per il controllo di processi industriali, ma è centrale ovunque si verifichi retroazione, quali le scienze della vita, nell'informatica, nella ricerca operativa e nelle scienze sociali. I nostri laboratori sono concettualmente e concretamente concepiti sulla base dei criteri del controllo.

84. I sistemi complessi sono a volte invocati per le analogie che sussistono con i sistemi biologici, ma spesso si tratta di descrizioni parziali e valide per alcune fenomenologie particolari. In primo luogo perché l'**auto-organizzazione** e i **processi dissipativi** hanno a che fare solo con alcuni aspetti dinamici della Biologia, che invece attiene al perché noi nasciamo, generiamo e moriamo. Direi

che si tratti di qualcosa di più direttamente coinvolgente.

85. Dal punto di vista dei sistemi complessi, quelli biologici sono aperti e non autonomi (cioè esplicitamente dipendenti dal tempo), caratteristiche non obbligatorie per i sistemi generali. L'energia fluisce assieme ai e nei materiali. Prodotti di scarto vengono sottratti dal processo vitale, assieme a calore che contribuisce alla produzione di entropia globale. Ma a livello locale gli organismi viventi sono sistemi anti-entropici. Pertanto si può arguire che i sistemi viventi in equilibrio dinamico consistano di processi ciclici, a produzione nulla di entropia, debolmente accoppiati a processi dissipativi con produzione positiva di entropia. Allo stesso tempo, la dominanza locale nel tempo dei processi conservativi garantisce una parziale permanenza di strutture coerenti.
86. Nei sistemi biologici la dipendenza dal tempo può avere varie caratteristiche legate sia all'ambiente esterno, che all'ampiezza dei cicli interni al sistema: riconoscere quale sia il processo dominante, quali risonanze e secolarità vengano eccitate, quali (in)stabilità parametriche siano incrociate, in definitiva: cosa si vuole osservare in un certo sistema è un'operazione non univoca. Combinazioni di queste possibili situazioni sono ben studiate con i metodi geometrici, analitici e soprattutto numerici, tanto che è stata coniata l'espressione specifica *in silico*. In definitiva i sistemi dinamici (più o meno complessi) possono simulare fasi del metabolismo dei sistemi biologici, ma ancora non fanno figli, la descrizione dell'ereditarietà e dell'evoluzione si limita a modelli qualitativi. Qualcosa di nuovo deve essere preso in considerazione: il ruolo dell'informazione in un certo contesto.
87. Qualcosa di simile accade nel dominio delle scienze cognitive. In quell'ambito i giudizi e le decisioni possono essere descritti come processi intrinsecamente non deterministici, implicanti un'interazione contestuale tra un'entità concettuale e il contesto cognitivo che la circonda. Quando viene considerato

un dato fenomeno, il quadro teorico analogo di quello quantistico identifica entità, stati, contesti, proprietà e statistiche sui risultati e applica il formalismo matematico della meccanica quantistica per modellare il fenomeno considerato. Naturalmente questo schema può essere esteso alle scienze sociali ed economiche, nelle quali possono innescarsi dei fenomeni di contestualità e di auto-interazione osservatore-osservato. In effetti, già quasi settanta anni fa Isaac Asimov aveva alluso a tutti questi aspetti nel suo *Ciclo delle Fondazioni* [4], immaginifica triade di romanzi fantascientifici.

88. Uscendo dal seminato, in relazione alla costruzione del nuovo fantascientifico impero, cioè all'aspetto politico dei sistemi complessi, personalmente sono molto scettico. Di solito i politici dicono che un problema è complesso, se non hanno molta voglia di affrontarlo. Dall'altra parte politica, lo stesso problema diventa semplice, perché si è già trovato qualcuno al quale affibbiare la responsabilità del probabile insuccesso.

## Informazione - Atto II

89. Poiché le molecole che intervengono negli organismi viventi codificano dell'informazione, corrispondente a processi ciclici a produzione di entropia nulla (ovvero capacità di informazione costante), questa loro proprietà si deve manifestare al massimo grado negli acidi nucleici: RNA e DNA, in particolare. Ma naturalmente informazione non significa solo una collezione di dati ma, come ci ha spiegato Turing, anche un programma di elaborazione dei dati. Quanto questa analogia possa essere portata avanti non è chiaro, ma potrebbe essere una via d'uscita all'impasse in cui si infilano da soli i sistemi complessi.
90. Quindi in qualche forma la Biologia si occupa di informazione algoritmica e di come essa si sviluppi. In questo senso il DNA è pensabile come una sorta di software naturale, una sorta di linguaggio di programmazione (quindi formale e formalizzabile)

universale (per quello che ne sappiamo), che si trova in ogni cellula e che presumibilmente può esprimere ogni algoritmo possibile, ogni insieme di istruzioni per costruire e far funzionare un organismo. Naturalmente quanto descritto è una analogia con quanto attiene il *software* artificiale, che stiamo iniziando a manipolare e costruire metodicamente solo da una settantina d'anni. Nulla a che vedere con i 3-4 miliardi di anni a disposizione della Natura e con tutte le sue risorse a disposizione. Rimane il fatto che si è spostata l'attenzione da come sia fatto l'organismo (l'*hardware*) al chi comanda le sue funzioni (cioè il *software*), il quale può evolvere e cambiare eventualmente l'organismo stesso.

91. Idee di questo tipo furono già da tempo avanzate da Fred Hoyle negli anni '80 del secolo scorso, ma naturalmente mancavano ancora metodi su come concretizzarle in un ragionamento formalizzato. Mancava, manca ancora, soprattutto quella visione globale che consente di farci passare dalle selvagge fluttuazioni quantistiche dei campi, a qualcosa di più classico, ma estremamente creativo e plastico, che si riscontra nel mondo vivente. Basti, anche per il loro carattere artistico, rileggersi *Kunstformen aus der Natur* di Ernst Haeckel [6].
92. Una chiave, non l'unica certamente, potrebbe essere quella di interpretare il mondo naturale come una grande *software factory*. Qualcosa che vagamente assomiglia a quanto preconizzato da S. Wolfram in *A new kind of Science*, [5] ma sul quale personalmente non metterei la mano sul fuoco. Il singolo algoritmo può funzionare su macchine diverse, anche se in qualche modo compatibili. Eventualmente esso può modificarsi, sia per modificare il funzionamento della macchina, che per modificare la macchina stessa in qualche modo. Questa idea potrebbe essere alla base di quella di evoluzione, ma naturalmente va ancora sostanziata.
93. In primo luogo ci si deve confrontare con l'incommensurabile mole di lavoro conoscitivo e di elaborazione teorica portata avan-

ti da generazioni di biologi, genetisti, microbiologi e paleontologi. In secondo luogo si corre il rischio di reinterpretare i fatti con il senno del poi. Terzo, bisogna conciliare questa idea di evoluzione, in nuce darwiniana, con altre ipotesi altrettanto validamente sostenute dai fatti sperimentali. Come ad esempio quella, avanzata da S. J. Gould in *Wonderful Life* [7] sul ruolo che la contingenza possiede nel plasmare l'evoluzione. Egli si basa sulla descrizione della fauna cambriana, sottolineando i bizzarri disegni anatomici di molte specie, la loro improvvisa comparsa e il peso che il caso gioca nel determinare quali membri possano sopravvivere. Su questa e molte altre questioni i naturalisti hanno un grande e vivace dibattito interno e in esso, per quanto possa esserne interessato, è molto difficile contribuire con argomenti solidi.

94. Di più immediato interesse per un analogo ipersemplicato di sistema biologico è porsi il problema dell'esistenza di algoritmi autoriproducentesi. A questa domanda rispose J. von Neumann in una conferenza del 1951 [8]. Von Neumann si ispira al concetto di macchina di Turing universale. (Questo è ancora una macchina di Turing, alla quale vengono dati in ingresso una descrizione formale della specifica macchina da simulare più le istruzioni che questa deve svolgere. La finitezza delle istruzioni descrittive e di quelle da eseguire garantiscono la finitezza della istruzione complessiva) Generalizzando queste idee, von Neumann concepisce un sistema di tre macchine di Turing. La prima delle quali A è universale, che produce a seguito di una certa istruzione  $\mathfrak{S}$  un nuovo automa A', piuttosto che una successione numerica. La seconda B semplicemente copia le istruzioni  $\mathfrak{S}$  date ad A. La terza C controlla che prima operi A e poi B, a seguire C fornisce la copia delle istruzioni  $\mathfrak{S}$  ad A' ed, infine, separa questa entità dalla precedente terna, complessivamente indicata con D. Poiché questo è ancora un automa di Turing, descritto da certe istruzioni  $\mathfrak{S}_D$ , che possono essere di nuovo fornite ad A, ripetendo il processo. In particolare se l'istruzione  $\mathfrak{S}$

è tale che  $A' = A$ , allora il sistema  $(\mathfrak{S}_D, D)$  si autoriproduce, altrimenti il sistema degenera. A questo punto è chiaro che l'istruzione  $\mathfrak{S}_D$  è qualcosa di simile ad un gene e che la funzione di  $B$  è quella di duplicare il patrimonio genetico. D'altro canto è chiaro che  $A$  è alla base della riproduzione di un oggetto che è più complesso di sé stesso, il che ci suggerisce l'idea che opportune modifiche delle istruzioni  $\mathfrak{S}$  ci consentono di costruire nuovi automi auto-riproducibili, distinti da  $(\mathfrak{S}_D, D)$ . Ci troviamo di fronte al fenomeno della **mutazione**. Chiaramente questo mondo fatto di sola informazione non rappresenta che in maniera vagamente analogica quello del più semplice organismo vivente sulla faccia della Terra. Però, forse, è anche una maniera per descrivere il Covid, che per giunta fa fare a qualcun altro il lavoro di  $B$ !

95. Il lavoro di von Neumann proseguì con S. Ulam, che aveva anche lavorato con Fermi alla famosa catena quasi-integrabile non lineare di FPU, oggetto di studio ancora oggi. Sviluppando l'idea di automa auto-riproducibile di von Neumann sviluppò quella che oggi si chiama la teoria degli **Automi Cellulari**.
96. Lo schema di automa di von Neumann può essere utilizzato per provare alcuni meccanismi evolutivi molto semplificati. Per esempio verificare se successioni di mutazioni casuali possono produrre organismi (automi) più complessi, nel senso che riescono a fare qualcosa di meglio rispetto ai progenitori. Naturalmente non è detto che questo sia veramente quello che accade in Natura, ma ci può somigliare, almeno in qualche caso.
97. A questo scopo G. Chaitin [9] ha proposto di studiare la famiglia di algoritmi detto dell'**alacre castoro**. Questi algoritmi sono macchine di Turing a  $n$  stati che si fermano dopo un numero massimo  $S(n)$  di passaggi, quando viene avviato su un nastro inizialmente vuoto. Tale funzione cresce più che fattorialmente e quindi non è computabile. Allora si potrebbe partire da un certo algoritmo che si ferma dopo un certo numero di passi e si verifica che esso abbia raggiunto

$S(n)$ . Se questo non accade, si potrebbero effettuare delle mutazioni casuali su di esso nello spazio di tutti gli algoritmi, verificando che il nuovo organismo faccia meglio del precedente. In tal caso si procede eventualmente col nuovo, altrimenti si torna al vecchio e si riprova. La probabilità con cui compaiono le mutazioni dipende dalla loro lunghezza in termini di bit di istruzione, precisamente a  $K$  bit corrisponde una probabilità  $2^{-K}$ . Naturalmente  $-\log_2$  di questa probabilità corrisponde alla variazione di capacità di informazione tra il nuovo ed il vecchio algoritmo. Dallo spazio degli algoritmi, però, bisogna escludere mutazioni che ne producono di quelli che non si fermano. Ma questo è un altro problema non computabile e bisogna ricorrere a metodi speciali, ovvero ad un **oracolo**. Una volta capito come è fatto lo spazio degli algoritmi (gigantesco!!) del tipo alacre castoro (o del bravo matematico?!) basterà sommare le probabilità di ogni singola mutazione corretta di  $K$  bit sul loro numero per ottenere formalmente una quantità non computabile, che viene identificata con la **probabilità di fermata**  $\Omega$  per una generica macchina ad  $n$  stati. Equivalentemente questo numero può essere stimato dal basso, effettuando una camminata aleatoria nello spazio degli algoritmi. Naturalmente quanto tempo occorra dipende da quante mutazioni buone o cattive si incontrino. Supponiamo che ognuna di esse segni una unità di tempo, quindi il loro numero indica quanto tempo occorra per trovare  $S(n)$ . Sono possibili almeno tre scenari per queste possibili camminate.

- a) Si fanno sempre e solo le migliori mutazioni e si calcola  $S(n)$  in  $n$  passi. Questo corrisponde al cosiddetto **disegno intelligente** o **creazionismo**.
- b) Si seguono tutte le possibili mutazioni ammissibili partendo sempre dallo stesso automa originario e si calcola  $S(n)$  in  $2^2$  passi. Questo corrisponde a generare tutti i possibili organismi discendenti da un unico progenitore.
- c) Si procede per passi casuali, ma partendo dall'automa generato nella

mutazione precedente.

Il valore di  $S(n)$  è stimabile tra  $n^2$  e  $n^3$  passi. Da questo punto di vista l'evoluzione casuale cumulativa procede molto più speditamente della ricerca esaustiva, ma più lentamente di quella del disegno intelligente.

98. Se i principi di questo calcolo fossero sensati, allora saremmo di fronte alla possibilità di andare a verificare quantitativamente la corrispondenza tra realtà sperimentale e modello teorico e, quindi confutarlo o accettarlo. Il che naturalmente potrebbe avere un riflesso sull'inquadramento teorico dell'evoluzione darwiniana e delle sue varianti.

In secondo luogo, vorrei far notare che la menzionata probabilità di fermata è molto simile alla familiare funzione di partizione per un modello di Ising in  $n$  dimensioni o ad altri analoghi sistemi della Fisica Statistica. In un certo senso il cerchio energia-informazione si chiude!!!

## Conclusioni

Riassumendo la camminata di Pollicino, si potrebbe dire che il lavoro scientifico consiste in una riorganizzazione costante, ma non senza fratture e discontinuità, delle rappresentazioni dell'Universo empirico in strutture teoriche, che hanno come prima impellenza quella di essere comunicabili (matematizzabili) ed estendibili alla più ampia gamma di fenomeni. Questo corrisponde a riconoscere l'aspetto dell'informazione come inerente alla struttura dell'Universo, sia come capacità sia come valore contestuale. Questo flusso informativo è associato ad un analogo energetico, senza il quale non potrebbe sostenersi. Processi locali e strutture globali si influenzano e si determinano a vicenda, creando intere gerarchie di fenomeni collegate tra di loro e allo stesso tempo ben caratterizzate, al punto da avere significato intrinseco proprio. Questi flussi spianano sistematicamente ogni categorizzazione del pensiero limitato dello scienziato, il quale

pur tuttavia contempla e coglie l'intuizione di tale stato di cose, ben al di là degli schemi costruttivi delle teorie. In definitiva se è molto interessante (per alcuni) e profonda la teorie delle stringhe, è altrettanto (o forse più) profondo ed interessante lo studio del cervello che ha pensato quella teoria.



- [1] M. Ceccarelli: *Una betulla per la Pio. Appunti per insegnare la fisica (o per tentare di dimenticarla)*, Zanichelli, Bologna (1968).
- [2] E. Schrödinger: *What is Life?*, Cambridge University Press, Cambridge (1944).
- [3] T. S. Kuhn: *The Structure of Scientific Revolutions*, University of Chicago Press, Chicago (1996).
- [4] I. Asimov: *Cronache della Galassia*, Mondadori, Milano (1963).
- [5] S. Wolfram: *A New kind of Science*, Wolfram Media, Champaign (IL), USA (2002).
- [6] E. Haeckel: *Kunstformen der Natur*, Bibliographisches Institut, Leipzig und Wien (1899).
- [7] S. J. Gould: *Wonderful Life*, Norton, New York (NY), USA (1989).
- [8] J. von Neumann: *Cerebral Mechanisms in Behavior: The Hixon Symposium*. Lloyd A. Jeffress, Ed., Wiley, New York (1951).
- [9] G. Chaitin: *Proving Darwin: Making Biology Mathematical*, Pantheon Books, New York (NY), USA (2012).



**Luigi Martina:** è Professore Associato di Fisica Teorica presso l'Università del Salento. Si occupa di sistemi integrabili.

---

# Riduzionismo metodologico vs riduzionismo ontologico

**Claudio Garola** *Dipartimento di Matematica e Fisica "E. De Giorgi", Università del Salento.*

---

## 1. Considerazioni preliminari.

Vorrei discutere in questo intervento un punto di vista molto diffuso oggi tra i fisici teorici ma piuttosto problematico da un punto di vista epistemologico. Per evitare continue citazioni e riferimenti utilizzerò a questo scopo un libro [1] (brevemente, LiM nel seguito) che ho ricevuto recentemente in dono da un amico, Giorgio Immirzi, già docente di Istituzioni di Fisica Teorica presso l'Università di Lecce (oggi Università del Salento). In questo testo Sabine Hossenfelder persegue come scopo principale quello di dimostrare in modo accurato e documentato che in fisica teorica la scelta delle teorie accettabili fra le molte possibili è largamente influenzata da criteri estetici soggettivi, e che questo fatto può influire negativamente sul progresso della conoscenza. Per rendere la sua tesi comprensibile a lettori non specialisti, la Hossenfelder la accompagna con un'esposizione divulgativa dei concetti e dei risultati più importanti della fisica teorica contemporanea. Lo stile è brioso e piacevole, la divulgazione è ben fatta e la specifica critica epistemologica è corretta e ben documentata. Tuttavia dal mio punto di vista il libro è interessante soprattutto perché l'autrice, nel criticare un criterio epistemologico diffuso fra i suoi colleghi, accetta implicitamente una serie di assunzioni

epistemologiche tipiche di una parte consistente della comunità dei fisici teorici e problematiche almeno quanto quella messa in discussione. Fra queste, la mancanza di una distinzione fra contesto della ricerca e contesto della giustificazione e, soprattutto, il realismo delle teorie: la convinzione, cioè, che le entità teoriche fondamentali e le leggi delle teorie fisiche costituiscano entità reali e relazioni esistenti oggettivamente nel mondo. Dal realismo delle teorie seguono, in particolare, sia una concezione dei fondamenti della fisica come ricerca di una realtà ultima sottostante al mondo macroscopico con cui entriamo quotidianamente in contatto tramite i nostri sensi, sia soprattutto una visione riduzionista in senso ontologico che contrasta con la prudenza e con la consapevolezza dei limiti della metodologia riduzionista presenti in altri ricercatori. L'aspetto più curioso di tutto ciò è costituito dal fatto che la Hossenfelder, nel momento stesso in cui adotta il realismo delle teorie, cioè un'ipotesi di carattere metateorico che condiziona in modo decisivo gli indirizzi di ricerca, sembra condividere la convinzione, diffusa tra i fisici teorici, che la filosofia (spesso confusa con una sua branca particolare, la metafisica) sia irrilevante per l'impresa scientifica. Dedicherò pertanto questo mio intervento ad analizzare brevemente i punti

problematici elencati sopra basandomi sul testo della Hossenfelder. Eviterò invece di supportare le mie posizioni con ulteriori citazioni, per motivi di tempo e di pigrizia, ma anche perché credo che la maggioranza dei possibili lettori di queste pagine conosca le posizioni epistemologiche cui farò riferimento. Proporrò solo un ulteriore suggerimento di lettura nelle Conclusioni.

## 2. Contesto della scoperta e contesto della giustificazione.

La distinzione fra contesto della scoperta e contesto della giustificazione è stata ampiamente criticata da molti filosofi della scienza. Io ritengo tuttavia che essa possa - anzi, debba - essere mantenuta, intendendola non come distinzione tra fasi successive della ricerca ma come relazione dialettica e continua tra due tipi di attività concettuale che hanno statuti diversi. Il contesto della giustificazione, pur contenendo spesso elementi soggettivi e dipendenti dal momento storico, è normativo e fa riferimento a criteri fondamentali, come quelli di razionalità, coerenza logica e adeguatezza empirica. Il contesto della scoperta è invece estremamente variabile e soggettivo, e ogni sua analisi può essere solo descrittiva e suggerire al più criteri utili ma non normativi. Distinzioni di questo tipo possono apparire di scarso rilievo per chi è impegnato concretamente nella ricerca. Tuttavia anche gli specialisti non possono evitare di interrogarsi sul senso e sulle finalità del loro lavoro, e le risposte a questi interrogativi condizionano le direzioni e i modi della ricerca. Le distinzioni epistemologiche divengono allora importanti, e l'ignorarle può generare confusione. Consideriamo ad esempio la domanda che è alla base del testo della Hossenfelder: se sia lecito, cioè, utilizzare criteri estetici (almeno in parte soggettivi e storicamente determinati, anche se largamente condivisi) nello sviluppo e nella validazione delle teorie scientifiche. L'autrice osserva (LiM, pag 18):

*"In the twentieth century, aesthetic appeal morphed from a bonus of scientific theories to a guide in their construction"*

"Nel ventesimo secolo l'attrattiva estetica si è trasformata da un bonus

delle teorie scientifiche in una guida nella loro costruzione"

In questo ruolo *l'aesthetic appeal* appartiene al contesto della scoperta: una guida nella costruzione delle teorie, quindi legittima fonte di ispirazione e suggerimenti.

Tuttavia la Hossenfelder osserva subito dopo:

*"...until, finally, aesthetic principles turned into mathematical requirements."*

"... finchè, alla fine, i principi estetici si sono trasformati in condizioni matematiche."

e, successivamente (LiM, pag. 35):

*" But how are we supposed to decide what theory to work on before it's been tested? And how are experimentalist to decide which theory is worth testing? ... I don't think the criteria we use are very philosophical. Rather, they are mostly social and aesthetic."*

"Ma come dobbiamo fare per decidere su quale teoria lavorare prima che la teoria stessa sia verificata? E come devono fare gli sperimentali per decidere quale teoria merita di essere verificata? Non penso che i criteri che utilizziamo siano molto filosofici. Invece sono soprattutto sociali ed estetici."

In questa nuova prospettiva i criteri estetici sono diventati normativi e presiedono alla scelta delle teorie meritevoli di considerazione. Ed è questo ruolo che la Hossenfelder (giustamente, a mio parere) ritiene inaccettabile. Ma è chiaro allora che non esiste una risposta univoca alla domanda fondamentale posta sopra: la risposta dipende infatti dal contesto considerato.

## 3. L'idea di progresso.

A proposito del modo in cui una nuova teoria deve essere scelta fra le altre per essere confrontata con l'esperienza, la Hossenfelder scrive (LiM pag. 8):

*"There is so much existing data that doing all the necessary calculations for newly proposed theories simply isn't feasible. It is also unnecessary because there is a shortcut: We first demonstrate that a new theory agrees with the well-confirmed old theories to within measurement precision, thus reproducing the old theory's achievements. Then we only have to add calculations for what more the new theory can explain."*

"Ci sono tanti dati che fare tutti i calcoli necessari per le nuove teorie che sono proposte semplicemente non è fattibile. Ma non è nemmeno necessario perché c'è una scorciatoia: dapprima dimostriamo che una nuova teoria è in accordo con le vecchie ben confermate teorie entro i limiti di precisione delle misure sperimentali, e che quindi riproduce i risultati della vecchia teoria. A questo punto dobbiamo solo aggiungere i calcoli per quanto più che la nuova teoria può spiegare."

Questa proposta di scorciatoia appare piuttosto discutibile, perché è spesso accaduto in passato che fossero accettate teorie la cui capacità di riprodurre (entro i limiti di precisione delle misure) tutti i risultati conseguiti dalle teorie precedenti era quanto meno dubbia (un esempio ben noto è costituito dalla relazione problematica che esiste fra meccanica quantistica e meccanica classica). Essa è coerente con l'idea che la ricerca scientifica proceda con continuità alla scoperta di nuove verità naturali e sembra sottendere una concezione evolutiva delle teorie e del progresso della scienza che è stata contestata da molti filosofi, in particolare a causa del cambiamento di paradigma che avverrebbe quando una nuova, rivoluzionaria teoria scientifica sostituisce teorie precedenti. In ogni caso, la scorciatoia in questione non è stata percorsa se non parzialmente nell'effettiva evoluzione storica delle discipline, e la storia della scienza suggerisce che essa possa portare a escludere proprio quelle teorie che si riveleranno successivamente vincenti.

## 4. Il realismo delle teorie.

L'attribuzione di uno *status* ontologico alle entità teoriche e alle leggi che compaiono in una teoria fisica costituisce una scelta filosofica che può apparire a prima vista irrilevante da un punto di vista scientifico. In realtà una scelta di questo tipo può condizionare profondamente la formazione delle teorie e la direzione in cui indirizzare la ricerca. Tuttavia essa è largamente praticata, a volte esplicitamente, più spesso in modo implicito, anche da parte di scienziati che, se interrogati, affermerebbero di evitare nella ricerca qualsiasi ipotesi metafisica. Il testo della Hossenfelder fornisce un tipico esempio di accettazione di una prospettiva realista in senso ontologico. L'autrice scrive infatti (LiM, pag.7):

*"It's these twenty-five particles that you, I and everything else in the universe are made of. ... And the most important lesson we have learned is that nature plays by the rules of mathematics."*

"È di queste venticinque particelle che tu, io e tutto quanto esiste nell'universo siamo fatti. ... E la più importante lezione che abbiamo imparato è che la natura gioca con le regole della matematica. "

E, successivamente (LiM, pag. 45):

*"Matter is made of molecules, which are made of atoms, which are made of standard model particles."*

"La materia è fatta di molecole che sono fatte di atomi che sono fatti di particelle del modello standard."

Affermazioni di questo tipo ignorano il fatto, ben noto agli epistemologi e agli storici della scienza, che i dati empirici, necessariamente in numero finito, determinano una classe di teorie capaci di spiegarli, non una singola teoria (sotto-determinazione delle teorie). Il limite alle possibili spiegazioni è costituito essenzialmente dalle nostre capacità di immaginazione e di elaborazione. Questo solo fatto, a mio parere, dovrebbe mettere in seria difficoltà una concezione del realismo che tende ad attribuire

uno *status* ontologico alle entità teoriche e alle leggi di una specifica teoria fisica: anche se è psicologicamente comprensibile che, data l'enorme complessità dei dati attualmente in nostro possesso, l'unica teoria efficiente che siamo stati capaci di escogitare per spiegare i fenomeni che avvengono a livello subatomico sia in qualche modo sacralizzata. Solo presentando il modello standard e la simmetria di gauge la Hossenfelder è colta da un dubbio sulla realtà dello spazio interno e preferisce prendere le distanze dai colleghi il cui realismo si spinge fino a considerare reali le entità matematiche che compaiono nelle teorie fisiche, scrivendo (LiM, pag. 52):

*"Yes, but is it real? ... Depends on whom you ask. Some of my colleagues indeed believe that the math of our theories, like those internal spaces, are real. Personally I prefer to merely say it describes reality, leaving open whether or not the math itself is real."*

"Sì, ma è reale? ... Dipende dalle persone interpellate. Alcuni miei colleghi credono infatti che le entità matematiche delle nostre teorie, come quegli spazi interni, siano reali. Personalmente, preferisco semplicemente affermare che la matematica descrive la realtà, lasciando aperto il problema se la matematica stessa sia reale. "

Nonostante queste riserve, l'autrice mantiene una concezione realistica in senso ontologico e ne accetta fino in fondo le conseguenze. Questo aspetto del testo è interessante perché non sempre chi assume una posizione di realismo ontologico ne analizza tutte le implicazioni. In particolare, per quanto riguarda i fondamenti della fisica la Hossenfelder scrive (LiM, pag. 6):

*"The foundations of physics are those ingredients of our theories that cannot, for all we presently know, be derived from anything simpler."*

"I fondamenti della fisica sono quegli ingredienti delle nostre teorie che non possono, per quanto ne sappiamo attualmente, essere ottenuti da qualcosa di più semplice."

E, successivamente (LiM, pag. 45):

*"The standard model particles plus space and time are, for all we currently know, fundamental - they are not made of anything else. In the foundations of physics, we are trying to find out if there is something even more fundamental. "*

"Le particelle del Modello Standard più lo spazio e il tempo sono, per quanto ne sappiamo al momento, fondamentali-esse non sono fatte di niente altro. Nei fondamenti della fisica noi stiamo cercando di trovare se c'è qualche cosa di ancora più fondamentale. "

Si propone così una concezione dei fondamenti della fisica condizionata da una scelta filosofica di carattere metafisico e non coincidente con altri modi di intendere i fondamenti, ben noti in letteratura (e.g., studio di problemi matematici di base posti dalla teoria, assiomatizzazione e/o fondazione operativa delle teorie, ecc.). Ed è riferendosi a questa concezione che, successivamente, la Hossenfelder riassume una diffusa interpretazione della nozione di emergenza, scrivendo (LiM, pag. 45):

*" "Emergent" is the opposite of "fundamental", which means that an object cannot be further decomposed and its properties cannot be derived from a more accurate theory."*

" "Emergente" è l'opposto di "fondamentale", che significa che un oggetto non può essere ulteriormente decomposto e che le sue proprietà non possono essere derivate da una teoria più accurata."

Tuttavia, pur riconoscendo che, quando si modifica l'ordine di grandezza dei fenomeni che si considerano (in gergo tecnico, le scale si separano), ogni livello di risoluzione ha il suo proprio linguaggio, che è la formulazione più utile a quel livello (LiM, pag. 44), la Hossenfelder afferma (LiM, pag. 46):

*"Effective field theory tells us we can, in principle, derive the theory for large scales from the theory for small scales, but not the other way round."*

"La teoria di campo effettiva ci dice che possiamo, in linea di principio, derivare la teoria per grandi scale dalla teoria su piccole scale, ma non al contrario."

Questa affermazione può essere supportata da qualche esempio, ma costituisce in realtà un'ipotesi non dimostrabile perché le derivazioni in questione sono, in genere, al di là delle nostre possibilità di calcolo. Ma questo atto di fede implica che, in linea di principio, ogni causazione avviene dal basso verso l'alto (*bottom-up*), e che il percorso inverso (*top-down*) costituisce solo un modo per supplire ai limiti delle nostre capacità deduttive. Ed è su di esso che si basa la convinzione di molti fisici che possa esistere una teoria del tutto. A questo proposito la Hossenfelder scrive (LiM, pag. 46):

*"That the history of science has slowly revealed this hierarchical structure is why today many physicists think that there must be one fundamental theory from which everything else derives - a "theory of everything.""*

"Poiché la storia della scienza ha lentamente rivelato questa struttura gerarchica molti fisici pensano che debba esistere una teoria fondamentale da cui qualsiasi altra cosa deriva - una "teoria del tutto."

La posizione epistemologica riassunta dalla Hossenfelder ha quindi una conseguenza importante: quella di ridurre la complessità, in linea di principio, a un fatto tecnico, identificandola con la complicazione (i sistemi fisici sarebbero cioè costituiti sempre da costituenti elementari, in numero troppo grande e con interazioni troppo elaborate per poterle gestire con i nostri strumenti di calcolo). La necessità di costruire nuovi metodi matematici in una prospettiva olistica che introduce nuove entità teoriche e nuove leggi quando si passa da una scala minore a una scala maggiore deriverebbe quindi dalle limitazioni delle

nostre capacità di deduzione, e le nuove leggi sarebbero sempre solo approssimate (*effective laws*). Pertanto il fenomeno dell'emergenza non produrrebbe nulla che non sia già implicito nei costituenti fondamentali del mondo fisico, ma che noi non siamo in grado di dedurre a causa dei nostri limiti.

## 5. Riduzionismo metodologico vs riduzionismo ontologico.

A mio parere, comunque, la conseguenza più importante del realismo delle teorie è costituita da una concezione ontologica del riduzionismo scientifico. La Hossenfelder è consapevole di questo fatto, ma lo rivendica come una conseguenza inevitabile della nostra conoscenza delle leggi fondamentali della natura, poiché scrive (LiM, pag. 45):

*"As a physicist, I am often accused of reductionism, as if that were an optional position to hold. But this isn't philosophy - it's a property of nature, revealed by experiments."*

"Come fisico, sono spesso accusata di riduzionismo, come se assumere tale posizione fosse opzionale. Ma qui non si tratta di una posizione filosofica - è una proprietà della natura, rivelata dagli esperimenti."

L'affermazione che precede illustra bene la posizione di quei fisici che compiono scelte epistemologiche (quindi filosofiche) fondamentali senza esserne consapevoli ("this isn't philosophy"). Essa ignora completamente la sotto-determinazione delle teorie e rende un cattivo servizio al riduzionismo. Inteso infatti come metodologia utilizzabile nel contesto della ricerca per la costruzione di nuove teorie, il riduzionismo ha prodotto risultati eccezionali in fisica e ha permesso di costruire teorie di elevata capacità esplicativa e di straordinaria capacità predittiva. Inteso invece come unica metodologia ammissibile ("property of nature") entra a far parte del contesto della giustificazione e assume la funzione di criterio normativo secondo cui giudicare la scientificità di una teoria, diventando un ostacolo all'introduzione di nuove metodologie di

ricerca. Mi sembra quindi opportuno distinguere anche terminologicamente questi due modi di intendere il riduzionismo (**riduzionismo metodologico** e **riduzionismo ontologico**, rispettivamente), poiché la valutazione che se ne può dare è completamente diversa nei due casi.

## 6. Conclusioni

L'analisi effettuata nelle sezioni precedenti mostra chiaramente che alcune assunzioni di tipo epistemologico e metafisico sono sottese a posizioni che si presentano come puramente scientifiche, indipendenti e più avanzate rispetto a qualsiasi ricerca filosofica. Il fatto che tali assunzioni - abbastanza diffuse nella comunità dei fisici teorici - restino usualmente implicite ha conseguenze rilevanti, che meriterebbero una trattazione approfondita. Non potendola fare in questa sede, mi limiterò qui ad alcune osservazioni schematiche.

In primo luogo, il fatto in questione impedisce di prendere piena consapevolezza delle assunzioni introdotte e della loro natura, rendendo difficile comprendere quanto esse influenzino le modalità e gli indirizzi della ricerca. In secondo luogo, esso impedisce di riconoscere che, spesso, tali assunzioni sono semplicistiche da un punto di vista epistemologico, poiché ne ostacola la discussione critica e il superamento tramite il confronto con le posizioni che gli studi epistemologici più avanzati sono in grado di proporre: superamento che può divenire importante per individuare nuove direzioni di ricerca nei momenti di crisi. Infine, esso conduce sovente a identificare scorrettamente la filosofia con la metafisica, che viene (non ingiustamente) deprecata dal punto di vista del fisico nel momento stesso in cui però si introducono inconsapevolmente pesanti e restrittive assunzioni metafisiche (parfrasando polemicamente il vecchio detto "chi non conosce la storia è condannato a ripeterla", si potrebbe dire che chi non conosce l'epistemologia è condannato a fare metafisica).

Aggiungo, per concludere, che un primo approfondimento delle tematiche accennate sopra si può trovare in un notevole articolo di Stenger, Lindsay e Boghossian pubblicato su "Le Scienze" nel 2015 [2], a cui rimando il lettore interessato.



- [1] Sabine Hossenfelder: *Lost in Math*, Basic Books, New York (2018).
- [2] Victor J. Stenger, James A. Lindsay, Peter Boghossian: *Anche I fisici sono filosofi: il ruolo della filosofia nella fisica moderna*, Le Scienze, 16 Maggio (2015).



**Claudio Garola:** professore Ordinario, in pensione, di Logica e Filosofia della Scienza presso il Dipartimento di Matematica e Fisica "E. De Giorgi" dell'Università del Salento.

---

# La complessità e la sua entrata in scena da pensiero laterale

*O speculatore delle cose, non ti laudare di conoscere le cose, che ordinariamente per sé medesima la natura conduce; ma rallegrati di conoscere il fine di queste cose, che son disegnate dalla mente tua. La natura è piena d'infinita ragioni, che non furono mai in isperienza.*

Leonardo da Vinci

**Mario Castellana**

Università del Salento

---

Questo breve passo di uno scritto di Leonardo Da Vinci [1], passato quasi inosservato da parte della maggior parte sia di scienziati che dei filosofi della scienza, può aiutarci a capire che già all'alba della scienza moderna, sia pure in maniera quasi istintiva o per meglio dire in maniera spontanea per usare una terminologia in uso negli scritti di Gaston Bachelard che parlava negli anni '30 della presenza di una "epistemologia germinale degli scienziati", vi erano i prodromi di una riflessione in cui da una parte si riconosceva il ruolo attivo e costruttivo del soggetto che indaga e dall'altra un reale già articolato in più livelli non suscettibili di essere affrontati con semplici visioni di impronta strettamente empiristica; le "mille ragioni del reale" sono una prima porta o "via", a dirla con Edgar Morin, verso il difficile approdo dell'idea di complessità nel regno del pensiero umano, percorso a cui hanno dato un certo contributo alcune figure del Novecento pur appartenendo a mondi culturali diversi, come

ad esempio Pavel Florenskij e Paul Valéry.

La strada che ha portato il pensiero umano a fare i conti con il mondo della complessità è stata lunga ed è stata per lo più in salita dove nel corso del tempo si sono sedimentate diverse e solide tradizioni concettuali all'interno del suo non omogeneo percorso, diventate forti tradizioni socio-culturali nel senso che hanno forgiato non solo le menti ma hanno condizionato comportamenti individuali e collettivi. Tali "stili di pensiero", per usare un'espressione del microbiologo polacco e storico delle discipline biomediche Ludwik Fleck (1896-1961) [2], sono pervenuti a codificare quei noti principi in uso nel linguaggio e nella vita comuni con semplificarli ancora di più, fatto su cui spesso si sorvola, come causalità, generalità, quantità, continuità, necessità, ripetibilità, immutabilità, semplicità; essi, nati per mettere un po' di ordine nelle rugosità del reale, ne hanno permesso un primo livello di intelligibilità di cui tutti ne abbiamo beneficiato,

ma sono arrivati a codificare in norme assolute solo alcuni aspetti di un certo reale, quello individuato dalla fisica classica preso come modello ideale di riferimento, processo che ha portato a cosificare e fisicizzare qualsiasi oggetto di conoscenza come i concetti attinenti l'umano (stato, famiglia, classe, chiesa, scuola, polizia, partito, politica, ecc.).

In seguito poi all'affermarsi di quella corrente di pensiero che fu il positivismo nelle sue diverse variabili e propaggini, molti dei concetti del pensiero fisico moderno, proprio per la loro fecondità euristica nei vari settori di applicazione, sono stati trasportati nelle nascenti scienze storico-sociali dove si sono ulteriormente impregnati di generalità e di necessità grazie alle diverse strategie messe in atto da Auguste Comte; questa sofisticata operazione concettuale, e nello stesso tempo politico-ideologica, ha fatto sì che i concetti poi in uso nelle scienze dell'uomo siano stati interpretati come entità fisicamente esistenti, pur essendo nati per spiegare le aggregazioni umane sino a diventare loro malgrado supporto di certe ideologie di stampo totalitario vecchie e nuove. Per questo, come ci insegna quel filone di indagine in campo sociologico che va sotto il nome di individualismo metodologico avanzato da Max Weber e rappresentato in Italia da Dario Antiseri [3] e dalla sua scuola, occorre evitare il più possibile termini generali e considerati come neutrali come ad esempio la politica, il partito, la scuola, la sanità, la scienza, la tecnica e molti altri ancora perché in tal modo si mettono in secondo piano il ruolo dei singoli che ivi operano e le loro responsabilità in nome appunto di entità astratte ma a cui si dà una esistenza autonoma quasi indipendente dal soggetto umano.

Tali processi di cosificazione con la conseguente ed estrema semplificazione sono stati una delle non minori cause che hanno oggettivamente ritardato l'entrata in scena della complessità nel mondo del pensiero in quanto, come ha sottolineato spesso Mauro Ceruti [4], sin dall'inizio è stato un percorso che programmaticamente si è messo agli antipodi di tale tradizione, insieme di origine cartesiana e poi rinvigorita dalla metodologia di stampo positivista; ed in primis è stato necessario decostruirne le logiche di base a partire dal linguaggio stesso, vero e proprio portatore

di concetti che, come diceva Gaston Bachelard negli anni '30, ha avuto la funzione di un vero e proprio "ostacolo epistemologico" nel bloccare lo sviluppo di un pensiero più articolato e nello stesso tempo più critico. Pertanto, una delle vie maestre per seguire la genesi e il traghettamento della complessità nelle rive del pensiero è quella ovviamente storica che non si riduce ad essere una semplice cronaca più o meno esauriente delle vicende salienti che l'hanno caratterizzata, ma frutto di una metodologia comparata che ne sappia interrogare più in profondità i problemi attingendo a diverse fonti; pur sembrando a prima vista inevitabilmente contraddittoria, tale ottica può essere d'aiuto nello sviscerare le "pieghe", per usare un'espressione di Ludovico Geymonat, entro cui ha preso sia pure lentamente piede per poi manifestarsi in tempi recenti in tutta la sua cogenza e rilevanza teoriche con risvolti teorici e politici insieme, impliciti in ogni reale cambiamento di fondo.

Il quadro storico imprescindibile è quello relativo al secondo Ottocento quando prende piede la cosiddetta seconda rivoluzione scientifica in atto quasi contestualmente nelle matematiche, nella fisica e nelle discipline biologiche i cui sostanziali "cambiamenti qualitativi discontinui" apportati nel campo conoscitivo, a dirla con Federigo Enriques (1871-1946), sono ancora oggetto di continue ricerche in campo filosofico-scientifico; questi studi, com'è noto, hanno portato nel primo Novecento allo sviluppo di una nuova disciplina, la filosofia della scienza con l'obiettivo specifico di comprendere il senso di tali novità non facilmente metabolizzabili per un pensiero basato sulle categorie del passato. Un primo e non secondario elemento venuto fuori è la presa di coscienza della crescente complessità del pensiero scientifico in ogni ambito insieme con la necessità di introdurre nuove categorie come quelle di approssimazione, estensione, correzione, rettificazione, ristrutturazione dove acquista pieno senso quello che è stato definito in diverse tradizioni di ricerca, a partire da quella francese, il primato teoretico dell'errore. Questo che prima era considerato una ferita o vera e propria patologia della ragione ha aperto una breccia sino a dare le basi di una nuova ragione non-cartesiana, una "*raison souverte*" a dirla con Bachelard che ha visto "la

danza che crea", per usare il titolo di una importante opera di Mauro Ceruti del 1994 [5, 6], della complessità nella fisica del primo Novecento; ma tale "danza" ha trovato altre e non secondarie radici nelle scienze biologiche della seconda metà del '900 dove la complessità, si potrebbe dire, è di casa con tutto il suo vasto corredo e vocabolario concettuali, anche se tale "danza" nelle scienze della vita e della terra è stata intravista nella sua forza dirompente già negli anni '30 da quella singolare figura di scienziato-paleontologo e uomo di fede che fu il gesuita francese Teilhard de Chardin in diversi scritti, oggi al centro di un rinnovato interesse.

Ma sino a questo periodo, essa pur presente negli avamposti di alcuni settori scientifici era quasi nascosta come un lievito nelle diverse pieghe, ma ha agito come un *mobile* nel senso francese del termine e fatto suo da Gaston Bachelard che ci ha dato le basi di un *rationalisme complexe du mobile*, di una ragione in movimento e pluriarticolata in grado di cogliere le diverse *nuances*, sfumature implicite nel reale e nelle scienze; grazie alla vocazione storica presente in tale tradizione più che in altri filoni di pensiero filosofico-scientifico, sin dai primi anni del '900 in Francia *mobilité* e *complexité* erano quasi sinonimi e, pur sembrando come percorsi di una "ragione vagabonda" a dirla con Maurice Merleau-Ponty, hanno indicato una non comune via di marcia. In tale contesto questo binomio, dove il pendolo è più orientato all'idea di complessità come sarà evidente nel percorso successivo di Edgar Morin, ha agito per diverso tempo quasi da "pensiero laterale" nel senso indicatoci da una figura poco nota del panorama epistemologico francese, Gilles Châtelet (1944-1999); in un'opera del 1993 dall'emblematico titolo di sapore bachelardiano *Les enjeux du mobile* [7], tale figura ha evidenziato le poste in gioco dell'entrata laterale nella scena del pensiero umano di idee non in linea con quello dominante e sempre ancorato ad una sola dimensione, grazie ad una analisi non comune del ruolo che hanno avuto nelle discipline fisico-matematiche i diagrammi che storicamente sono stati in grado di veicolare nelle pieghe della scienza principi vietati o eterodossi e poi diventati punti di forza.

Tale "pensiero diagrammatico o laterale", sviluppato ultimamente in Francia in particolar modo da Charles Alunni, può spiegare meglio l'en-

trata in scena della complessità prima quasi da intrusa per la sua "danza" proibita o gioco in grado di scompigliare la linearità e la stabilità della ragione cartesiana o, come è stata definita da Simone Weil, "ragione paradisiaca" che scarta per principio le contraddizioni del reale ed in genere tutto ciò che le fa male; ma essendo essa complessità una "danza che crea" e costruisce, deve "abitare nelle contraddizioni", sempre per usare un'altra significativa idea della Weil, facendone emergere le potenzialità implicite. Per questo si pone inizialmente ai lati di tale ragione ormai chiusa in se stessa e, come un umile pugile, la lavora ai fianchi sino a renderla priva di forze in virtù dei contenuti di verità che emergono prima a fatica e poi sempre più centralmente col mettere tutto in discussione.

Quella che potremmo considerare la strada francese verso il mondo della complessità ne ha arricchito il già ricco vocabolario fatto di termini intrisi di queste verità e ad alta intensità concettuali come, ad esempio, *nuances*, *bordi*, *mobilité*, *spinta* e *vis laterali*, *ressources cachées*, *discontinuità*, *raison souple et ouverte*, *frontiere*, ma sempre all'interno di una strategia tesa a rafforzare le dimensioni razionali dell'uomo a cui una visione semplicistica e riduzionistica dello stesso pensiero complesso a volte sembra non approdare. E contro tali insidie epistemologiche sempre presenti quando un nuovo modo di pensare si affaccia nel teatro della conoscenza, il sano pensiero complesso è un ottimo vaccino ma, come diceva Blaise Pascal a proposito della ragione, va sempre alimentato di nuove risorse cognitivo-epistemiche ed esistenziali insieme con la presa di coscienza dell'intrinseca portata politica che lo contraddistingue.

## La complessità come disinfettante

Per questo, se come diceva Bachelard ci mettiamo programmaticamente "*aux avampostes des sciences*" che nei suoi anni '30 erano rappresentati dai primi sviluppi della meccanica quantistica, la complessità emerge con tutto il suo portato; e una sana riflessione epistemologica è necessaria sia per ribadire il senso veritativo delle singole scienze in un momento in cui tutto sembra essere

messo in discussione e uno strumento per liberarle, sulla scia della tradizione francese orientata più in senso storico, dalle visioni riduttive e da false immagini che spesso hanno caratterizzato il lento affacciarsi nel teatro della conoscenza. Per questo la stessa epistemologia della complessità è venuta a maturazione solo negli ultimi decenni del secolo scorso in quanto si è preso atto a più livelli dei limiti degli approcci tradizionali in quanto diversamente di altri approcci ha vissuto al suo interno il fallimento sistematico dei principi e delle metodologie basati sui canoni di una visione unilaterale del reale. Tutto questo richiede una maturità epistemica in grado di comprendere quello che è stato chiamato da più parti il consequenziale passaggio critico dall'assoluto al relativo e cioè il passaggio all'interno di una determinata scienza da una sola teoria ad una pluralità di teorie; questo ha comportato l'abbandono dell'onniscienza come recita un libro recente di Mauro Ceruti [8], senza cadere in posizioni scientiste da una parte e antiscientifiche dall'altra che poi diventano punto di riferimento in ambito politico.

In tale processo di costruzione di una vera e propria nuova ragione ancora in atto è inevitabile il persistere di posizioni, anche da parte degli stessi operatori scientifici, che a volte tramutano semplici "ipotesi in dogmi", come diceva lucidamente Pavel Florenskij negli anni '30, alimentando così un pensiero tendenzioso o, a dirla con Karl Popper, una "filosofia dubbia". Per evitare sulla scia di Karl Jaspers che una parziale determinazione di un fenomeno possa diventare totalizzante con esiti devastanti a tutti i livelli da quello più propriamente cognitivo a quello politico, una sana epistemologia della complessità può operare come un necessario disinfettante<sup>1</sup> nei confronti di tali sempre presenti "tentazioni", come le chiamava Hélène Metzger che in diversi suoi studi di storia delle dottrine chimiche aveva già denunciato, prima di essere deportata ad Auschwitz, le visioni positivistiche ritenute semplificatrici e deformanti nei confronti di quella che chiamava "vera scienza".

Per questo in alcuni ambienti filosofico-

scientifici la riflessione epistemologica è così mal tollerata, mentre nel pensiero complesso essa è strategica dove il vero scienziato si dimostra consapevole dei limiti della sua disciplina e vede in essa un disinfettante indispensabile per i suoi strumenti, i suoi ambienti, i suoi metodi e soprattutto per le sue ferite: le delusioni nascoste dietro ogni angolo della ricerca e della vita. Lo stesso passaggio dall'assoluto al relativo non viene vissuto in maniera traumatica, ma come un necessario percorso verso l'alba di un mondo aperto che richiede un ripensamento radicale delle vecchie categorie di pensiero, un pensiero all'altezza per abitarne le frontiere sempre mobili e in grado di gestire in modo più razionale i processi di decentramento impliciti, non facili da digerire per una comunità socio-epistemica che si è formata e continua a pensare secondo l'"*habitus* mentale di stampo cartesiano", come diceva Gaston Bachelard negli anni '30 e ritenuto da Edgar Morin uno dei pochi filosofi della scienza del primo Novecento che ha fatto in conti con la complessità in fisica.

Lo scienziato immaturo che non è entrato nel mondo della complessità o ne sottovaluta le diverse potenzialità, e sulla sua scia l'uomo del XXI secolo più in generale, rimane bambino che non vuole prendere atto di tale nuova situazione; e meno consapevole della sua utilità, ha sempre temuto e continua a temere l'approfondimento storico-epistemologico perché brucia come l'alcool su una ferita e quindi lo evita giudicandolo non rilevante. Il pensiero complesso condanna senza appello tale atteggiamento rinunciatario e dimissionario, tipico delle *Weltanschauungen* dal respiro corto come si erano ridotte quelle di ispirazione cartesiana ed idealistica prima e quelle vecchie e nuove strettamente di matrice empiristica dopo, per usare un'espressione di un filosofo della matematica francese morto non a caso combattendo nella Resistenza come Albert Lautman [9]; e nello stesso tempo ne denuncia gli esiti politici in quanto può rivelarsi a volte come l'anticamera di posizioni ideologiche che, oltre a ricondurre le conoscenze scientifiche a livello della razionalità strumentale anche grazie alla complicità di certe note filosofie di successo, producono in campo sociale processi di deresponsabilizzazione deleteri per la condizione umana.

<sup>1</sup>Abbiamo usato tale espressione con Paolo Zizzi in <http://filosofia-uniurb.it/1'epistemologia-come-disinfettante>, 8 novembre 2016.

Inoltre il pensiero complesso non si limita a disinfettare la ragione dalle scorie cartesiane e per sua struttura non nasconde le difficoltà ed i problemi non risolti presenti al suo interno, come quello relativo al fatto che per comprendere le relazioni si è costretti ad entrare nelle singole gabbie che ci costruiamo ed una volta entrati rischiamo di rimanerne affascinati; l'irruzione poi della storicità all'interno della sua prospettiva diventa un formidabile antidoto contro tali a volte inevitabili affascini ma ci preserva dalle ormai vuote ma sempre pericolose assolutizzazioni. Ma esso ha la capacità di trasformare in risorse cognitive le difficoltà che si producono all'interno del percorso come quella connessa all'assenza di linearità nei processi di lunga durata; in pratica non possiamo, neppure teoricamente, immergerci in un mondo precedente perché contaminazioni di varia natura, comunque irreversibili, finiranno per condizionare il nostro modo di pensare e agire. Questa consapevolezza socio-epistemica ci apre una strada tesa a disinfettare nel miglior modo possibile il campo di lavoro comunque sempre in fieri; se già di per sé lo strumento epistemologico rettamente inteso è un efficace disinfettante o, come diceva Hélène Metzger, un vero e proprio "rimedio razionale" per stare alla larga da qualsiasi pensiero ad una dimensione, a maggior ragione lo è quello messo in atto nel pensiero complesso perché irrobustito dai contenuti di verità sempre più polifonici emergenti nei diversi ambiti di ricerca che chiedono solo di essere più rispettati e difesi dalle lusinghe delle cassandre sia scienziste che antiscienziste.

## Paul Valéry: un viaggio nella complessità

A volte può succedere che una strategica idea come quella di complessità, venuta quindi a maturazione sia pure nella seconda metà del secolo scorso dopo alterne vicende in diversi ambiti filosofico-scientifici sino a produrre veri e propri programmi di ricerca col cambiare in maniera irreversibile modi di pensare e nello stesso tempo di vivere per le scelte concrete che obbliga a mettere in atto, venga percepita in un contesto diverso già con un non comune senso epistemico in

un percorso come quello dello scrittore Paul Valéry (1871-1945). Tale figura di scrittore-pensatore dalle "multiformi possibilità", come Jorge Luis Borges l'ha definita, è in questi ultimi anni al centro di un rinnovato interesse per la miniera di idee prodotte che vanno ben al di là del solo campo letterario; ed è stata tenuta presente anche non a caso da uno scienziato come Ilya Prigogine (1917-2003), Premio Nobel per la Chimica nel 1977 per le teorie sulle strutture dissipative ed i sistemi complessi, per l'attualità riscontrata nelle sue analisi sul tempo, quasi contemporanee di quelle condotte da Henri Bergson e Gaston Bachelard nel loro incontro-scontro con le teorie relativistiche.

Ma per capire come essa idea di complessità sia stata declinata da tale singolare figura del panorama culturale e letterario francese, è necessario innanzitutto tenere presente il fatto che insieme a Émile Zola e a Michel Proust, si è confrontato in maniera costante con quel mondo delle scienze attraversato, a partire dalla seconda metà dell'Ottocento, da quello che già Friedrich Nietzsche considerava vero e proprio "terremoto dei concetti" poi reso più evidente dall'avvento delle teorie relativistiche e quantistiche e bisognosi di ben altri strumenti concettuali. Tutto ciò è indice del fatto che diverse e a volte nascoste sono le vie che portano al pensiero complesso.

Per cogliere meglio il senso di alcune prese di posizione di Valéry e le modalità con le quali abbia dato valore strategico alla complessità e l'abbia soprattutto metabolizzata a livello concettuale, a differenza di alcuni filoni del pensiero filosofico della sua epoca e poi diventati egemoni come nel caso italiano, è da tenere presente, come risulta dai suoi "*Cahiers*" che hanno accompagnato l'intero suo percorso letterario dagli anni '90 dell'Ottocento sino agli anni '30 del Novecento, il fatto non secondario del suo costante confronto con quella figura poliedrica che è stato il nostro Leonardo da Vinci; non è dunque un caso che abbia prima intitolato un suo scritto "*Introduction à la méthode de Léonard*", testo scritto nel 1894 e poi più volte oggetto di ulteriori rivisitazioni, dove emerge una visione della scienza decisamente postpositivistica come un sistema *ouvert*. Quasi sulla scia di un altro poeta francese Jacques Delille che, nel 1808 in "*Les règnes de la nature*", considerava l'abate Lazzaro Spallanzani il suo Virgilio

che lo aiutava a scoprire e a celebrare la varietà delle forme di vita, così Valéry ha trovato in Leonardo e in quella che chiama "*logique imaginative*", operante nel suo variegato percorso, degli strumenti concettuali in grado di leggere la complessità crescente del pensiero matematico sino a permettergli di confrontarsi con l'"*Analysis situs*" di Henri Poincaré e i risultati di fisici come Faraday e Maxwell, come in seguito con le prime formulazioni della meccanica quantistica.

L'analisi della *logique imaginative* operante in diversi scienziati con le sue leggi dinamiche permette a Valéry di arrivare ad una visione costruttivistica della conoscenza scientifica e soprattutto, attraverso lo studio delle generalità matematiche e del loro avanzare come nel caso della topologia astratta dell'iperspazio e del continuo, arriva a parlare di "incremento della complessità" e di "gradualità della complessità" abbinate, come sarà ribadito più volte, con quello contestuale dell'imprecisione di ogni metodo della conoscenza ([10], p. 1172-1173):

"Pensare consiste nel congetturare la storia di questa gradualità della complessità."

Le matematiche mettono in atto, come dirà Gaston Bachelard successivamente quasi con le stesse parole, una "pratica di pensiero nel costruire dei progetti teorici" grazie ai processi di astrazione e di continua generalizzazione. Leonardo prima e Poincaré dopo con i suoi diversi scritti sul "valore della scienza" diventano per Valéry scrittore punti di riferimento per delineare la sua via alla complessità; ma a queste figure si deve aggiungere un'altra figura di matematico e nello stesso tempo epistemologo, quella dell'italiano Federigo Enriques con il quale condividerà delle "eresie", come le chiamerà nel 1934 sempre nei "*Cahiers*", grazie anche a dei rapporti personali avvenuti negli anni '20 all'interno del neonato *Institut International de Coopération Intellectuelle*, sorto per volontà della Società delle Nazioni per contribuire a creare una casa comune tra uomini di cultura europei dopo le lacerazioni provocate dal primo conflitto mondiale.

Pensare attraverso le matematiche col tenere metodologicamente presente la loro storia concettuale, come stava facendo Enriques, era già una "eresia" nei primi anni del Novecento e ar-

rivare poi a vedervi un incremento progressivo di complessità ed una sua gradualità era pertanto un ulteriore livello di "eresia" rispetto al pensiero dominante dell'epoca che oscillava da posizioni-tipo filosofia del come se di stampo puramente nominalistico a posizioni di "reazione idealistica contro la scienza" come le chiamerà Antonio Aliotta nel 1912. Ma per Valéry già sul finire dell'Ottocento il mondo della scienza, grazie ai contributi di Poincaré e al senso epistemico assegnato ai suoi esperimenti negativi e di altri che si avviavano a tracciarne nuovi binari, era pervenuto ad una altra ben consistente eresia sul piano del pensiero più in generale; ogni nuova forma di pensiero, resosi necessario in seguito ai cambiamenti scientifici in atto, doveva incorporare nelle sue strutture categoriali un pluralismo di fondo col mettere fine ai sogni dogmatici, alle prese di posizione unilaterali e alle logiche assolute e infantili del pensiero ad una dimensione basata sulle idee semplici: "le *rêveries* sostanzialiste e quelle delle spiegazioni dogmatiche stanno sparendo, e la scienza nel formarsi ipotesi, nomi, modelli si libera dalle teorie preconcepite e dall'idolo delle idee semplici".

Con un linguaggio che sembra *ante litteram* essere preso dai teorici della complessità più recenti, come Edgar Morin e Mauro Ceruti, Valéry arrivò a dire nel 1894: "la complessità è l'imprevedibile essenziale", idea scaturitagli dal suo non comune approccio a Leonardo; il suo metodo era ritenuto consistere nell'immaginare una serie di mondi possibili in grado di dar conto delle infinite ragioni del reale grazie al "frutto matematico" che lo speculatore delle cose disegnava grazie alla mente sua, come si afferma in un famoso scritto, poco tenuto in considerazione dai filosofi della scienza ma tenuto presente in tutta la sua gravidanza epistemica dallo scrittore francese. Ma tutto questo viene potenziato dalla sua lettura che senza esagerazione si può definire magistrale della topologia e dei contributi dati da Poincaré alla teoria del caos con i suoi esiti indeterministici, per avervi intravisto i germi di un pensiero pluriarticolato e definitivamente libero dall'idolo delle idee semplici; Valéry ha avvertito più di altri i limiti e i pericoli non solo di natura teorica insiti in un pensiero basato su tali processi di semplificazione, pensiero che per lungo tempo ha dominato la scena

dei dibattiti filosofico-scientifici, col ritardare di fatto l'emergenza di quella pur necessaria "epistemologia non-cartesiana", così come fu delineata da Gaston Bachelard negli anni '30 ed emersa poi in tutta la sua coerenza teoretica nelle pieghe dell'epistemologia della complessità.

Ma in più Valéry ha fatto della complessità uno stile di vita che non è solo ravvisabile ad una lettura più in profondità nella pur cospicua produzione letteraria, ma nella stessa intera attività di uomo pubblico e politico con la sua vocazione mediterranea aperta al dialogo con le diverse culture, considerate foriere di ulteriori possibilità da esplorare senza rinchiudersi in presunte barriere e anche per superare la crisi dell'uomo moderno, crisi che trova le sue radici *in primis* nei processi di semplificazione messi in atto per loro natura ideologici; è stato un pensatore *tout court* teso a gettare le basi di una razionalità allargata, di una *raison mélangée* dove ogni conoscenza ed esperienza di vita sono viste in funzione dei contenuti veritativi che possono fare emergere e nello stesso ricevere da altri campi con l'arricchimento reciproco, una volta riconosciuti i rispettivi limiti proprio nello spirito dell'autentico pensiero complesso di cui ci ha dato una delle prime concrete testimonianze.

## **Pavel Florenskij: una vita nella complessità**

Una delle conquiste significative del più avvertito pensiero filosofico-scientifico odierno, già annunciata nella prima parte del XX secolo e poi venuta a maturazione in questi ultimi decenni chiaramente declinata con diverse modalità come ad esempio nel pensiero complesso, è quella dell'unità dello scibile come strumento imprescindibile per una visione integrale della realtà; tale esigenza, del resto, ha una lunga storia e ha accompagnato le ragioni di fondo della più genuina riflessione filosofica sin dalle sue origini nel tentativo di cogliere del reale gli elementi essenziali, dove la scienza matematica ha avuto, e continua ad avere, un ruolo non secondario per essere stata il primo tentativo organico di liberazione sistematica da quella che il matematico ed epistemologo italiano Federigo Enriques chiamava "schiavitù dei dati empirici", problema-

tica questa ancora oggi al centro di vivaci discussioni e non solo all'interno della filosofia della matematica.

A differenza del passato, la visione d'insieme o meglio una *Weltanschauung* integrale, come da più parti viene auspicato, non solo si limita ad essere espressione di un bisogno teoretico, ma viene presa come condizione strutturale ed esistenziale dell'uomo sino a vedere nella sua mancanza una malattia mortale; anche se tale malattia è stata diagnosticata da più personalità, una delle più incisive terapie messe in atto per farvi fronte si trova in particolar modo nelle pagine di quella singolare e nello stesso tempo tragica figura che è stata Pavel Florenskij (1882-1937), un vero e proprio "lottatore dello spirito" per usare un'espressione di Semën Frank nel tentativo di capire meglio alcuni "volti dell'anima russa". L'intera vicenda umana, infatti, di questo teologo, filosofo, ingegnere ed epistemologo russo, era considerata, per diretta conoscenza, da Sergej Bulgakov "un'opera d'arte" per la coerenza tra le idee espresse e la loro "incarnazione" nella vita vissuta per usare una sua espressione, poi utilizzata metodologicamente da Silvano Tagliagambe nel significativo volume *Il cielo incarnato* [11] proprio per rilevarne l'unità di fondo attraverso l'analisi dello strategico ruolo assegnato al simbolo in base sia agli studi condotti dal pensatore russo sulla scienza matematica tra Ottocento e Novecento e sia in ambito teologico e iconologico.

Per combattere adeguatamente tale "malattia mortale" un primo passo necessario da fare, da parte di Florenskij, è quello di "ritornare alle cose" e di vivere tra le cose per estrinsecarne e sentirne la polifonica complessità, di vederle in un'ottica di insieme come in un processo di interazione tra le ragioni della vita, del reale e quelle del pensiero; tale attitudine è stata persa da certa modernità che, pur tesa a comprenderne le ragioni, è arrivata ad operare delle vere e proprie mutilazioni del reale e alla sua frammentazione col perdere così di fatto la circolarità tra vita e pensiero col creare dualismi dannosi non solo di natura teorica, ma esistenziali. Scriveva profeticamente Florenskij già nel 1915 in *Il significato dell'idealismo* ([12], p. 27):

"... ma noi, uomini del XX secolo, che abbiamo perso la capacità di ve-

dere l'unità e oltre agli alberi non siamo più capaci di vedere un bosco, noi, per comprendere di nuovo questa unità del genere, dobbiamo riscattare con il pensiero l'insufficienza della nostra vita."

Per tutta la sua vita, infatti, anche nelle condizioni più dure del *gulag*, come emerge dalle commoventi lettere Ai miei figli che possono essere lette anche come un insieme di indicazioni metodologiche per essere il più possibile fedeli alle diverse voci del reale, tutto lo sforzo teoretico è stato sempre indirizzato alla costruzione di una ragione forte e alla costituzione di quella che chiama "condizione della razionalità discorsiva" basata sempre sulla condizione della concretezza per aver incorporato dentro di sé le pluriragioni di ogni singolo aspetto della realtà e per questo aperta alle diverse dimensioni dello spirito umano. Il riscatto, lo scatto di reni, tocca al pensiero che per ritrovare l'unità, la globalità, il "bosco" o la "foresta", come dirà più tardi quasi con le stesse parole Albert Einstein, deve liberarsi da una visione ristretta, dalla dimensione unilaterale offerte dai singoli alberi e legate non a caso al come se, che ci fa vedere il mondo in maniera falsamente lineare e retto da una presunta *lex continuitatis*, visione che ha dominato e domina ancora in larga parte la cultura moderna. Quasi negli stessi termini che si trovano in L'uomo senza qualità di Robert Musil, così Florenskij si esprime:

"... la cultura borghese si sta disgregando perché in essa non è un tutto sì al mondo. Essa è tutta nel come se, come se fosse, l'illusionismo è il suo vizio principale".

Se l'uomo non è in grado con le sue forze di cogliere la connessione tra il tutto e le parti, cade nell'illusione di possedere il reale, come se fosse fatto in funzione delle sue aspirazioni; ma dato che questo reale non è stato rispettato per quello è come tutto, prima o poi si "vendica" come dirà negli anni '30 Simone Weil che invitava a sua volta ad "abitare le contraddizioni", a convivere e non ad avvolgerle nel clima del come se che porta all'idolatria giocando sul bisogno dell'uomo di avere a disposizione degli assoluti. Florenskij nell'atteggiamento insieme non solo

cognitivo del come se vede quasi presente la precondizione che porterà a quello che con parole diverse sarà chiamato il buio della ragione con tutti gli effetti tragici che conosciamo; sembra ammonirci che il buio della ragione si può superare solo se attraverso la conoscenza l'uomo capisce che la vita è un continuo fare esperienze di realtà con nello stesso tempo tramutarle in esperienza di senso nei suoi molteplici versanti da quello scientifico e artistico a quello religioso e spirituale. Però tutto questo sforzo viene meno "se la ragione non partecipa dell'essere", e così "neanche l'essere partecipa della ragione", fatto che è una grave perdita per una visione integrale, come viene detto nell'opera più pregnante dal punto di vista teoretico del 1914 *La colonna ed il fondamento della verità*.

Ma il recupero del tutto, di una visione d'insieme è finalizzata quindi al superamento della 'malattia mortale del secolo' idea questa che può essere un modo per interrogarci sulla genesi degli stessi totalitarismi del XX secolo, uno dei quali Florenskij lo ha vissuto tragicamente sulla propria pelle; il suo invito pressante a 'ritornare alle cose' e ad essere 'la parola della realtà', che continuò a mettere in atto nel fare ricerche sia pure in condizioni estreme come nel gulag, non è un vago realismo o un ingenuo empirismo, ma un esempio concreto di immergersi in un mondo di relazioni con il reale per coglierne i significati più profondi, di ritrovare quei legami vitali che intercorrono tra il 'tutto' e le sue parti, dove queste non vengono annullate ma rispettate nelle loro singolarità, le quali ricevono dalla visione del tutto ulteriori significati una volta che hanno dato il loro insostituibile contributo.

Se il dramma e nello stesso tempo la specificità della riflessione filosofica e del pensiero scientifico, come diceva lo scrittore colombiano Nicolás Gomez Dávila negli anni '50-'60, consistono nel costringere a studiare il tutto attraverso le parti, il percorso di Florenskij, nel fornirci un itinerario di pensiero molto legato alle ragioni della vita e a quella che chiama "la superficie mobile della sezione del mondo", ha fatto di questo dramma una "verità vivente" ed "in movimento" caratterizzata da una "pluralità di descrizioni che trapassano l'una nell'altra". Sta a noi raccogliere questa difficile eredità che è una sfida ad ogni visione riduttiva dello scibile umano che

come avvertiva Hélène Metzger, a sua volta testimone della ragione scientifica verso Auschwitz, è l'anticamera degli atteggiamenti violenti che l'umanità produce contro se stessa. Il reale una volta interrogato si manifesta in "mille ragioni", come aveva intravisto Leonardo, che vanno costruite gradualmente ed in tal modo ogni singola ragione prodotta (sia essa una scienza o sia una teoria al suo interno), è espressione di un determinato ambito ma prende forma e si arricchisce nel suo continuo confronto con i contenuti delle altre.

In tal modo la stessa episteme, da essere considerata come nel mondo greco un sapere stabile ed incontrovertibile a cui aspirare, acquista un'anima storica nel fare dei suoi cambiamenti strutturali, tesi ad indagare altri livelli del reale come diceva Ludwig Boltzmann ([13], p. 1-10) verso la fine dell'Ottocento, un percorso verso diversi gradi di oggettività ognuno dei quali con un portato concettuale indispensabile ma rivedibile. Una storia critica dell'idea di complessità ci permette di vedere, dunque, che essa è stata annunciata diverse volte nella storia del pensiero, ha agito di nascosto ed in maniera laterale in diversi contesti; e senza fare di Leonardo un precursore del pensiero complesso, se le sue affermazioni vengono lette attraverso tale ottica, di cui figure come Valéry e Florenskij ci hanno dato una testimonianza, acquistano un maggiore senso epistemico anche perché aiutano a non cadere nell'"hybris dell'onniscienza" per usare l'espressione di Ceruti, ad essere coscienti e umili navigatori nelle acque sempre incerte della conoscenza. Si può dire senza nessuna esagerazione che essa è stata "l'anima", nel senso di Moritz Schlick ([14], p 11-12) nascosta di ogni vera scienza in quanto, come diceva Jean Piaget negli anni '50-'60, si poneva "au carrefour" tra le diverse scienze e al loro incrocio; e se è stata respinta per diverso tempo, lo è stato perché tra l'altro obbligava, e obbliga, a fare i conti con i processi interni di autodelimitazione concettuale imposti dallo sviluppo delle stesse conoscenze scientifiche [15], a disinfettarsi da visioni normative e semplicistiche sempre in agguato, fatto non facilmente e volutamente a volte metabolizzabile.



- [1] Leonardo Da Vinci: *L'uomo e la natura* a cura di M. De Micheli, Feltrinelli, Milano (1982). p. 52.
- [2] L. Fleck: *Genesi e sviluppo di un fatto scientifico. Per una teoria dello stile e del collettivo di pensiero*, Il Mulino, Bologna (1983).
- [3] D. Antiseri: *Trattato di metodologia delle scienze sociali*, UTET, Torino (2007).
- [4] G. Bocchi, M. Ceruti: *La sfida della complessità*, Feltrinelli, Milano (1985).
- [5] G. Bachelard: *Il nuovo spirito scientifico*, Laterza, Bari (1974).
- [6] M. Ceruti: *La danza che crea*, Feltrinelli, Milano (1994).
- [7] G. Châtelet: *Les enjeux du mobile. Mathématique, physique, philosophie*, Le Seuil, Paris (1993).
- [8] M. Ceruti: *La fine dell'onniscienza*, Studium, Roma (2014).
- [9] A. Lautman: *La Matematica come resistenza* trad. it, a cura di M. Castellana, Castelveccchi, Roma (2017).
- [10] P. Valéry: *Introduction à la méthode de Léonard* (1894), in *Œuvres*, a cura di H. Hytier, Gallimard, Paris (1957-1960), vol. I.
- [11] S. Tagliagambe: *Il cielo incarnato. Epistemologia del simbolo di Pavel Florenskij*, Aracne, Roma (2013).
- [12] P. Florenskij: *Il significato dell'idealismo* trad. it. a cura di N. Valentini, SE, Torino (2002)1172-1173.
- [13] L. Boltzmann: *Über die Methoden der theoretischen Physik*, (1892) in *Populäre Schriften*, J. A. Barth, Leipzig (1905).
- [14] M. Schlick: *Teoria generale della conoscenza*, F. Angeli, Milano (1986).
- [15] J. Piaget, *L'epistemologia genetica*, trad. it, Introduzione di M. Ceruti e Postfazione di M. Castellana, Studium, Roma (2016).

---

**Mario Castellana:** è stato docente di Filosofia della scienza presso il Corso di LM in Scienze Filosofiche e di Epistemologia presso alcuni Corsi di Laurea Triennali e ha fatto parte di diversi Dottorati presso l'Università del Salento; ha fatto parte per vari anni anche del Dottorato in Storia della Scienza dell'Università degli Studi di Bari oltre a tenere moduli di tale discipline in Corsi di Perfezionamento e Master in Bioetica in tale istituzione. La sua area di ricerca si è concentrata sulla filosofia della scienza francofona ed italiana del primo Novecento, col seguirne in particolar modo i dibattiti sulla natura della conoscenza matematica e sulla filosofia della fisica e sui rapporti tra epistemologia e storia

della scienza; le figure studiate a cui ha dedicato diverse monografie e saggi con anche della traduzione in italiano di alcuni loro scritti sono state Gaston Bachelard, Federigo Enriques, Albert Lautman, Hélène Metzger, Jean Cavailles, Jean Desanti, Suzanne Bachelard, Léon Brunschvicg, Ferdinand Gonseth, Maximilien Winter, Gilles Châtelet, Simone Weil, Michel Serres. Per questi interessi fa parte del *Laboratoire Disciplinaire Pens ee des sciences* dell' cole Normale Supérieure di Parigi, che ha l'obiettivo di far conoscere il patrimonio epistemologico europeo; condirige con il direttore di tale *Laboratoire* una collana internazionale *Pens ee des sciences* e collabora con la storica rivista francese *Revue de synthèse*, dove ha pubblicato recentemente vari saggi e recensioni. Dal 2019 dirige la rivista di filosofia *Idee*, diretta per diversi anni presso l'Universit  del Salento da Mario Signore. Fra le sue ultime pubblicazioni Federigo Enriques e la nuova epistemologia (2019), la cura per la Treccani delle Voci di Matematica di F. Enriques, Oltre la matematica (2019) ed il saggio introduttivo, con traduzione di alcuni scritti, a M. Winter, Il metodo storico-critico per una nuova filosofia delle matematiche (2020).

---

# Il mondo fatto a scale.

## Spazio geografico e complessità

**Stefano De Rubertis**

*Dipartimento di Economia - Università del Salento*

---

### Introduzione

L'oggetto di studio della geografia è il mondo, l'insieme di elementi antropici, di elementi fisici e delle reciproche, infinite interconnessioni che lo costituiscono. La sua indeterminabile ampiezza lo rende non conoscibile nella sua interezza: per studiarlo lo si fa a pezzi, lo si scompone e ricompono, cercando di riconoscere un senso e di attribuire un significato a ciò che si sta osservando. Ogni singolo pezzo può essere utile alla spiegazione di un fenomeno, alla conferma di un'ipotesi, ma alla fine rivela sempre ulteriori livelli di complicazione e pone nuove esigenze di approfondimento, nuove ipotesi che a volte confermano, altre volte smentiscono, le certezze maturate fino a quel momento.

Le rappresentazioni del mondo costruiscono lo spazio geografico che, quindi, è esso stesso un modello, più interpretativo che semplicemente descrittivo, in verità. E, nel tempo, il modo di intendere lo spazio geografico si è arricchito di nuove interpretazioni e significati, secondo il contesto culturale, secondo la missione specifica affidata in un dato momento storico ai contenuti disciplinari. Per cui lo spazio è stato di volta in volta assoluto, relativo, relazionale, e, [1], p.28,

"può diventare l'una o l'altra di que-

ste cose, o anche tutte, a seconda delle circostanze. Il problema della adeguata concettualizzazione dello spazio è risolto attraverso la prassi dell'uomo nei suoi confronti [...]. La domanda «che cos'è lo spazio?» è pertanto sostituita dalla domanda «perché prassi diverse creano e usano differenti concettualizzazioni dello spazio?»."

Chiarire cosa si possa intendere per spazio geografico è passaggio irrinunciabile (paragrafo 1) e da questo dipende la distinzione tra approcci complessi e approcci riduzionistici che, com'è noto, sono essenzialmente riconducibili a problemi di osservazione, rappresentazione e quindi di conoscenza. Con le argomentazioni delle pagine successive non ho l'intento di dare una universale definizione di complessità, tenterò piuttosto di spiegare cosa è stata fino ad ora per me (nelle mie prassi) la complessità. In particolare, nei paragrafi 2 e 3, proverò a chiarire come, nella mia prospettiva, la scala geografica possa assumere il ruolo sia di principale strumento riduzionistico sia di grande opportunità di avvicinamento ad approcci complessi.

## Spazio geografico

Alla base dei diversi modi di intendere lo spazio geografico, credo vi siano degli elementi ricorrenti, i principali dei quali mi paiono riconducibili a due aspetti cruciali:

1. l'interpretazione del rapporto tra elemento osservato e proprio contesto (oggetto e spazio geografico);
2. l'interpretazione del rapporto tra osservatore ed elemento osservato (geografo e oggetto/spazio geografico) [2, 3, 4].

Per quanto riguarda il primo punto (rapporto tra elemento osservato e proprio contesto), qualunque tipico oggetto di studio della geografia (una città, una regione, un sistema produttivo...) presenta un numero infinito di relazioni con i contesti a cui appartiene.

Secondo il senso comune, l'oggetto geografico, come qualunque altro oggetto, per forma e sostanza esiste di per sé e possiede una delimitazione naturale: l'osservatore (il geografo) si limita a scoprirlo e a descriverne le proprietà. In effetti,

"molti [...] pensano che l'insieme osservativo, ossia l'informazione che proviene dal mondo dell'esperienza, sia un insieme neutro, e cioè che i fatti siano inequivoci" [5], p.282.

Ma le cose non sono così semplici. Per esempio, immaginiamo di occuparci di una città. Quali sono i suoi confini? Raramente i confini di una città coincidono con i suoi limiti amministrativi. Osservando la distribuzione dell'edificato, le sue estreme propaggini spesso si confondono con centri urbani limitrofi, mentre le sue strade attraversano l'hinterland per collegarla a borghi e altre città che le gravitano attorno in maniera più o meno evidente: analizzando i flussi di persone e di merci che la riguardano, si scoprono significative, virtuali contiguità con località che, in uno spazio euclideo, potrebbero risultare anche molto lontane. Insomma, i confini di una città cambiano a secondo del modo in cui la guardiamo e del motivo per cui la guardiamo, attribuendole nuove configurazioni e nuovi contesti di riferimento.

Tra i possibili modi di intendere e delimitare una città, il senso comune sceglie quelli che nella vita di tutti i giorni risultano essere più utili. Così, di volta in volta, la città è il puntino sulla carta autostradale o, ad altra scala, l'insieme di vie e di edifici rappresentati sulla mappa. Altre volte, per città si intende il complesso di relazioni economiche e sociali, i servizi offerti, le opportunità che offrono. Se ci si deve trasferire in una nuova città, si raccolgono informazioni atte a verificare se lì si potrà trovare tutto quello di cui si pensa di aver bisogno: occasioni di lavoro, scuole e attività culturali e di svago per la famiglia, adeguata assistenza sanitaria, ecc. Se invece si avesse l'obiettivo di redigere un piano di sviluppo urbano sarebbero fondamentali altri aspetti, come l'organizzazione economica o la struttura sociale, la localizzazione e dimensione delle unità produttive, le destinazioni dei suoli, la struttura della zona industriale, i rapporti di interscambio commerciale...

In altre parole, ad ogni finalità possono corrispondere modi differenti di studiare e rappresentare l'oggetto città. Passando da una rappresentazione all'altra si guadagna qualcosa ma si perde qualcos'altro. Ciò che si perde a volte risulta influente rispetto agli obiettivi e alle attese dell'osservatore, altre volte causa gravi errori di valutazione con conseguenze anche catastrofiche.

Nel XX secolo, questa sostanziale irriducibilità del rapporto tra elemento osservato e suo contesto era già riconosciuta da approcci olistici (talvolta anche detti della prima cibernetica) che immaginano la realtà come un sistema di sistemi. Da un punto di vista olistico, la realtà è unica e irriducibile e l'atto del conoscere consiste in un'operazione di distinzione: l'osservatore individua elementi e relazioni (sistemi e sistemi di sistemi) che ritiene rilevanti in base alla sua sensibilità e in funzione dei suoi obiettivi; tutto il resto rimane fuori dall'oggetto dell'osservazione.

In questa prospettiva, quindi, le rappresentazioni geografiche possono essere considerate rivelatrici di differenze, ([6] p. 5): esse distinguono l'oggetto dal contesto, in base al modo di intendere lo spazio e al punto di vista adottato dal geografo. In altri termini: [...] lo spazio geografico è astratto, è un operatore soggettivo, un complesso di operazioni logiche, un'astrazione

che noi compiamo per dare un senso al territorio, per comprenderlo e per potervi operare [...], ([7] p. 22). Allora ci si può chiedere in base a quali criteri il geografo sceglie di distinguere cosa da cosa: di ciò che è in grado di rilevare, come individuo ci è che ritiene importante includere nella sua rappresentazione?

La questione ci rimanda direttamente al secondo punto del ragionamento proposto: l'interpretazione del rapporto tra osservatore ed elemento osservato, cioè tra geografo e spazio geografico. Come visto nell'esempio della città, l'inseparabilità dell'oggetto di studio dal contesto a cui appartiene obbliga a delle semplificazioni che non sono né automatiche né scontate: è il geografo che sceglie, in base alle prassi disciplinari, alle proprie attese, ai propri obiettivi, alla propria cultura; è il geografo che attribuisce a elementi e relazioni proprietà sistemiche, coerentemente con le finalità che attribuisce a quella porzione di realtà. Insomma il tutto ha molto a che fare con la sua visione del mondo.

Si può fare un numero infinito di esempi di oggetti di studio a cui si attribuiscono delimitazioni e qualità apparentemente oggettive che invece sono frutto di convenzioni e scelte di comodo. Così, possiamo chiederci perché di solito riteniamo che i pendolari non facciano parte della città in cui lavorano (come sarebbe la città senza di loro?), mentre riteniamo ne facciano parte a pieno titolo i residenti anche se lavorano e trascorrono gran parte del tempo in altri comuni più o meno lontani.

Anche la distinzione tra imprese e loro contesto socio-economico o perfino quella tra imprese e imprese può presentare risultati sorprendenti: alcune di esse - specie se di piccola dimensione - collaborano tanto strettamente tra loro da somigliare per certi aspetti a una grande impresa. Per di più, in alcuni casi, questi speciali cluster di piccole imprese sono conseguenza proprio dell'attuazione di strategie di grandi imprese che scelgono di riorganizzarsi in reti composte da unità produttive più piccole. Se quindi si volesse correttamente interpretare le scelte strategiche compiute da una di quelle piccole imprese non si potrebbe fare a meno di allargare l'indagine all'intero cluster a cui appartiene, riconoscendone la sostanziale unitarietà. È il caso di molti degli studi compiuti sui cosiddetti distretti industriali.

Evidentemente, anche le distinzioni tra vari attori economici possono obbedire a scelte e finalità conoscitive differenti.

Queste scelte possono produrre diverse rappresentazioni dalle quali a loro volta dipendono azioni e progetti che hanno effetti concreti sulla realtà. E il risultato delle azioni compiute lascia segni concreti sul territorio. Insomma, mentre si ritiene soltanto di descrivere lo spazio geografico, in verità lo si sta costruendo (seconda cibernetica) [3, 4].

Quindi la complessità non è semplicemente un aumento delle variabili di cui tenere conto. Dal punto di vista che qui stiamo adottando, la complessità risulta definita dalla sostanziale irriducibilità dei rapporti tra osservatore, spazio e oggetti geografici. Non esiste una distinzione tra oggetti geografici semplici e oggetti complessi. Ogni oggetto, che è artatamente separato dal suo contesto in base agli obiettivi prefissati, non è osservabile nella sua interezza perché è parte inseparabile di una realtà unica e irriducibile, per questo complessa.

## Scala geografica, riduzione e riduzionismo

In geografia, il processo di riduzione della realtà si consuma con l'utilizzo della scala geografica. La scala è intesa normalmente come il rapporto da applicare alle distanze reali per riprodurle rimpicciolite (in scala, appunto) nelle carte geografiche. Sulle carte, la scala adottata è indicata in forma di rapporto matematico (valore 1 al numeratore ed entità della riduzione al denominatore) - oppure con soluzioni grafiche dal significato equivalente - in modo da sapere esattamente a quali dimensioni reali corrispondono le misure degli elementi in essa rappresentati.

In verità, in una carta, si affrontano due problemi tra loro interconnessi: il primo è quello della proiezione in piano di curve e superfici di una sfera (la Terra), problema che, come sappiamo può condurre a risultati differenti in relazione al metodo di proiezione adottato; il secondo problema è relativo alla scelta di cosa deve essere rappresentato nella carta (quali elementi, quali caratteristiche, quali relazioni). In altre parole, la scala è il procedimento con cui si selezionano gli elementi

dello spazio geografico ai quali di volta in volta si presta attenzione. Si affronta cioè il problema di separazione dell'oggetto dal contesto, di cui si è detto nel paragrafo precedente.

Talvolta, il termine **scala**, sganciato dal suo significato tecnico-cartografico originario, è affiancato da aggettivi come piccola o grande con l'intento di indicare la magnitudo geografica dell'oggetto osservato e non il suo coefficiente di riduzione. È così che quando nel linguaggio comune si dice di studiare un fenomeno a piccola scala, si intende dire che ci si sta applicando su una piccola porzione di realtà (una strada, un quartiere, una città...); porzione che se dovesse essere rappresentata su una carta di consuete dimensioni richiederebbe una scala non piccola, ma grande, come 1:5mila per esempio (cioè con un valore relativamente piccolo a denominatore).

Analogamente, la scala assume significato metaforico quando è accompagnata da attributi quali urbana o regionale o nazionale: ovviamente non vi è un rapporto matematico fisso da applicare quando si intende rappresentare una città, una regione o una nazione, perché dipende dalle loro effettive dimensioni e da quelle che dovranno assumere nella rappresentazione, le quali possono variare sensibilmente da un caso all'altro. In tali circostanze, la scala si riferisce a una dimensione del tutto astratta che però richiama efficacemente gli oggetti geografici città, regione, nazione. Quindi, per esempio, dire che una ricerca è condotta a scala regionale significa che essa si concentra sullo studio di una o più regioni.

È abbastanza evidente che, anche in queste altre accezioni del concetto, la scala è pur sempre un criterio di selezione degli elementi e delle relazioni di cui ci si intende occupare e può essere applicata a rappresentazioni anche non cartografiche. In ogni caso, il prezzo del suo utilizzo (e delle utili semplificazioni che ne derivano) è una perdita di informazione spesso impossibile da stimare.

Certo, la perdita di informazione che produce può essere attenuata, utilizzando criteri meno selettivi in grado di includere nella nostra osservazione la maggior parte di realtà possibile. Cartograficamente, sarebbe come adottare una scala prossima al valore 1:1, suo massimo teorico. Ma date le modeste capacità umane, a tale limite ci si può solo avvicinare; d'altra parte, raggiungerlo

significherebbe avere una perfetta corrispondenza tra misure e contenuti della carta e misure e contenuti reali. Per questo motivo potremmo dire che 1:1 è la scala della perfezione, quella in corrispondenza della quale la rappresentazione è completamente sovrapponibile al mondo che si vuole rappresentare. Ma è anche la scala meno utile: perché usare una rappresentazione (la carta) se abbiamo a disposizione la realtà stessa?

Paradossalmente, il prezzo della conoscenza è la perdita di conoscenza, drammatico processo di cui non sempre vi è consapevolezza. Come ricorda il geografo Farinelli [8], il mondo è un'unità irriducibile. Le rappresentazioni cartografiche lo riducono in pezzi, ma la somma delle singole parti non restituisce mai più l'intero originario. Le proiezioni cartografiche oggettivizzano l'osservazione, assumono che lo spazio sia il contenitore degli oggetti rappresentati e che esso sia uniforme, privo di qualità, intercambiabile in ogni sua parte, mentre la scala è la lama con cui il mondo viene fatto a pezzi. Si tratta, spiega ancora Farinelli, del persistere della visione di Tolomeo (geografo del II secolo) e delle sue proiezioni cartografiche che tanto hanno condizionato e condizionano la nostra cultura.

"Ci si illude oggi di non essere più tolemaici, soltanto perché non crediamo più che la Terra stia proprio in mezzo all'universo ... fu proprio Tolomeo a ridurre per primo il mondo a un insieme di punti definiti da un paio di coordinate matematiche ... e a stabilire che la conoscenza fosse una funzione di una doppia connessa stabilità: quella del soggetto e quella dell'oggetto" [8] p.100.

È laddove manchi la consapevolezza della parzialità delle rappresentazioni a cui conduce la scala che questa da strumento di riduzione diventa processo riduzionistico. In altre parole, è la convinzione di poter spiegare compiutamente la complessità del reale, riducendolo a entità semplici, che rende riduzionistiche la scala e le rappresentazioni a cui essa conduce.

Se invece vi è la consapevolezza che il problema della distinzione tra oggetto e contesto nello spazio geografico non è mai definitivamente

risolvibile, l'approccio incomincia a presentare aspetti di complessità.

Per quanto abbiamo detto, non c'è osservazione o rappresentazione che possa spiegare sempre tutto quanto riguarda un determinato fenomeno. Quindi, i cosiddetti sistemi semplici (cioè quelli le cui caratteristiche emergenti sono tutte deducibili dal comportamento degli elementi che lo compongono) non esistono; o meglio: la supposta semplicità, non deriva dalle caratteristiche intrinseche del sistema ma dagli obiettivi dell'osservazione, quindi dalle emergenze che, tra le infinite possibili, si è scelto di rilevare o si è riusciti a rilevare.

Le qualità dell'osservatore, a questo punto, appaiono decisive per l'esito dell'osservazione. Pertanto, nel prossimo paragrafo si sosterrà che un approccio geografico complesso deve fare i conti con un'altra forte tentazione riduzionistica, quella che semplifica la natura del rapporto tra il geografo (osservatore) e lo spazio geografico (oggetto osservato).

## Scala geografica e complessità

L'applicazione della scala è una riduzione che porta perdita di informazione, come effetto della complessità del rapporto oggetto/contesto. A questo problema si aggiunge quello della scelta delle scale geografiche da adottare di caso in caso. In altre parole, si tratta di affrontare la complessità del rapporto tra osservatore e spazio geografico (della selezione di ciò che è rilevante ai fini della rappresentazione), a cui pure si è già fatto cenno.

Da questa prospettiva, è opportuno evidenziare due essenziali caratteristiche del processo di applicazione della scala. La prima è una sorta di limite, che direi di tipo biologico, dipendente dalle capacità percettive (per esempio, tutti gli esseri umani hanno simili difficoltà nel cogliere il troppo piccolo e il troppo grande). La seconda e non meno importante caratteristica è rappresentata dalla cultura di ciascuno. Culture ed esperienze diverse, in definitiva biografie diverse, conducono a modalità differenti di identificazione e selezione degli oggetti osservati e delle porzioni di realtà giudicate rilevanti<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Un'importante letteratura evidenzia come la scelta della

Le due caratteristiche sono, però, strettamente legate tra loro. Il limite biologico è condizionato dalle qualità culturali abilitanti alla creazione o all'uso di tecnologie che, potenziando i nostri sensi, consentono di esplorare e rappresentare porzioni di realtà altrimenti insondabili. Certo, i limiti biologici sono simili in tutti gli individui della specie mentre i filtri culturali sono propri di ogni soggetto e delle comunità di riferimento, ma comunque interagiscono tra loro creando combinazioni che geograficamente presentano omogeneità e differenze.

Il sociologo Franco Cassano, nel suo saggio "Approssimazione. Esercizi di esperienza dell'altro" [9], riflette sul limite che le caratteristiche biologiche impongono alle nostre rappresentazioni del mondo. I vincoli percettivi sembrano indirizzare verso visioni antropocentriche nei rapporti inter-specie ed egocentriche nei rapporti intra-specie. L'esercizio di approssimazione, secondo lo stesso Cassano, è un percorso di emancipazione da tali vincoli, partendo dalla constatazione che, come afferma von Bertalanffy, citato in [9] p.16:

"ciascun organismo vivente taglia, nella gran torta della realtà, quella fetta che esso può percepire e a cui può reagire mediante la propria organizzazione psico-fisica".

D'altra parte, osserva l'autore, la cultura rende rilevanti cose che per altri esseri umani o per altre specie animali sono irrilevanti e rende prive di significato cose che possono apparire vitali da altri punti di vista. Insomma, ogni osservatore elabora le relazioni che è in grado di gestire e ignora quelle che non riconosce: in questo senso, egli è sempre parte del sistema che osserva e, non potendo osservare se stesso, costruirà rappresentazioni della realtà sempre parziali.

In estrema sintesi, si potrebbe dire che attraverso la scala si seleziona ciò che limiti biologici e filtri culturali consentono di osservare e contemporaneamente si ordinano elementi e relazioni attribuendo loro senso e rilevanza in base agli obiettivi e alle sensibilità dell'osservatore. Si in-

scala a cui rappresentare un fenomeno, essendo decisiva sull'esito della rappresentazione, possa essere assoggettata a logiche di esercizio del potere, diventando essa stessa motivo di conflitto.

terviene cioè su entrambi i tipi di rapporti (soggetto/oggetto e oggetto/contesto) che caratterizzano la complessità dell'osservazione geografica. Anche in questa prospettiva la scala assume il ruolo di processo di selezione delle variabili ritenute significative.

Si immagini di studiare i fattori di localizzazione delle attività terziarie presenti in una grande città. L'impostazione della ricerca richiede una serie di scelte (cioè di cosa tener conto e di cosa no), per nulla scontate: quali attività includere, per posizione (solo quelle incluse nei riduttivi confini amministrativi?) e per tipologia (tutti i servizi? servizi alle famiglie? un campione dei servizi presenti?), quale modello adottare per stimare provenienza e motivazioni dei clienti, quali esternalità rilevare... Emergerà la necessità di adottare almeno due differenti scale: una (urbana) necessaria per analizzare l'articolazione della rete commerciale e i bacini di utenza locali; un'altra (regionale) per indagare la più estesa area urbana funzionale, visto che le aree di mercato di molte attività commerciali interessano anche altri comuni, vicini e lontani. Ad ogni cambio di scala corrisponde una modifica dell'oggetto osservato che adesso include pezzi di ciò che prima era considerato contesto (le relazioni con l'esterno). Lo stratagemma aggiunge informazioni sull'oggetto di studio originario (localizzazione delle attività commerciali in ambiente urbano), ma ripropone problemi di perdita di informazione per il nuovo oggetto di studio individuato alla scala regionale. L'intera regione urbana risente della sua collocazione in un più ampio contesto sovra-regionale o nazionale per indagare il quale occorre ancora una volta cambiare punto di vista. Così ad ogni scala sorge la necessità di adottarne un'altra, compiendo ulteriori scelte e riduzioni, in un'interminabile spirale di crescente bisogno di conoscenza. In una costante tensione verso l'irraggiungibile scala 1:1.

In effetti, secondo Morin [10], il processo di conoscenza, in un approccio complesso, invece di basarsi su riduzione e disgiunzione, dovrebbe essere fondato su operazioni di distinzione (dell'oggetto dai suoi contesti) e congiunzione (continuo rimando dalla parte al tutto e dal tutto alla parte). In altre parole, mentre riduzione e disgiunzione (riduzionismo) elidono, distinzione e congiunzione (complessità) implicano la ricerca

di relazioni di connessione. In geografia, potrebbe significare adottare approcci multiscolari che consentono di guardare lo stesso fenomeno da punti di vista differenti. Quelli che possono apparire inspiegabili rumori di fondo a una scala, possono assumere diversi, pregnanti significati ad altre scale.

In definitiva, la scala seleziona le relazioni e gli elementi giudicati significativi, a prescindere da qualunque limite o confine predeterminato e trasforma lo spazio geografico nel prodotto della rappresentazione: l'osservatore, attraverso la scala ordina, conosce e costruisce lo spazio intorno a sé. Tuttavia la tensione verso la complessità, la moltiplicazione dei momenti di distinzione e di congiunzione, non può protrarsi all'infinito. A un certo punto, secondo le circostanze e gli obiettivi, il processo necessariamente si interrompe, cristallizzando le rappresentazioni nella loro parzialità e incompletezza. Da questo punto di vista, la complessità non può essere altro che una sorta di riduzionismo consapevole.

## Considerazioni finali e conclusioni

Occupandomi di complessità della realtà e delle sue rappresentazioni, ho fondamentalmente affrontato un problema di conoscenza. Questa, secondo Morin [11], si concretizza nella selezione di dati ritenuti significativi. Essa disgiunge, congiunge, gerarchizza, centralizza, secondo la visione del mondo di ciascuno. Semplificazioni e riduzioni hanno generato anomalie e contraddizioni a cui si è cercato di rimediare con l'iper-specializzazione a cui è corrisposta una netta separazione tra ambiti disciplinari. Insomma, si è operata un'ulteriore semplificazione, con l'illusione, in ogni disciplina, che il pezzo della realtà studiato coincidesse con la realtà stessa. Così, la necessità della conoscenza ha condotto verso un riduzionismo cieco, che ha comportato ulteriori contraddizioni e anomalie inspiegabili nell'osservazione dei fenomeni.

In geografia, il concetto di scala è stato lo strumento principe degli approcci riduzionistici. Ma la stessa scala geografica può essere strumento di avvicinamento ad approcci complessi: con essa si selezionano le relazioni e gli elementi giudicati

significativi, a prescindere da qualunque limite o confine predeterminato; l'osservatore, attraverso la scala ordina, conosce e costruisce lo spazio geografico. La scelta della scala da adottare non è mai scontata ed è il risultato di inevitabili semplificazioni che risentono di vincoli culturali, sociali e perfino biologici. Evidentemente, la complessità non è limitata ai soli casi in cui si rilevano emergenze inspiegabili, ma si estende a qualunque porzione di realtà, per effetto di ciò che, non rilevato e non rilevabile, resta escluso dall'osservazione. Una conseguenza importante è quindi che ogni rappresentazione ha una dimensione soggettiva. Pertanto, una verità, anche scientifica, diventa oggettivamente tale quando è condivisa nella comunità (scientifica) di riferimento. E non credo che questo rappresenti una novità. Popper afferma [12], p.27:

"le teorie scientifiche non sono mai completamente giustificabili e verificabili [...], nondimeno, possono essere sottoposte a controlli [...] l'oggettività delle asserzioni della scienza risiede nel fatto che esse possono essere controllate intersoggettivamente"

Ma non è più soltanto questo. Il riduzionismo non è solo un limite ai controlli praticabili. Nella prospettiva assunta, esso è principalmente la mancanza di consapevolezza della persistente e ineliminabile ignoranza dell'osservatore. Ignoranza che gli approcci complessi impietosamente svelano.



- [1] D. Harvey: *Giustizia sociale e città. 1. Tesi liberali*, Feltrinelli, Milano (1978);  
ed.orig.: *Social justice and the city*, E. Arnold Publishers, Londra (1973).
- [2] R.De Giorgi, N. Luhmann: *Teoria della società*, Franco Angeli, Milano (1991).
- [3] M. Ceruti: *Il vincolo e la possibilità. Presentazione di Heinz von Foerster*, Feltrinelli, Milano (1986).
- [4] M. Ceruti: *La danza che crea. Evoluzione e cognizione nell'epistemologia genetica*, Feltrinelli, Milano (1989).
- [5] M. Ambrosetti Odd, A. Turco, G. Zanetto: 1985, *Spazi imprecisi e regionalizzazione*, P. Pagnini (a cura di): *Geografia per il principe. Teoria e misura dello spazio geografico*, Unicopli, Milano (1985) pp. 281-306.

- [6] G. Zanetto: *Langage et représentation en géographie. Introduction au colloque de Venise*, in G. Zanetto, *Le langages des représentations géographiques. Actes du colloque international*, 15-16 ottobre 1987, Università degli Studi di Venezia, pp. 5-38.
- [7] A. A. Bissanti: *Puglia geografia attiva. Perché e come. Ad uso dei docenti*, Mario Adda editore, Bari (1993).
- [8] F. Farinelli: *Geografia. Un'introduzione ai modelli del mondo*, Einaudi, Torino (2003).
- [9] F. Cassano: *Approssimazione. Esercizi di esperienza dell'altro*, il Mulino, Bologna (1989).
- [10] E. Morin: *Restricted complexity, generalized complexity*, In Proc. Coll. *Intelligence de la complexité*, Cericy-La-Salle, France (2006), pp. 25, proceedings, <https://arxiv.org/pdf/cs/0610049.pdf>.
- [11] E. Morin: *Introduction à la pensée complexe*, ESFéditeur, Paris (1990).
- [12] K. R. Popper: *Logik der Forschung*, Springer, Berlin (1934)  
ultima trad. it.: *La logica della scoperta scientifica. Il carattere autocorrettivo della scienza*, Einaudi, Torino, (1998)

---

**Stefano De Rubertis:** è Professore Ordinario di Geografia Economico-Politica presso il Dipartimento di Scienze dell'Economia dell'Università del Salento. Si occupa principalmente di questioni e problemi legati allo sviluppo territoriale.



---

# La società come sistema: dalla cibernetica alla teoria dei sistemi sociali

**Gianpasquale Preite**

Dipartimento di Storia, Società e Studi sull'Uomo, Università del Salento

---

## Introduzione

Uno degli assunti principali della teoria dei sistemi sociali è che i sistemi conservano la propria autonomia rispetto all'ambiente in cui operano. Un dato evento può costituire, ad esempio, un elemento tanto di un sistema sociale (come comunicazione), quanto di un sistema psichico (come pensiero), anche se tali sistemi rientrano reciprocamente l'uno nell'ambiente dell'altro.

La differenza tra sistema e ambiente è il punto di partenza della teoria dei sistemi sociali. Un sistema non può essere dato indipendentemente dal suo ambiente, in quanto si costituisce tracciando un confine che potremmo definire operazionale e che lo distingue da ciò che non gli appartiene. In altri termini, il sistema stabilizza il confine entro cui è possibile mantenere un ordine organizzato con una complessità ridotta, consentendogli di affrontare i relativi problemi.

La funzione di comprendere e ridurre la complessità del mondo - e della sua evoluzione - è una proprietà che appartiene ai sistemi sociali. La società della modernità avanzata è sottoposta all'eccessiva simultaneità degli accadimenti, tutto accade allo stesso tempo in un presente che non è osservabile nella sua interezza. In tale prospettiva, nessun sistema può assorbire la totalità di questi accadimenti. Questa considerazione è

sufficiente per aprire la strada alla comprensione del perché i sistemi si specificano funzionalmente, cioè producono la propria differenziazione rispetto all'ambiente esterno.

Con il processo di differenziazione ogni sistema si specifica rispetto ad un proprio codice operativo e attua selezione attraverso un *medium* della comunicazione simbolicamente generalizzato (ad esempio: per la politica il potere; per l'economia il denaro; per la religione la fede; ecc.). La comunicazione è l'operazione specifica alla base dei sistemi sociali. Nella comunicazione c'è produzione di informazione ma c'è anche produzione di senso e comprensione che, a loro volta, rappresentano in maniera ricorsiva le premesse per una nuova comunicazione. Nella teoria dei sistemi sociali, la comunicazione rappresenta dunque un evento senza durata, la comunicazione è sempre nuova, diversa, e il suo continuo prodursi crea contenuti di senso sempre nuovi e diversi. Senza la produzione di comunicazione non vi sono sistemi sociali.

La comunicazione è un evento altamente improbabile e la sua produzione ha tre differenti livelli di improbabilità:

- a) ad un livello basilare di complessità, è improbabile che la comunicazione venga compresa e quindi realizzata;

- b) ad un secondo livello di complessità, è improbabile che l'emissione raggiunga l'interlocutore;
- c) ad un terzo livello di complessità, è improbabile che la comunicazione venga accettata. Il problema principale, a questo punto, è chiarire come la comunicazione di per sé improbabile divenga probabile.

Nella teoria dei sistemi i tre livelli di improbabilità vengono affrontati attraverso l'utilizzo dei media:

- a) linguaggio (probabilità della comprensione);
- b) mezzi di diffusione (probabilità del raggiungimento degli interlocutori);
- c) mezzi di comunicazione generalizzati simbolicamente (probabilità dell'accettazione).

## Sistemi sociali e cibernetica

L'idea che la dimensione sociale abbia le caratteristiche di un sistema analogo a quello della vita (quindi associato ad una relazione di reciproca dipendenza degli elementi), proviene dal dibattito sulla cibernetica come nuova scienza dei sistemi e dalla descrizione del rapporto tra individuo e sistema, attraverso la complementarità di socializzazione e partecipazione. L'idea trae le sue origini dagli studi analitici sulla cibernetica di Wiener che egli definisce come scienza del governo dei sistemi vivi e sistemi non-vivi. Il sistema cibernetico è concepito dunque come un insieme in cui si realizza l'interazione e lo scambio di materia, di energia o di informazioni che costituiscono comunicazione, dove gli elementi reagiscono cambiando di stato o modificando le loro azioni.

Wiener presenta ufficialmente la sua teorizzazione sulla cibernetica, fornendo evidenza dei modelli logico-matematici utilizzati e descrivendo le potenzialità della nuova scienza, anche in relazione alla sua estensione nell'analisi dei sistemi sociali. In particolare, egli dedica una cospicua parte del suo lavoro alla problematizzazione dell'aspetto epistemologico delle scienze sociali, occupandosi del rapporto tra osservatore e fenomeno osservato, all'interno di un sistema in

### Cibernetica

La **cibernetica** nasce formalmente nel 1948 con la pubblicazione dell'opera "*Cybernetics: or control and communication in the animal and the machine*" di Norbert Wiener [1]. L'argomento di studio della cibernetica riguarda principalmente il governo dei sistemi complessi altamente organizzati, indipendentemente dalla loro particolare natura (umana o artificiale). Sin dalle prime osservazioni e/o applicazioni, la cibernetica si presenta come campo di studi altamente interdisciplinare e quindi comune sia alle scienze esatte, sia alle scienze applicate, sia alle scienze sociali e umane.

cui l'assunzione metodologica è quella propria delle scienze esatte [1] e quindi del rapporto di osservazione (osservatore/osservato) in termini catalettici, cioè di assunzione di tutta la soggettività al polo attivo dell'indagine e di riduzione totale dell'oggettività al polo passivo dell'indagine stessa. La natura catalettica del rapporto osservatore/osservato, significa poter esercitare il diritto di analizzare, programmare, descrivere e decidere le condizioni dell'oggetto e qui si coglie uno degli aspetti fondamentali delle scienze esatte e delle metodologie per lo studio delle cose. Tuttavia Wiener, compie uno sforzo maggiore quando afferma che la cibernetica si occupa anche dei sistemi vivi (affermazione, oggi, più che mai vera). In questo caso, il rapporto di osservazione, in quanto avviene tra persone, diviene dialettico e richiede una metodologia che implichi il riconoscimento di soggettività ai due poli del rapporto e di redistribuzione dell'attività su entrambi. Inoltre, la natura dialettica del rapporto di osservazione tra osservatore e osservato (o meglio, tra osservatore singolo e osservati multipli) si estende al rapporto esistente tra tutti gli attori trasformando l'insieme in sistema.

L'attenzione di Wiener per le scienze sociali, porta progressivamente ad un ampliamento della sua analisi fino a pervenire ad una definizione di cibernetica intesa come scienza dei fenomeni, appunto sociali, avente ad oggetto l'osservazione della comunicazione, dei processi comunicativi e dei relativi contenuti; scrive, infatti ([2], p.16):

"Uno degli aspetti più interessanti del mondo è il fatto che esso può ritenersi costruito sulla base di modelli. Un modello è essenzialmente una disposizione caratterizzata dall'ordinamento degli elementi di cui si compone anziché dalla natura intrinseca di questi elementi."

l'informazione allora altro non è che ([2], p.21)

"la misura della regolarità di un modello le cui parti componenti si sviluppano nel tempo"

Wiener analizza l'agire comunicativo in relazione ai modelli di comunicazione ed afferma che la natura delle diverse comunità sociali (sistemi) è determinata dal tipo di comunicazione che in esse si instaura, in altri termini, dipende dalla natura dialettica del rapporto tra osservatore e osservato a livello di corrispondenti ordini degli elementi. In politica, ad esempio, la democrazia è la rappresentazione di un agire comunicativo condiviso e partecipato, in realtà è ben lungi dall'essere realmente raggiunta; in economia, il mercato rappresenta l'espressione della libertà individuale, tuttavia i risultati raggiungibili sono condizionati dalla razionalità limitata degli individui; nel diritto, norme e sanzioni garantiscono sicurezza e tutela, eppure i conflitti si moltiplicano e sfuggono al controllo.

Lo struttural-funzionalismo parsonsiano della metà del Novecento e la forte valenza empirica dei suoi studi introduce, tuttavia, elementi di criticità nella visione di reciprocità del rapporto tra individuo e società. Parsons introduce l'idea dell'esistenza di due sistemi distinti: il sistema della personalità ed il sistema sociale simultaneamente parte e ambiente dell'altro [3]. Il modo in cui i due sistemi operano è descritto attraverso il modello analitico quadrifunzionale AGIL costruito su concetti della cibernetica, cosiddetta di primo ordine (le teorizzazioni successive si considerano di secondo ordine in quanto includono il concetto di mezzo simbolico generalizzato e quello di gerarchia cibernetica).

Nel modello parsonsiano la trasmissione dell'informazione è unidirezionale, cioè è indirizzata dal sistema sociale all'individuo e non viceversa. La trasmissione dell'informazione produce

## Autopoiesi

L'**Autopoiesi** è un concetto mutuato dagli studi di Maturana in ambito biologico, che si rivela fondamentale per spiegare la capacità dei sistemi viventi di guidare i propri processi e di produrre e riprodurre al loro interno gli elementi che li costituiscono (es.: le cellule).

negli individui interiorizzazione di ruoli e rielaborazione dell'informazione, ovvero determina l'integrazione dell'individuo nel sistema, e quindi socializzazione. Questa trasmissione non ha una direzione contraria, cioè dall'individuo al sistema, perché quest'ultimo non può assimilare la personalità, ma può ricevere solo energia motivazionale ([4], p. 93).

Gli anni Settanta del secolo scorso segnano l'avvio di un mutamento di prospettiva, la visione sistemica parsonsiana entra in crisi e si affermano nuove teorizzazioni basate sulla cibernetica di secondo ordine, i cui principali protagonisti sono Humberto Maturana, Francisco Varela, Henri Atlan, Heinz von Foerster, Ernst von Glasersfeld, Paul Watzlavick, Edgar Morin.

La cibernetica di secondo ordine è caratterizzata da una impostazione metodologica che determina il superamento delle precedenti teorizzazioni:

- a) i sistemi non sono aperti, bensì chiusi e autopoietici, quindi in grado di riprodurre ed organizzare autonomamente i propri elementi;
- b) l'informazione non si trasmette, ma si costruisce nel sistema in quanto rappresenta la radice dell'autopoiesi e quindi dell'autorganizzazione del sistema;
- c) l'osservazione non si produce all'esterno dell'oggetto osservato, ma è inclusa in ciò che è osservato, essendo l'operazione fondamentale del sistema.

La discontinuità metodologica evidenziata dalla cibernetica di secondo ordine, come osserva negli anni Settanta Bateson, non è priva di criticità, in particolare per l'assenza di un chiaro riferimento epistemologico al rapporto esistente tra i

sistemi [5]. La nascente Teoria dei Sistemi Sociali di Luhmann è risolutiva per superare questa fase di stallo, affermandosi definitivamente come critica al pensiero struttural-funzionalistico parsoniano e come rottura con l'ortodossia dominante [6] di quel periodo.

## Sistemi sociali e stato sociale

Nei primi anni Settanta del secolo scorso, la riflessione sui sistemi sociali coinvolge anche le dinamiche legate al concetto di stato del benessere (o stato sociale). Il dibattito è alimentato dalla scuola tedesca ed in particolare dal confronto tra Luhmann e Habermas. Con "*Theorie der Gesellschaft oder Sozialtechnologie*" [7] i due autori indagano i cambiamenti e le ristrutturazioni delle istituzioni statuali in società sempre più complesse e si confrontano sulla questione della legittimità del potere politico riguardo all'intervento e all'azione sociale dello stato e quindi delle istituzioni statuali.

In particolare, la teoria di Habermas rappresenta una risposta alla crisi di legittimità che lo stato del benessere incontra nella società complessa, in cui i meccanismi di regolazione della distribuzione della ricchezza sono principalmente delegati alle regole del mercato e della produzione. Egli propone un modello orientato al bilanciamento nella misura in cui prova a fondarsi sui requisiti essenziali del funzionamento di un sistema democratico. Si tratta in definitiva di una proposta politica che si colloca sul piano delle teorie normative dello stato sociale provenienti dalla scuola americana e quindi orientate alla formalizzazione di idealizzazioni che intendono farsi valere come criteri di giudizio universali.

Il diritto presuppone fin dall'inizio il potere politico costituito e la definizione del ruolo dello stato. I diritti che i cittadini liberi ed eguali debbono reciprocamente riconoscersi, non possono essere stabilizzati nel tempo se non si è prima istituito e fatto funzionare efficientemente il potere dello stato. Anche se la forma giuridica non è sufficiente a conferire legittimità all'esercizio del potere ([8], p. 159).

"il diritto conserva forza legittimante solo finché può funzionare come una risorsa di giustizia"

Su questa base Habermas formula un modello di stato democratico di diritto garantito dal ruolo di una Corte Costituzionale impegnata, oltre che nell'indicare i contenuti e le prescrizioni dei diritti, nella vigilanza delle procedure inclusive che l'articolazione di tali diritti garantiscono.

Per Luhmann, tuttavia, questo ragionamento rappresenta il tentativo di commisurare lo stato rispetto ad aspettative non riflesse che rischiano di fallire perché non sufficientemente accordate alla complessità dello stato sociale. Egli propone invece un percorso inedito che non coincide con le tradizioni consolidate di matrice anglosassone e che non considera quindi il sistema sociale come una semplice proiezione della coscienza individuale.

Per le teorie classiche, l'ordine politico si configura come ambito limitato e quindi bisognoso di una integrazione metapositiva fornita dal diritto naturale. Al centro dell'indagine politica, pertanto, non sta più l'uomo concepito come monade isolata depositaria di diritti naturali che la abilitano a modellare la struttura sociale, ma qualcosa di più grande, ossia l'insieme delle istanze che s'intrecciano in un sistema sociale costituito da reticoli formali differenziati che forniscono una direzione normativa dell'azione.

Solo con Marx la riflessione sulla politica acquista un referente istituzionale oggettivo e si colloca al di fuori di un orizzonte giusnaturalistico ancora proiettato verso l'istanza di modellare eticamente la compagine istituzionale come realizzazione di modelli culturali di condotta individuale. Hobbes e Rousseau pensavano ancora nell'ambito della tradizione classica di una società politicamente definita e nella quale la politica è ancora concepita come punto culminante degli interessi dell'uomo e del cittadino. Almeno da Marx in poi questo non è più possibile giacché la politica è solo, per quanto necessaria ed essenziale essa sia, funzione parziale rispetto al complesso delle funzioni sociali ([9], p. 185).

L'intenzione di Luhmann è di portare alle estreme conseguenze il percorso che riconduce la politica a funzione (in termini di sistema funzionalmente specificato).

I fenomeni della società complessa chiamano in causa l'impianto della civiltà individualistico-liberale e provocano il disastro delle idee politiche di sinistra. Dinanzi alla pervasività del mo-

derno vacilla ogni tentativo di critica sociale radicale che enfatizza elementi contingenti destinati a disperdersi sotto i colpi dell'evoluzione sociale e della modernizzazione.

Il pensiero di Luhmann è, in questo periodo, fortemente condizionato dalle critiche mosse dal pensiero neoliberale allo sviluppo del neocorporativismo quale modello di relazioni fra interessi organizzati e stato. Un modello considerato fonte da cui costruire la critica dello stato sociale democratico, una critica presente in molti autori tra gli anni Sessanta e Settanta del secolo scorso, come Lehmbruch, Winkler e Schmitter che vedono la rigidità del modello su quei valori di mobilità e competizione da sempre difesi dal liberalismo ([10] p. 223).

"La tendenza neocorporativa, secondo gli autori neoliberali rappresentava, in una linea di continuità con le analisi di Hayek [...], l'altra faccia del processo di ipertrofica burocratizzazione che essi ritenevano strutturalmente collegato alla crescita dell'intervento sociale dello Stato".

Innanzitutto, per Luhmann, la parola stato può assumere diversi significati e le questioni pubbliche contemporanee non devono essere più intese nel senso indifferenziato della *res publica*, come nell'età antica. Nell'attuale conformazione sociale, si sono sviluppati sistemi sociali particolari, che adempiono la funzione relativamente specifica di assumere decisioni vincolanti per la soluzione di problemi sociali. Laddove il grado di differenziazione lo ha permesso, sono sorte burocrazie statali che amministrano in forma professionale gli affari pubblici, le cui decisioni sono vincolanti ed avulse da interessi morali, religiosi e culturali. In tal modo si apre lo spazio per una vita politica, che abbia una specifica razionalità, propri criteri di efficienza, proprie sanzioni e che sia relativamente separata dagli altri ruoli sociali. La teoria dell'organizzazione porta Luhmann ad occuparsi di complessità chiarendo il funzionamento dei sistemi sociali, considerati sia nei momenti di chiusura interna (irrigidimento delle strutture contro i fatti provenienti dall'ambiente o inattesi), sia nei momenti di apertura verso l'ambiente esterno (fasi dell'apprendimento e/o del mutamento strutturale) [11].

## Complessità

Per Luhmann, i sistemi sociali hanno la funzione di ridurre la complessità del reale, che è tanto più elevata, quanto maggiori sono i livelli di interconnessione raggiunti. Il sistema, dunque, opera ad un livello di complessità ridotta (porzioni di realtà), che da un lato assicura stabilità interna, dall'altro evoluzione, perché consente di assorbire novità riproponendo lo schema selettivo della complessità.

Per Luhmann, ad esempio, lo stato sociale reagisce con misure di assistenza alle conseguenze dell'industrializzazione, ma nella società post-industriale il concetto di assistenza si carica di ulteriore complessità e diviene qualcos'altro: benessere. Questa nuova condizione richiede più della sola assistenza sociale e più della sola compensazione degli svantaggi, anzi, lo stato del benessere dev'essere studiato attraverso il principio di compensazione di quegli svantaggi che toccano alle persone a causa di un determinato stile di vita.

Questa riflessione produce un lavoro dal titolo *Politische Theorie im Wohlfahrtsstaat* (1981) [12], con cui mette in discussione alcune delle categorie fondamentali. Il concetto di stato sociale non può essere ricondotto al concetto di stato del benessere per almeno tre validi motivi ([12], p.41-44):

1. le rapide trasformazioni ambientali provocate dallo sviluppo industriale, che a loro volta non possono essere tenute sotto controllo senza ricorrere alla politica;
2. la crescente spesa dello stato del benessere, i cui costi minacciano, con la crescente espansione dell'economia pubblica, la differenziazione tra sistema politico e sistema economico;
3. la conseguente trasformazione della condizione motivazionale che fa sì che non si possa contare su atteggiamenti costanti di disponibilità al consumo, di gratitudine e di corrispondente lealtà politica.

Il punto di riferimento del pensiero luhmanniano non è rappresentato da schemi binari (tipo ca-

pitalismo/socialismo) ma dalla possibilità di distinguere opzioni politiche, intese sia come scelte interpretative dei programmi decisionali. La politica essendo auto-delimitata e funzionalmente specializzata, in definitiva non è più in grado di tematizzare i problemi secondari di portata mondiale della differenziazione funzionale; essa continua ad essere colpita da quei problemi che sono conformi ai suoi interessi, e non decide in modo anticipatorio, ma reattivo. In definitiva, il processo che ha tolto politica al sistema politico e lo ha convertito in canale dell'amministrazione, comporta l'irruzione di una politica perennemente in ritardo, retro attiva, incapace di anticipare le tendenze e quindi di governare.

Con *Politische Theorie im Wohlfahrtsstaat*, Luhmann è senza dubbio consapevole di dover compiere un servizio, pur da teorico, per la politica, per i politici e per i cittadini impegnati a seguire, controllare e orientare i governanti preposti alla gestione dello stato (e più in generale ai bilanci degli stati) in tempo di grave crisi economico-istituzionale, che non si risolve né all'interno dello stato e nemmeno nell'ambito della relazione dialettico-simbiotica fra sistema e ambiente. Il moderno stato del benessere richiede cooperazione intersoggettiva finalizzata alla trasformazione e alla produzione di input per il sistema di riferimento, ma richiede altresì responsabilità politica indispensabile per la stabilizzazione del sistema stesso.

## Complessità, autopoiesi e specificazione funzionale

Il pensiero luhmaniano e la proposta interpretativa che ne deriva basata sui concetti di autopoiesi e di autoreferenzialità, ha avuto riflessi in tutti gli ambiti sociali.

La prima fase della di questa costruzione teorica, dipende da alcune matrici culturali: teoria dell'organizzazione, cultura giuridica e metodo funzionalistico. Questo è un passaggio molto importante per analizzare i tratti evolutivi della teoria dei sistemi sociali di Luhmann dalla prima alla seconda fase. In particolare, per Luhmann, il punto di avvio di tale processo è rinvenibile nel progresso e nello sviluppo delle conoscenze nel campo scientifico (in particolare fisica e biologia),

che avrebbero contribuito a modificare radicalmente i principi regolativi del sapere moderno. Il processo di secolarizzazione è, dunque, la conseguenza diretta del processo di autocoscienza del sapere, che ha progressivamente liberato la conoscenza umana da ogni ipotesi metafisica [13].

Il 1984 è un anno decisivo per la costruzione teorica luhmaniana, un periodo che coincide con il suo definitivo distacco dal modello strutturale-funzionalista. Si tratta di un cambio di paradigma la cui più evidente auto-correzione è presentata nell'opera *Soziale Systeme. Grundriß einer allgemeinen Theorie* (1984) [6]. La portata di questa acquisizione è notevole, in quanto sposta il problema dalla ripetizione, cioè delle condizioni della ricorrenza di certi comportamenti o aspettative di comportamenti, alla connessione, cioè al problema di stabilire come passare da un determinato fenomeno a un altro immediatamente successivo. Come conseguenza, anche i concetti-chiave di complessità e struttura risultano sensibilmente modificati ([6] pp. 91, 450, 677).

La complessità, che nel primo Luhmann è collocata prevalentemente all'esterno del sistema, cioè nell'ambiente, ora diviene una prerogativa del sistema stesso, che risulta ipercomplesso in quanto orientato alla propria complessità, ma al tempo stesso capace di trattarla selettivamente e proprio per quest'ultimo motivo è in grado di ridurla. Se si accetta questo punto di partenza il sistema può essere studiato come autopoietico e quindi operativamente chiuso. In altre parole il sistema è in grado di autoprodurre al suo interno gli elementi che lo costituiscono, ma è anche autoreferenziale perché in grado di autoprodurre anche le sue caratteristiche costitutive e la sua organizzazione.

Autopoiesi e autoreferenzialità sono due proprietà del sistema che lo rendono autonomo sul piano strutturale - il sistema continua ad esistere pur di fronte a forti sollecitazioni esterne - e su quello operativo - il sistema opera in relazione all'universale simultaneità delle operazioni della sua struttura - in un orizzonte temporale che è il presente in quanto non vi è possibilità alcuna di conoscere il futuro in anticipo.

Tutti i sistemi sociali sono situati in un ambiente che in definitiva rappresenta tutto ciò che non

## Chiusura operativa

Il concetto di **chiusura operativa** è determinante per comprendere come i sistemi gestiscono la propria apertura rispetto all'ambiente; la chiusura, infatti, è solo operativa, nel senso che il sistema traduce *input* ambientali (irritazioni) in operazioni del sistema. Questo processo interpretativo descrive il modo di operare di tutti i sistemi sociali; ne è prova, per esempio, la sua applicazione al sistema della politica e alla descrizione del suo dominio fenomenologico, cioè la decisione politica.

fa parte del sistema, come l'ambiente naturale e gli esseri umani, dal momento che i loro sistemi psichici e i loro organismi sono entità autonome e differenziate dai sistemi sociali.

**Gianpascquale Preite:** è professore aggregato di Filosofia politica e Politica dell'emergenza e svolge attività di ricerca presso il Dipartimento di Storia, Società e Studi sull'Uomo dell'Università del Salento (DSSSU). Si occupa di Modelli antropologici della filosofia politica; Teoria dei sistemi sociali; Teoria del rischio e Biopolitica. Attualmente è Direttore del Laboratorio di ricerca LEG - Governo delle organizzazioni complesse, ed è corresponsabile (con il prof. Michele De Benedetto) del Gruppo di Lavoro in Biopolitica sanitaria presso il Laboratorio Diffuso di Ricerca Interdisciplinare Applicata alla Medicina (DREAM), Unisalento-ASL Lecce. È membro della Società Italiana di Filosofia Politica (SIFP).

- [1] N. Wiener: *Cybernetics Or Control and Communication in the Animal and the Machine*, The MIT Press, Cambridge, MA (1948).
- [2] N. Wiener: *Introduzione alla cibernetica. L'uso umano degli esseri umani*, Bollati Boringhieri, Torino (1970).
- [3] T. Parsons: *Il sistema sociale*, Einaudi, Torino (1995).
- [4] C. Baraldi: *Socializzazione e autonomia individuale: una teoria sistemica del rapporto fra comunicazione e pensiero*, Franco Angeli, Milano (1992).
- [5] G. Bateson: *Verso un'ecologia della mente*, Adelphi, Milano (2005).
- [6] N. Luhmann: *Soziale Systeme. Grundriß einer allgemeinen Theorie*, Suhrkamp, Frankfurt (1984).
- [7] J. Habermas, N. Luhmann: *Theorie der Gesellschaft oder Sozialtechnologie. Was leistet die Systemforschung?*, Suhrkamp, Frankfurt (1971).
- [8] J. Habermas: *Fatti e Norme*, Guerini, Milano (1996).
- [9] M. Prospero: *La politica moderna*, Carocci, Roma (2002).
- [10] C. Galli (Ed.): *Il pensiero politico del Novecento*, Il Mulino, Bologna (2005).
- [11] N. Luhmann: *Rechtssoziologie*, Rowohlt, Reinbek (1972).
- [12] N. Luhmann: *Teoria Politica nello stato del benessere*, Franco Angeli, Milano (1983).
- [13] P. Barcellona: *Diritto senza società. Dal disincanto all'indifferenza*, Dedalo, Bari (2003).



---

# Discussione

*Ferdinando Boero, Giampaolo Co', Claudio Garola, Marco Mazzeo*

---

## Giampaolo Co'

Caro Nando, io e te assomigliamo agli scacchisti postali di "Citarsi addosso" di Woody Allen [1], che, avendo perso una lettera, giocano due partite differenti e vincono entrambi. Cerco di chiarire alcuni punti, in modo da recuperare la lettera perduta, con la speranza di (ri)cominciare a giocare la stessa partita, non tanto per vedere chi vince, ma per il piacere di giocare.

1. Concordo con te che non esiste un solo modo di fare scienza. Nel tuo intervento non neghi il successo della Fisica nella descrizione di alcuni fenomeni della natura. Nel mio intervento volevo porre all'attenzione i limiti dell'approccio riduzionista - perturbativo che sta alla base della ricerca in Fisica per valutarne l'applicabilità ad altre discipline.
2. Sono d'accordo che la mia definizione degli scopi dell'attività scientifica sia molto orientata alla Fisica, ma penso che sia molto più universale di come tu l'abbia descritta. Nel definire gli scopi della scienza, tu indichi l'identificazione dell'ignoranza e la sua riduzione, ma non definisci cosa sia l'anti-ignoranza, ovvero la conoscenza. La definizione che utilizzo io, invece, è più coraggiosa perché si azzarda a definire la conoscenza, e lo fa indicandola come la capacità di descrivere, e anche di prevedere, il comportamento del sistema che si sta studiando. Hai amplificato il ruolo descrittivo delle scienze storiche, ma parli di *pattern* e *process* che permettono di, ti cito, "...disegnare scenari futuri, usando un po' di saggezza ...". Ma come si identificano *pattern* e *process* se non con un processo mentale riduzionista? Elimina

i dettagli e concentrati su ciò che è rilevante. E poi, inserisci anche tu il desiderio di prevedere. Il limite è la difficoltà nell'uso della matematica? Può essere un problema per Zichichi, e per chi la pensa come lui. Per me è importante che nel concetto di conoscenza, anche se io preferisco comprensione, di un sistema non ci sia solo la descrizione, ma anche la previsione del suo comportamento. Mi piacerebbe confrontarmi con antropologi, psicologi e sociologi per sentire la loro opinione su quanto il desiderio di descrivere e prevedere sia un'evoluzione dell'istinto cacciatore-preda che ci ha permesso di sopravvivere cacciando e scappando.

3. I due processi di descrizione e di previsione non necessariamente devono essere pesati in maniera egualitaria per dare dignità ad una scienza. L'aspetto previsione in Fisica è molto rilevante, ma, giustamente, affermi che in altre scienze non è così. Concordo che molto spesso questo ha prodotto la formazione di gerarchie tra le varie discipline, e concordo pure che queste gerarchie sono fasulle, ma fortunatamente, le cose si modificano nel tempo. Ad esempio, ricordo che fino ai primi anni '80 del secolo scorso, l'astronomia era considerata una sorella minore dai fisici del mondo microscopico, perché la parte descrittiva era preponderante su quella predittiva. La situazione è profondamente cambiata in questi anni e adesso l'astronomia, che ha preso il nome di astrofisica, è pienamente legittimata, e anche invidiata, all'interno della comunità dei Fisici, per l'enorme ricchezza di nuovi fenomeni che propone allo studio.

4. Qui arriva il punto che mi piacerebbe tu discutessi. Le difficoltà nelle previsioni sono dovute al fatto che il sistema è complesso o, più semplicemente, complicato? Io ho cercato di separare questi due concetti che invece tu confondi. Un sistema è complicato quando il numero di variabili è così grande da non poter essere gestito. Tu parli di contingenze e caos deterministico, ma il concetto è lo stesso: il limite, fisico, alla nostra conoscenza dei dettagli del sistema che vogliamo discutere. Nel limite di una conoscenza infinita di interazioni e contingenze si potrebbe prevedere il futuro? La mia risposta a questa domanda è affermativa fino a quando si parla di sistemi complicati. Ovviamente in quanto affermo c'è anche tutta la visione probabilistica e di incertezza legata dalla meccanica quantistica ma non voglio allargare troppo la discussione. Il punto è che i sistemi non sono soltanto complicati ma sono anche complessi, ovvero, che, entro certi limiti non possono essere descritti come parti separate che interagiscono. Questo è il limite intrinseco del Riduzionismo, ma di questo non parli.

5. Concludo con una precisazione sul falsificazionismo popperiano. Tu insisti nel parlare di scienze con enunciati universali ed essenziali. Il punto non è quello, si tratta di metodologia, non di un certificato di qualità. Un'affermazione scientifica deve correre il rischio di poter essere falsificata, sia fenomenologicamente, per osservazione, sia logicamente, per antinomia, una contraddizione logica. Il risultato della prova di falsificazione è rilevante per le conseguenze cognitive, ma non dal punto di vista metodologico. Il punto è che un'affermazione infalsificabile non è scientifica. Ad esempio, la frase "tutte le persone sagge la pensano come me" non è scientifica, perché non è definito cosa sia saggio, a meno di una tautologia. Mentre "tutte le persone più alte di un metro e ottanta la pensano come me" è scientifica, il fatto che sia vera o falsa, dal punto di vista metodologico, è irrilevante.

## Ferdinando Boero

Non ho perso nessuna lettera, caro Giampaolo. Andiamo con ordine. Anzi, no: cominciamo da complesso e da complicato. A volte le parole hanno significati differenti a seconda dei contesti in cui si adoperano. Per me un ecosistema è una cosa, per un informatico è un'altra. Cerchiamole su un dizionario [2]:

*complicato* agg.

1. che presenta difficoltà (non sempre inevitabili) di comprensione o di orientamento; oscuro, tortuoso: un ragionamento c.; un lavoro c., che presenta difficoltà di esecuzione Difficile a chiarirsi o risolversi: un caso davvero c.; un problema c.

*complesso* 1 agg.

1. che presenta difficoltà per la comprensione o l'orientamento, dovute a profondità od oscurità di concetti oppure a una molteplicità di elementi o di aspetti: un ragionamento piuttosto c.; una personalità c. Configurato, strutturato o funzionante in modo complicato: un c. meccanismo di trasmissione.

2. Risultante di due o più parti interdipendenti (contrario di semplice). In grammatica: proposizione complessa, che presenta, oltre alle parti essenziali (soggetto, predicato, eventuale complemento oggetto), anche uno o più complementi indiretti In diritto: atto complesso, che risulta dalle manifestazioni di volontà di più soggetti, tendenti al medesimo scopo In matematica: numero complesso, in passato, ogni espressione di grandezze suddivise in modo non decimale; oggi, numero che è la somma di un numero reale e di un numero immaginario In chimica: composto complesso, vedi coordinazione.

Come vedi i significati sono tanti. Per me un sistema complesso (o complicato) è intrinsecamente imprevedibile: per esempio la storia. Non puoi scrivere il giornale di dopodomani, oggi. Oggi si scrive quello di domani, riportando i fatti già accaduti. Ma non quello di dopodomani. Non c'è un modo per saperlo. Gli economisti cercano di farlo, e prevedono il futuro. Ovviamente sbagliano quasi sempre. E hanno portato la situazione ad un punto tale che i sistemi economici stanno sballando. Assieme ai sistemi sociali.

No, guarda, non ci siamo per quel che riguarda la falsificazione. Prendi l'evoluzione. Per Darwin l'evoluzione è graduale e, fino al 1972, per tutti l'evoluzione era graduale. Piano piano una specie diventa un'altra specie. Un enunciato universale. Nel 1972 Eldredge e Gould [3] propongono la teoria degli equilibri punteggiati: le specie restano immutate per molto tempo e poi, in periodi brevi, compiono salti evolutivi e diventano altre specie. Eldredge e Gould sono popperiani di ferro, e quindi dicono di aver falsificato il gradualismo filetico darwiniano. I gradualisti ovviamente si incazzano e quando trovano esempi di gradualismo dicono di aver falsificato il saltazionismo. I creazionisti godono. Non esiste una legge universale su come avvenga l'evoluzione. Eldredge e Gould hanno falsificato l'universalità del gradualismo, non la sua esistenza. E i gradualisti falsificano l'universalità del saltazionismo, non la sua esistenza.

Per voi è diverso, per quel che capisco io. I tipi che pretendevano di aver dimostrato che ci possono essere cose più veloci della luce erano molto contenti perché se avessero dimostrato questo sarebbe stato necessario riscrivere la fisica.

E vabbé, ma questo non vale per la biologia: esiste l'evoluzione per salti ed esiste l'evoluzione graduale. Gli enunciati esistenziali si possono solo verificare e non si possono falsificare. Mentre gli universali si possono solo falsificare e non si possono verificare. Ma quando entri nel vicolo buio di scienze dove valgono più regole assieme, esisten-

ziali, i tuoi strumenti universali di indagine non riescono a funzionare. Ci vuole altro. Quell'altro si chiama complessità. Una realtà molto complicata. Dove non c'è vero o falso. Bianco o nero. Dove non butto via tutto se mi accorgo che qualche fenomeno non va come pensavo che andassero tutti i fenomeni.

La teoria darwiniana è stata riformata con il neodarwinismo, e poi con la sintesi moderna, e poi con l'evo-devo, e poi con il saltazionismo. È diventata sempre più complessa. Ma non è mai predittiva. Spiega gli eventi e identifica le cause che li hanno determinati, ma non succederà mai, di nuovo, la stessa cosa. Sarebbe come pensare di avere la formula per prevedere i numeri che usciranno nel gioco del lotto. Mi piacerebbe molto prevedere il futuro con una bella formula. Ma come mai tutti i fisici che si sono avventurati in biologia non sono stati in grado di farlo? Tutt'al più trovano il caos, e le loro equazioni perdono di stabilità, e le predizioni sono sempre più vaghe, oltre il breve termine. A noi non interessa il breve termine, a noi interessa il medio e lungo termine. Noi una teoria solida l'abbiamo.

La fisica, per quel che capisco, ancora non c'è riuscita. Ma solo perché vuole la teoria del tutto. Noi sappiamo che non si può, nei nostri ambiti di interesse. Ma riusciamo a spiegare come originano le specie, e come siamo originati noi. A me va benissimo la fisica, non ci penso neppure di insegnare ai fisici come si fa il loro mestiere, ma so che il mio non prevede lo stesso modo di operare. La riduzione dell'ignoranza consiste nell'osservare i *pattern* e nel comprendere i processi che li determinano. Ma questo non significa prevedere il futuro. Significa capire il passato (la storia) e comprendere come dal passato si sia arrivati al presente. La saggezza consiste nell'effettuare previsioni deboli, non di inserire i dati in un computer, far girare gli algoritmi, e avere il futuro. Questo lo fanno gli economisti. Alcuni.

Ho scritto un libretto, si chiama "Ecco perché i cani fanno la pipì sulle ruote delle macchine." [4] Parlo delle due leggi della natura.

## Equazione logistica

L'equazione logistica descrive l'evoluzione di una popolazione con un tasso di crescita  $r$  in un ambiente che può sostenere al massimo un numero  $K$  di individui. L'equazione differenziale che descrive questo processo di crescita è:

$$\frac{dN(t)}{dt} = rN(t) \left( 1 - \frac{N(t)}{K} \right) .$$

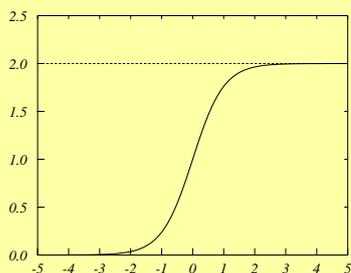
In assenza del secondo termine dell'equazione si avrebbe una crescita esponenziale.

La soluzione dell'equazione precedente può essere espressa come

$$N(t) = \frac{KN_0e^{rt}}{K + N_0(e^{rt} - 1)}$$

dove  $N_0$  è la popolazione iniziale.

L'andamento di questa funzione, calcolata per  $N_0 = 1$ ,  $r = 1.0$  e  $K = 2$  è presentato nel grafico qui sotto.



Eccole qua:

- tutte le specie tendono ad aumentare di numero (la legge della crescita),
- anche se tutte le specie tendono ad aumentare di numero, non tutte possono farlo perché il mondo non ha risorse sufficienti per tutte (la legge del limite).

L'equazione logistica, e il grafico che ne deriva (si veda l'inserito), contiene  $r$  (il tasso di crescita) e  $K$  (la capacità portante: il numero massimo di individui di una specie che un ecosistema può sostenere). Una sola equazione contiene tutt'e due le leggi, ma non

la possiamo usare per prevedere il futuro. La possiamo trasformare in una curva, per capire meglio. La curva cresce, ma a un certo punto si ferma e diventa orizzontale. Ha raggiunto  $K$ , l'equilibrio. Però l'evoluzione, la competizione, la predazione, le malattie etc. modificano queste semplici variabili. La curva è solo teorica, così come l'equazione. Un balletto. La vita vera (nel vicolo scuro) è differente. Quello che basta sapere è che c'è la crescita ( $r$ ) ma c'è anche il limite ( $K$ ).

Quando siamo passati da cacciatori e raccoglitori a agricoltori e allevatori abbiamo spostato il limite, la capacità portante. E siamo cresciuti di numero. Ora, mi potresti chiedere di prevedere il numero massimo di umani che il pianeta può sostenere. Ma che me ne faccio? E comunque: dipende da quanto consuma ogni umano. Se è un americano, allora ci vogliono già 4 pianeti. Se è un africano c'è ancora un po' di spazio, visto il diverso tasso di consumo di risorse nei due popoli.

A me non interessa la predizione dura (che tanto potrebbe anche fallire, visto che le cose cambiano: la storia), mi interessa la predizione molle (nel senso che non è precisa): se continuiamo così prima o poi i sistemi collassano. E dato che tutti i sistemi economici ci chiedono di crescere, posso affermare con assoluta certezza, prevedendolo, che prima o poi ci schianteremo. Non so dirti quando, ma nessuno lo sa.

Intanto vediamo come possiamo cavarcela con questo virus pandemico. Il Ministro Boccia ha ragione a chiedere predizioni alla scienza, visto che gli epistemologi dicono che le scienze serie sono predittive e che gli scienziati duri dicono di essere in grado di effettuare predizioni. Se consulta gli scienziati e questi non prevedono, che scienziati sono? Boccia ha ragione ad arrabbiarsi. La colpa è di noi scienziati che non gli abbiamo spiegato che non tutte le scienze possono essere predittive. Quelle che affrontano problemi semplici lo sono, quelle che affrontano problemi complessi no.

Boccia è un economista, e gli economisti usano la matematica per prevedere il futuro

in sistemi storici. Usare gli strumenti che funzionano in sistemi a-storici (governati da vincoli e in cui le contingenze non sono importanti,) per prevedere il comportamento di sistemi storici (governati da vincoli e contingenze) è un errore epistemologico capitale. E i guai in cui ci siamo cacciati dipendono proprio da questo. Sarebbe bellissimo prevedere il futuro nei sistemi storici, ma allora ti devi rivolgere ai chiromanti, e lo strumento è la sfera di cristallo. Magari mascherata da algoritmi.

## Marco Mazzeo

Cari Giampaolo e Ferdinando, il vostro articolo testimonia i punti di vista epistemologici sulla scienza attraverso due discipline scientifiche molto diverse tra loro, ovvero la fisica e la biologia. Entrambi avete esordito nel definire cosa sia la scienza, attraverso l'identificazione dei compiti cui una teoria scientifica deve assolvere per poter, a buon diritto, essere considerata una buona teoria. Giampaolo Co' ha sottolineato che una buona teoria scientifica deve avere la capacità di spiegare i fenomeni attraverso il suo potere predittivo, nel senso di essere in grado di produrre affermazioni su come evolverà nel tempo il sistema in oggetto. Dunque è fondamentale che essa si basi su equazioni differenziali o comunque predittive. Al contrario Boero, zoologo, riprendendo una definizione dello storico Yuval Harari, ha evidenziato che la scienza deve identificare e ridurre l'ignoranza, là dove può. Boero, rendendosi conto che ogni scienza ha i suoi metodi, ha dato una definizione più generale di Co' ma rispetto a quella è risultata, a mio avviso, estremamente minimalista e blanda, e alla fine inefficace nell'identificare una teoria scientifica separandola dalla pletora delle teorie non-scientifiche, in quanto anche la psicoanalisi cerca di ridurre l'ignoranza sugli eventi passati di un individuo, ma definirla scienza è un azzardo. Tuttavia quando poi si procede nelle singole discipline, la fisica e la biologia, entrambi gli autori risultano più puntuali: Co' fa della fisica una scienza predittiva anche e soprattutto in virtù del suo statuto epistemologico riduzionista; Boero fa, al contrario, della biologia una scienza intrinsecamente

olistica e dunque da un lato imprevedibile, dall'altra storica e descrittiva.

Qui pongo già una critica a entrambi, in quanto se da un lato Co' sottovaluta nel suo intervento la sotto-determinazione delle teorie, ovvero il fatto che più teorie possano spiegare bene e addirittura fare previsioni sugli stessi fenomeni, Boero non riconosce, non in modo esplicito, l'importanza del riduzionismo e determinismo in termini di causazione dal basso per la biologia. Un esempio di sotto-determinazione è il modello tolemaico e quello copernicano che, almeno fino al modello a orbite ellittiche di Keplero, facevano le stesse previsioni circa le posizioni dei pianeti. Dunque è evidente che, pur essendo importante, la previsione non può essere l'unico criterio per selezionare una teoria. E d'altro canto previsione non vuol dire spiegazione. Posso prevedere cinematicamente dove sarà il pianeta (che prevede l'individuazione di una regolarità che diviene legge) ma senza capire il perché, la sua dinamica, ovvero senza individuare una causa sottostante. D'altro canto un esempio di causazione dal basso (il contrario dell'olismo che si basa sulla causazione *top-down*) è proprio il paradigma fondamentale della biologia: DNA → proteina → espressione fenotipica. La causazione dal basso e il mantenimento dell'ordine sequenziale delle strutture degli acidi nucleici è ciò che garantisce l'espressione dello stesso carattere ereditario per più generazioni. Questo è un aspetto che evidenziato molto bene proprio da Schrödinger, che prevede nel suo libro "Che cos'è la vita" la necessità di esistenza di un semicristallo periodico, il DNA appunto, che potesse conservare l'informazione esprimendola mediante un processo di replicazione e codifica causale. Qui i limiti. Andiamo invece ai successi delle loro definizioni.

È evidente che le definizioni che entrambi hanno dato sono manifestazioni degli statuti epistemologici su cui le discipline in oggetto si sono strutturate, e di cui tuttavia, mentre l'epistemologia della fisica è abbastanza nota, meno nota, se non completamente ignorata anche a molti filosofi, è quella della filosofia della biologia. Il motivo è che, almeno in età moderna, mentre la filosofia della fisica nasce contemporaneamente alla fisica stessa, con Cartesio e Galilei, anzi a suo fondamento, nonché come rigetto del programma aristotelico delle qualità e delle cause

finali, la filosofia della biologia nasce in realtà negli anni sessanta del secolo scorso, un secolo dopo la teoria dell'evoluzione darwiniana, mezzo secolo dopo la sintesi neo-darwiniana e la scoperta dei geni e circa un decennio dopo la scoperta del DNA. Tuttavia la giovinezza di questa branca della filosofia non ha giovato certo alla sua diffusione. Se infatti, per ammettere che i fisici tendono a credere che i loro metodi siano quelli veri e che le scienze che non li usano siano sorelle minori della fisica, Boero non è nuovo a scegliersi un facile avversario come Antonino Zichichi, è anche vero che da Ernest Rutherford, che riteneva la biologia una collezione di francobolli, a Murrey Gell Mann, che riteneva che tutto fosse ri(con)ducibile alla fisica, i fisici non si sono sprecati nell'esternare un fisicalismo estremista, facendo così coincidere la filosofia della scienza con la filosofia della fisica e la scienza con ciò che fa dichiarazioni universali e predittive. Le conseguenze non sono solo accademiche, in quanto vedere la natura come un insieme di enti fisici, di cose dotate di meccanismi, rende il livello del nostro rapporto con la natura strettamente utilitaristico: la natura non è più "lo sfondo immutabile che fece uomini e déi" come ebbe a dire Platone oppure un flusso perenne in equilibrio come ebbe a dire Eraclito, bensì un forziere di risorse da scassinare, come nemmeno tanto implicitamente ammette Bacone. Inoltre alcuni settori di ricerca attorno alla vita extraterrestre sono l'espressione dell'idea di considerare il vivente come un fenomeno universale al pari della fusione nucleare o della gravità, rinunciando alla sua contingenza. Carl Sagan è stato un grande divulgatore dell'idea che la vita sia un fenomeno universale. Tutto ciò deriva da un impianto filosofico riduzionista, meccanicista e in cui le leggi la fanno da padrone. Ma non sono solo i fisici ad abbracciare il riduzionismo spinto, che intelligentemente Co' rifiuta grazie al suo elogio, "ma non troppo", di questa posizione filosofica. Infatti anche Richard Dawkins, biologo evolucionista, è dichiaratamente riduzionista, come è evidente da alcuni suoi best seller come "il gene egoista", per il quale gli organismi viventi non sono altro che contenitori di DNA il cui unico scopo è diffondere quella sequenza specifica il più possibile. Tuttavia biologi come Ernst Mayr e Stephen J. Gould, quasi sconosciuti ai fisici, sono

chiari circa le difficoltà, e spesso l'inutilità, dell'epistemologia riduzionista e in generale che le metodologie fisiche hanno per descrivere il vivente. Proprio Ernst Mayr scrisse un bellissimo volume dal titolo (edizione italiana) "L'unicità della biologia: sull'autonomia di una disciplina scientifica". Ma su cosa si fonda la filosofia della biologia?

Potremmo esprimerci dicendo che l'epistemologia della fisica si concentra soprattutto sulla spiegazione dei processi in termini di cose che, interagendo, producono i fenomeni, mentre al contrario la biologia fornisce soprattutto spiegazioni delle cose in termini di processi evolutivi, i quali producono le cose nel corso della storia. La differenza è evidentemente nella capacità di classificare un fenomeno nella categoria cose o processi. È tuttavia evidente che non possiamo parlare di processi senza cose, né di cose senza processi. Il programma riduzionista che ci spinge all'identificazione delle particelle elementari, cioè prive di struttura interna, è pertanto fondamentale. Ma è anche vero che gli enti della biologia sono cose frutto di una storia di processi, chimici, biologici e persino geologici. Una cellula può essere vista come un laboratorio di chimica aperto, un insieme di processi a *feedback* retroattivo in cui i processi dall'alto possono causare quelli in basso. Dunque abbiamo bisogno di entrambe le visioni. Tuttavia questa modalità di causazione non viene minimamente tenuta in conto dai fisici, nemmeno laddove la fisica assume qualche connotazione storicistica, come nel caso della evoluzione del sistema solare, dell'universo e persino degli atomi. Facciamo un esempio chiaro. La fisica e la chimica illustrano delle tavole dei cosiddetti costituenti elementari, particelle fondamentali la prima, elementi chimici la seconda. Queste tabelle sono statiche e non veicolano alcuna idea di evoluzione. Quando tuttavia si è scoperto che gli atomi pesanti sono stati generati da processi di morte stellare a partire da atomi leggeri la storia è entrata a fare parte della fisica e della chimica. Tuttavia la narrazione che viene fatta è di tipo riduzionistico, ovvero con causazione *bottom-up*, e deterministico. La contingenza rientra solo perché non sappiamo quando la stella esploderà, né dove verranno poi disperse le ceneri di atomi pesanti una volta esplosa. Al contrario la zoologia si basa

su una mappatura delle specie viventi, le quali a loro volta provengono da una evoluzione storica, ma qui non solo la contingenza la fa da padrona, ma i meccanismi di selezione corrispondono a pressioni ambientali sugli individui della specie, e dunque producono una causazione *top-down*.

Perché la fisica guarda più alle cose e la biologia più ai processi? La motivazione risiede in una scelta epistemologica che ha una origine storica ben precisa: Cartesio e Galilei. Cartesio, stabilendo la divisione tra *res-cogitans* e *res-extendens* ha operato una divisione la quale ha finito per attribuire la prima all'uomo escludendo il vivente non umano e, naturalmente, il non vivente. Pertanto animali e piante sono divenute macchine, complesse, ma pur sempre macchine. E come una macchina si comprende a partire dai suoi ingranaggi, le cose, applicando il riduzionismo in toto anche il vivente viene inglobato in questa visione riduzionista e meccanicistica. E qui entra Galilei, il quale, opponendosi alla scienza di Aristotele (biologo e zoologo oltre che filosofo) delle qualità e delle cause finali, e abbracciando la filosofia meccanicistica (nel senso di lasciarsi ispirare dalle macchine) propone una scienza riduzionista, delle quantità, della misura e delle cause efficienti. La fisica non deve cioè discutere delle sensazioni e delle qualità ma, riprendendo il programma atomista di Democrito e Lucrezio, (ovvero delle forme, dimensioni e movimento delle cose ovvero della geometria delle cose), vincola la fisica allo studio di tutto ciò che manifesta un comportamento suscettibile di essere matematizzabile. Ma questa scelta, che ha avuto un successo enorme negli ultimi quattro secoli, ha dei risvolti anche metodologici nella rilevazione dei pattern stessi, cioè di quali cose e quali interazioni tra cose debbano essere selezionate. Tale individuazione avviene mediante un esperimento scientifico che però non è una semplice osservazione passiva, ma una selezione attiva di ciò che occorre considerare importante e ciò che va trascurato. Infatti, proprio per poter fare emergere regolarità matematiche, i fisici studiano quei fenomeni, quei processi e quegli enti selezionati in quanto semplici o forzatamente resi tali, in un esperimento, dal trascurare, come fa notare Co' e come esplicitamente ebbe a dire Galilei ne *Il Saggiatore*, i cosiddetti "accidenti". Rimuovendo gli accidenti, come l'attrito, le asperità, e

tutto ciò che non è descrivibile dalla matematica come il colore, il sapore ecc, l'ente diviene sempre più simile ad un ente geometrico. Isolando il sistema inoltre l'individuazione di regolarità riesce meglio. Pertanto la matematica diventa efficace perché i fisici selezionano o rendono gli enti di natura più semplici (anche isolandoli) e, rimuovendo gli accidenti, più poveri, ma di certo matematicamente trattabili. Platone riteneva il mondo reale una brutta copia di quello della matematica. Galilei rende il mondo reale ... matematico. Trascurare gli accidenti è il mestiere del fisico.

Questa metodologia ha funzionato su molti enti e fenomeni, selezionati in natura o creati in laboratorio, ma ciò ha fatto ritenere che il complesso non sia altro che una manifestazione del semplice e delle sue parti in interazione. Cose che interagiscono in una causazione basso-alto, semplice-complesso. Naturalmente i fisici sono consapevoli che ci sono fenomeni troppo complessi per essere esprimibili attraverso equazioni matematiche di tipo differenziale (che sono le strutture matematiche a cui si riferisce Boero) ma sotto sotto credono che questo sia solo un problema tecnico. L'esempio della lucertola proposto da Co' è chiarificatore. Ebbene il fallimento del riduzionismo è proprio in questa pretesa perché più fenomeni hanno mostrato che in realtà la causazione *top-down* rende la cosa impraticabile anche per via teoretica e non solo tecnica. La scoperta ad esempio del *transfer* di pezzi di genomi tra specie batteriche e viventi con specie pluricellulari complesse ci fa capire come la causazione riduzionista *bottom-up* sia letteralmente un residuo fossile di una idea che stenta a morire. E non voglio parlare dei processi di *entanglement* quantistico, dove è evidente che il riduzionismo, inteso come conoscenza del comportamento del sistema a partire dalla conoscenza completa delle sue parti, è inapplicabile già a sistemi che Boero definirebbe semplici, come gli stati di singoletto, dove possiamo dire tutto circa lo *spin* di un sistema senza conoscere la configurazione di spin delle sue parti (nel senso di non poter nemmeno in linea di principio stabilire se una delle due coppie ha *spin up* o *down*).

Inoltre, per tornare alla biologia, se semplifichiamo una cellula trascurando gli accidenti, rendendola simile ad un ente matematico, o non

riusciremo a dire nulla del comportamento futuro della vera cellula oppure parleremo di una cellula morta, cioè di una non-cellula. Boero, che evidentemente comprende da biologo il pericolo oltre che l'inutilità di trasportare questi metodi anche nel vivente o nel sociale, sostiene così che la biologia faccia essenzialmente descrizioni non previsionali ma esistenziali dei processi e degli enti biologici.

La biologia infine non si basa su principi da cui è possibile dedurre il futuro delle specie oppure l'esistenza di certe specie. Può solo prendere atto della esistenza di una specie e descriverle sotto vari aspetti. Per fare una allegoria sarebbe come pretendere di risolvere equazioni differenziali nel tempo con condizioni al contorno mutevoli...nel tempo. Avrebbe ancora senso parlare di determinismo, causazione dal basso, ecc., anche in via del tutto teoretica? Gli enti della biologia vivono pertanto degli accidenti che la fisica tenta di eliminare, accidenti che sono determinanti per l'evoluzione successiva e che sono determinati, spesso, dall'ente stesso nella sua interazione con l'ambiente. Ciò che il riduzionismo, che i fisici hanno abbracciato come il loro statuto epistemologico, rifiuta è dunque una causazione *top-down*, cioè che gli enti e i fenomeni delle macro-scale determinino il comportamento, o le leggi se volete, delle parti. La divisione cellulare è un altro esempio. Una mentalità riduzionista si concentra prevalentemente sul fatto che i cromosomi si dividono e così la cellula, credendo che tale divisione avvenga dall'interno dei cromosomi o solo da lì. Invece ci si rende conto che la cellula forma nel citoplasma dei microtubuli che in un certo senso tirano i cromosomi trasportandoli nelle due cellule figlie: causazione *top-down*, dall'ambiente alle parti. Altro esempio è nei nostri comportamenti, i quali non sono solo il parto di processi molecolari o cellulari nel cervello, ma sono influenzati e spesso determinati o causati dall'ambiente sociale in cui ci troviamo. L'individuo fa le regole ma poi le regole retroagiscono sul suo comportamento e sul suo stesso modo di concepire il mondo, il quale a sua volta retroagisce modificando ancora una volta le regole sociali e così via, in un fluire tra una causazione *bottom-up* e una causazione *top-down*. Separare le due causazioni è tipico del fisico e del biologo, i quali, così facendo dividono il mondo in due:

da un lato fenomeni riduzionisti e a causazione *bottom-up*, dall'altra fenomeni olistici con causazione *top-down*. Evidentemente sono visioni parziali che occorre far dialogare. Alla luce di ciò io credo pertanto che la visione di Boero di ritenere che il mondo sia rappresentabile come uno spettro dove a un estremo abbiamo enti semplici dotati di leggi universali studiati dalla fisica e all'altro estremo enti complessi aperti con caratteristiche solo esistenziali sia superata. Da un lato abbiamo enti selezionati o semplificati dai fisici in quanto suscettibili di descrizione matematica, e costituiti da componenti il cui studio ci dice tutto delle caratteristiche del macrosistema, il cui comportamento rientra nei cosiddetti epi-fenomeni. Qui la causazione va dal basso all'alto. E tuttavia, anche a livello fondamentale, abbiamo visto che ci sono strutture irriducibili come le coppie *entangled*. Dall'altra abbiamo enti complessi come le cellule o gli organismi, i quali vivono in ecosistemi che impongono una causazione dall'alto al basso, l'olismo, e in tal caso si dovrebbe parlare delle componenti come ipo-fenomeni. È evidente però che il DNA impone anche, dal basso, le sue regole. Dunque occorre ripensare la natura come un sistema di causazione reciproca dal basso all'alto e viceversa, ovvero una miscela di riduzionismo e olismo. È per questo che conviene comunque che un biologo studi fisica e matematica al primo anno. Ma certamente lo studio della ecologia, o meglio di tutte quelle teorie matematiche che cercano di descrivere la causazioni *top-down*, sarebbe utile per un fisico qualora la sua disciplina riconoscesse che le leggi potrebbero riflettere comportamenti di sistemi su vari livelli che non necessariamente emergono come epifenomeni che dipendono dalle componenti medesime.

## Claudio Garola

Ho letto con attenzione i contributi di Giampaolo Cò, Ferdinando Boero e Marco Mazzeo, e mi sembra interessante il fatto che nessuno di questi colleghi aderisca acriticamente alla prospettiva epistemologica implicitamente accettata dalla Hossenfelder. In particolare, Giampaolo Cò scrive:

"L'idea riduzionista è quella di ana-

lizzare un fenomeno classificandone i vari aspetti che lo caratterizzano in termini gerarchici, e quindi considerare gli aspetti più importanti e trascurare quelli meno importanti. Questo processo implica, per definizione, che lo studio di un sistema richieda l'identificazione di varie parti che lo compongono. Il secondo passo è quello della classificazione gerarchica delle sue parti e, per ultimo, lo studio delle interazioni reciproche."

In questa definizione il riduzionismo è presentato come un metodo per la costruzione di teorie, quindi utile nel contesto della scoperta. Si tratta del tipo di riduzionismo che ho chiamato metodologico nel mio intervento, e Co' ne sottolinea (a mio parere giustamente) i meriti, evitando però ogni impegno ontologico esplicito. La definizione di Co' presenta anche un aspetto più sottile: se nell'analisi di un fenomeno occorre identificare gli aspetti meno importanti, che poi vengono trascurati, lo schema teorico che si costruisce può costituire solo un modello del fenomeno stesso. La storia della scienza ha dimostrato che occorrono in genere molti tentativi prima di poter individuare ciò che è più importante e ciò che è meno importante, in modo che il modello risultante fornisca spiegazioni e previsioni empiricamente soddisfacenti. Ma la procedura seguita mostra che ogni reificazione delle entità teoriche e delle leggi del modello - che è solo uno fra i molti astrattamente possibili a causa della sotto-determinazione delle teorie - si basa su un discutibile atto di fede. Inoltre il modello ha dei limiti a causa di ciò che è stato trascurato nella sua costruzione idealizzando le parti costituenti come prive di struttura interna. Questi limiti possono emergere se il dominio dei fenomeni presi in considerazione si amplia a causa del progresso della ricerca. Quando ciò accade il metodo riduzionista fallisce, come nell'esempio illustrato da Co' nella Figura 2 del suo intervento (per questo il metodo riduzionista merita di essere elogiato ... ma non troppo). Un riduzionista convinto potrebbe comunque obiettare che non è il metodo riduzionista a fallire in questi casi, ma è piuttosto la scelta, eccessivamente semplificata, delle parti che compongono il sistema. Tuttavia una scelta più dettagliata può richiedere un cam-

biamento di scala e l'impossibilità di ricostruire effettivamente il sistema a partire dalle nuove entità teoriche identificate come parti costituenti (operando secondo quel metodo problematico che Co' chiama 'riduzionismo crescente'). L'ipotesi che questa impossibilità sia tecnica e non di principio è in realtà, afferma Co', un atto di fede: affermazione che a me sembra corretta e coerente con l'analisi critica che ho proposto nel mio intervento (Sezione 4). Se questo atto di fede non viene compiuto l'emergere di nuove entità teoriche e nuove leggi con l'aumento della scala considerata costituisce un fenomeno non spiegabile in termini riduzionistici.

Marco Mazzeo, comunque, imputa a Co' di aver trascurato la sotto-determinazione delle teorie. A me non è chiaro se questa critica sia appropriata. Giampaolo parla delle entità teoriche come costruite e sembra quindi consapevole del ruolo attivo del ricercatore nel produrre entità teoriche utili per descrivere e predire le fenomenologie osservate: consapevole, quindi, della possibilità in linea di principio di concepire entità teoriche diverse ma altrettanto utili allo stesso scopo. Io penso piuttosto che nella definizione data da Co' delle finalità della scienza quando scrive:

"Considero scopo della Scienza quello di comprendere il comportamento del sistema studiato. ... Ritengo che si comprenda un sistema se si è capaci di *descriverne* [corsivo mio] il comportamento passato e prevederne il comportamento futuro."

si dovrebbe sostituire la parola *descriverne* con la parola *spiegarne*. A una teoria scientifica, infatti è richiesto di avere potere esplicativo: di non limitarsi, cioè, a descrivere i comportamenti passati ma di essere anche capace di spiegarli, mostrando che essi sono deducibili dalle nozioni primitive, dalle leggi e dall'interpretazione empirica della teoria. Nella sua forma attuale, comunque, la citazione che precede mostra che, secondo Co', il fatto che una teoria scientifica abbia capacità predittiva non è sufficiente ad accettarla come scientifica, e questo risponde a un'obiezione che Marco avanza nel seguito del suo intervento.

Più in generale, concordo con molte delle osservazioni di Mazzeo. In particolare, concordo con

la sua convinzione che la causazione *bottom-up* e la causazione *top-down* giochino entrambe un ruolo fondamentale nello sviluppo di ogni disciplina scientifica (quindi, sia nella fisica che nella biologia) e condivido la sua critica, basata su un esempio fondamentale, alla posizione di Nando Boero, che sembra escludere ogni causazione *bottom-up* in biologia.

Per quanto riguarda l'intervento di Nando, mi pare che esso ponga implicitamente un problema cruciale: l'uso del linguaggio matematico e la presenza di capacità predittive sono necessari per classificare una disciplina come realmente scientifica? A questo proposito occorre riconoscere che molti fisici (non tutti) hanno sacralizzato la matematica, facendone un fattore discriminante fra scienza e non-scienza e giungendo a ontologizzare le entità matematiche stesse, come ho spiegato nel mio intervento (Sezione 4). In alcuni casi si è giunti a sostenere la tesi razionalistica estrema che le strutture fondamentali del mondo fisico siano raggiungibili tramite la pura speculazione matematica, senza necessità di ulteriori supporti sperimentali. Ora, è innegabile che l'uso della matematica per rappresentare entità fisiche abbia permesso alla fisica (e non solo alla fisica) di raggiungere grandissimi successi, ma è anche vero che tale uso consente solo di costruire modelli, la cui ontologizzazione rivela a mio parere un misto di presunzione e di ingenuità epistemologica. Ovviamente il linguaggio matematico permette un rigore deduttivo e una precisione impossibili con altri mezzi (e questo anche nel caso di sistemi complessi, quando ne sia possibile una modellizzazione matematica). Tuttavia esistono ambiti di ricerca in cui una rappresentazione matematica dei sistemi studiati appare impossibile, e non mi sembra sensato classificare le discipline che se ne occupano in modo sistematico come puramente descrittive o negare loro uno statuto di scientificità. Considerando la biologia come esempio, essa fornisce sia spiegazioni che previsioni. Queste ultime possono essere deboli, o molli, come dice Boero nella sua discussione con Co': ma restano importanti, poiché contribuiscono sostanzialmente alla conoscenza limitando lo spazio delle possibilità. Inoltre Boero ammette che in qualche caso sia possibile anche in biologia effettuare previsioni utilizzando strumenti matematici: ma, osserva,

si tratta di previsioni di tipo probabilistico. Il fatto è che questo è esattamente quello che fa la fisica moderna dopo l'invenzione della meccanica quantistica, così come anche la fisica moderna si interessa di sistemi complessi rilevandone l'imprevedibilità a medio e lungo termine. A me sembra perciò che la differenza fra le due discipline sia quantitativa più che qualitativa (nel senso che metodi e procedure simili si ritrovano in entrambe, ma con accenti fortemente diversi) e che Boero, nella sua foga polemica contro le posizioni epistemologiche che non condivide (come quelle, in particolare, che ho analizzato e criticato nel mio intervento), estremizzi le differenze fra le due discipline.

Vorrei concludere con alcune brevi osservazioni. In primo luogo, la richiesta di previsioni esatte da parte di persone e personaggi estranei al mondo della scienza mi sembra dovuta più che altro a un modo di pensare popolare (diffuso peraltro anche in ambienti colti) che spesso irride e contesta gli scienziati, ma che poi li chiama prepotentemente in aiuto in caso di bisogno, in base a una visione mitica secondo cui la scienza deve fornire certezze assolute. L'arroganza degli "scienziati duri" non credo sia determinante in questo caso, come invece afferma Boero. Anche perché neppure gli scienziati duri sono così stupidi da asserire di poter prevedere tutto.

In secondo luogo, la distinzione fra sistemi complicati e sistemi complessi introdotta da Giampaolo mi sembra importante, poiché evidenzia una differenza teorica fondamentale fra due tipi di sistemi fisici, come ho sostenuto nel mio intervento (Sezione 4). Ai termini *complicato* e *complesso* sono attribuiti in questo caso significati tecnici diversi, che si aggiungono e si sovrappongono solo parzialmente ai significati che compaiono nei dizionari, seguendo una prassi invalsa nei linguaggi specialistici delle varie discipline scientifiche.

Infine, Co' e Boero citano il falsificazionismo Popperiano nella loro discussione. Tuttavia l'epistemologia di Popper crea molti problemi che dovrebbero essere approfonditi. Limitandomi a esempi molto semplici, la negazione di un enunciato universale che sia falsificabile ma non verificabile è un enunciato esistenziale verificabile ma non falsificabile: sarà per questo non scientifico? Inoltre, la congiunzione di un enunciato

falsificabile con un enunciato non falsificabile (ad esempio, un enunciato che affermi l'immortalità dell'anima) è comunque falsificabile: sarà allora un enunciato scientifico? Ed è poi possibile ridurre una teoria a una collezione di enunciati osservativi falsificabili? Esistono ovviamente nella posizione di Popper anche problemi più complessi, e oggi la maggioranza degli epistemologi la ritiene superata, benché molti fisici continuino a farvi riferimento. Mi sembra quindi opportuno ricordare che questi temi sono stati affrontati esaurientemente da due studiosi della nostra università in un libro pubblicato nel 2017, cui rimando i colleghi che volessero conoscere più a fondo l'argomento [5].



- [1] W. Allen: *Citarsi addosso*, Bompiani, Milano (1980).
- [2] <http://www.treccani.it/vocabolario/dizionario/>
- [3] N. Eldredge, S. J. Gould: *Punctuated equilibria: an alternative to phyletic gradualism* pp. 82 - 115. In: T. J. M. Schopf, ed. *Models in Paleobiology*, Freeman, Cooper and Co.; San Francisco, Calif. (1972).
- [4] F. Boero: *Ecco perché i cani fanno la pipì sulle ruote delle macchine. L'uomo e il suo rapporto con gli altri animali e le leggi della natura*, Manni Editori, San Cesario, Le (2018).
- [5] C. Dalla Pozza, A. Negro: *Come Distinguere Scienza e Non-Scienza*, Carocci, Roma (2017).



**Ferdinando Boero:** è Professore di Zoologia presso l'Università di Napoli Federico II, Associato a CNR-IAS e Stazione Zoologica Anton Dohrn. Si occupa di biodiversità e funzionamento degli ecosistemi.

**Giampaolo Co':** è Professore Associato di Fisica Nucleare presso l'Università del Salento. Si occupa di sistemi a multicorpi.

**Claudio Garola:** professore Ordinario, in pensione, di Logica e Filosofia della Scienza presso il Dipartimento di Matematica e Fisica "E. De Giorgi" dell'Università del Salento.

**Marco Mazzeo:** è ricercatore in Fisica sperimentale presso il Dipartimento di Matematica e Fisica "E. De Giorgi" dell'Università del Salento. Si occupa di nanofotonica e sviluppo di dispositivi

molecolari che vanno dalla generazione di luce incoerente (OLED) e coerente (Laser) allo studio di condensati di Bose Einstein a temperatura ambiente in composti organici. Appassionato di storia della scienza e storia delle religioni.



# Diverse concezioni dell'entropia

**Gaia Sacquegna**

Istituto Superiore Universitario di Formazione Interdisciplinare, Università di Salento

---

## Introduzione

Il concetto di entropia viene introdotto per la prima volta fra il diciottesimo e il diciannovesimo secolo, in riferimento alla termodinamica classica: essa risulta essere una grandezza estensiva, ossia una quantità che (come anche massa, volume ed energia interna) caratterizza un sistema termodinamico nella sua globalità.

Si tratta inoltre di una funzione di stato, cioè di una grandezza che dipende soltanto dalle condizioni di equilibrio in cui si trova il sistema e non da come tali condizioni sono state raggiunte. La variazione di entropia calcolata fra due stati di equilibrio di un determinato sistema termodinamico, dunque, dipende solo dallo stato iniziale e quello finale e non dagli stati intermedi assunti dal sistema.

Tale definizione viene formulata ignorando la configurazione microscopica dei sistemi termodinamici. Boltzmann mette l'entropia in relazione con le proprietà microscopiche del sistema.

Anche nell'ambito della teoria dell'informazione viene definita, per indicare la quantità media di informazione fornita da una serie di affermazioni, una quantità che viene chiamata *entropia di Shannon* perché possiede caratteristiche simili a quelle dell'entropia termodinamica.

La trattazione seguente si concentrerà, in particolare, sulla relazione fra l'entropia termodinamica, l'entropia probabilistica e il concetto di

entropia nella teoria dell'informazione.

Si partirà dalla termodinamica classica, spiegando come la definizione di entropia corrispondente sia di fatto legata a quella probabilistica attraverso considerazioni sulla struttura microscopica di un sistema ed i concetti di macrostato e microstati. Quindi tali definizioni verranno confrontate, mettendo in evidenza le differenze e soprattutto l'analogia di fondo fra le due. Infine, si introdurrà l'entropia di Shannon, spiegando come essa si colloca nella teoria dell'informazione e raffrontandola con gli altri concetti di entropia.

## Definizione probabilistica di entropia

Il secondo principio della termodinamica può essere espresso utilizzando due enunciati: quello di Kelvin-Planck, che afferma l'impossibilità di realizzare una trasformazione il cui unico risultato sia la produzione di lavoro a spese del calore prelevato da un'unica sorgente, e quello di Clausius, che si sofferma invece sull'impossibilità di realizzare una trasformazione il cui unico risultato sia il trasferimento di calore da un corpo ad un altro avente temperatura più elevata. Il primo enunciato dichiara quindi che non esiste una macchina termica perfetta (che trasforma cioè integralmente calore in lavoro), mentre il secondo dichiara che non esiste un frigorifero

perfetto (in cui il calore fluisce senza necessità di lavoro esterno dalla sorgente a temperatura minore a quella a temperatura maggiore).

Si tratta di due enunciati di fatto equivalenti; si dimostra infatti che se si può costruire una macchina termica perfetta, si può costruire anche un frigorifero perfetto, e viceversa. La violazione dell'enunciato di Kelvin-Planck quindi implica la violazione di quello di Clausius e viceversa [1].

Applicando il secondo principio ad un sistema che esegue un ciclo reversibile di Carnot [1], si può definire l'entropia come quella funzione di un dato sistema di cui  $\delta Q/T$  rappresenta il differenziale esatto. Per definizione, quindi, il differenziale  $dS$  dell'entropia è

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \quad (1)$$

dove  $\delta Q$  è il calore scambiato dal sistema e  $T$  la temperatura, assoluta, a cui esso si trova.

Si parla di *differenziale esatto* perché la variazione di entropia dipende soltanto dagli estremi di integrazione e cioè dagli stati iniziali e finali. È importante sottolineare, però, come l'entropia sia definita solo in caso di equilibrio e quindi soltanto lungo delle trasformazioni reversibili: ciò significa che di fatto l'entropia può essere calcolata in ogni punto intermedio della trasformazione considerata.

L'entropia scambiata da un sistema lungo una trasformazione reversibile fra un suo stato  $A$  ed un suo stato  $B$  viene calcolata quindi come

$$S_B - S_A = \int_A^B \frac{dQ}{T}. \quad (2)$$

Con l'introduzione della funzione entropia, il secondo principio della termodinamica può essere formulato in altro modo dicendo che in qualsiasi trasformazione termodinamica fra due stati di equilibrio, l'entropia dell'insieme universo, costituito cioè dal sistema e l'ambiente circostante, non può mai diminuire [1].

Tale visione, però, pur fornendo una quantità utile per descrivere cicli di macchine termiche,

trascura la struttura microscopica dei sistemi termodinamici, considerandoli soltanto a livello globale: manca, quindi, il legame con la struttura profonda del sistema termodinamico che permette di capire perché l'entropia sia una funzione di stato definibile in caso di equilibrio.

Si arriva a definire l'entropia con la relazione di Boltzmann

$$S = k_B \ln w \quad (3)$$

in cui  $S$  è l'entropia del sistema quando si trova un determinato stato di equilibrio,  $k_B$  è la costante di Boltzmann (pari a  $1.381 \times 10^{-23}$  J/K) e  $w$  è la molteplicità dello stato considerato.

Per comprendere cosa si intende con molteplicità è necessario distinguere fra microstati e macrostati di un sistema termodinamico. I microstati sono quegli stati in cui le caratteristiche precise di ogni particella sono conosciute, nello specifico posizione e velocità, mentre i macrostati sono gli stati di cui si conoscono solo le proprietà macroscopiche, come energia totale, pressione, temperatura. Ogni macrostato può essere ottenuto da microstati differenti che producono però gli stessi valori delle quantità misurate del sistema. Il numero di microstati che può produrre lo stesso macrostato è la molteplicità di quel macrostato.

Presento ora un sistema modello a scopo illustrativo. Considero un sistema termodinamico costituito da un numero  $N$  di particelle confrontabile con il numero di Avogadro. Ipotizzo che in questo sistema ciascuna di tali particelle possa assumere due soli valori di energia, indicati come  $\uparrow$  e  $\downarrow$ ; in seguito, dirò che può avere *spin* positivo o *spin* negativo.

Chiamo *configurazione* un microstato del sistema, ossia uno stato tale che lo spin di ciascuna particella sia conosciuto: il numero totale delle configurazioni possibili è  $2^N$ . Esse sono equiprobabili, quindi la probabilità che il sistema si trovi in una specifica configurazione è  $1/2^N$ . Di un macrostato, invece, si conosce solo il numero totale di particelle che hanno spin positivo e quello di particelle che hanno spin negativo. Ciò è comunque sufficiente per definire l'energia del macrostato. Microstati diversi possono avere va-

lori di energia uguali, mentre diversi macrostati si distinguono l'uno dall'altro dalle loro proprietà estensive, in particolare l'energia. Microstati con valori di energia uguali, quindi, corrispondono ad un solo macrostato, e si ha in particolare che la probabilità che il sistema si trovi in un macrostato è proporzionale alla sua molteplicità.

Definisco il livello zero dell'energia come quello dello stato in cui metà delle particelle ha *spin* positivo (il cui valore di energia viene indicato come  $+m$ ) e l'altra metà ha *spin* negativo (energia  $-m$ ). Il numero delle particelle con energia  $+m$  è

$$N_{\uparrow} = \frac{1}{2}N + s \quad (4)$$

e il numero delle particelle con energia  $-m$  è

$$N_{\downarrow} = \frac{1}{2}N - s \quad (5)$$

(dove  $s$  è proprio la differenza fra il numero di particelle con *spin* positivo e  $N/2$ ).

L'energia del sistema è dunque unicamente funzione della quantità statistica  $N_{\uparrow} - N_{\downarrow} = 2s$ , che viene detta eccesso di *spin*.

Tale sistema è composto da  $N$  particelle e tutte le configurazioni possibili sono espresse dal binomio di Newton

$$(\uparrow + \downarrow)^N = \sum_{s=-1/2N}^{1/2N} \frac{N!}{\left(\frac{1}{2}N + s\right)! \left(\frac{1}{2}N - s\right)!} \uparrow^{\frac{1}{2}N+s} \downarrow^{\frac{1}{2}N-s} \quad (6)$$

Definisco la funzione molteplicità al variare del numero totale di particelle  $N$  e di  $s$ . Essa è

$$w(N, s) \equiv \frac{N!}{\left(\frac{1}{2}N + s\right)! \left(\frac{1}{2}N - s\right)!} = \frac{N!}{(N_{\uparrow})! (N_{\downarrow})!} \quad (7)$$

normalizzata, per quanto detto in precedenza, a

$$\sum_{s=-1/2N}^{1/2N} w(N, s) = 2^N. \quad (8)$$

Tale funzione indica il numero di microstati compatibili con un certo valore di energia.

L'approssimazione di Stirling viene utilizzata per valori di  $N$  molti grandi (e la sua accuratezza aumenta all'aumentare del valore di  $N$ ) e

suggerisce come si comporta il suo fattoriale:

$$N! \simeq \frac{1}{2} \ln 2\pi + \left(N + \frac{1}{2}\right) \ln N - N. \quad (9)$$

Utilizzando tale approssimazione nell'espressione della molteplicità (ciò può essere fatto perchè si è ipotizzato  $N$  confrontabile con il numero di Avogadro), essa diventa

$$w(N, s) \simeq w(N, 0) \exp(-2s^2/N) \quad (10)$$

con

$$w(N, 0) = \frac{N!}{\left(\frac{1}{2}N\right)! \left(\frac{1}{2}N\right)!} \simeq \left(\frac{2}{\pi N}\right)^{\frac{1}{2}} 2^N, \quad (11)$$

sempre normalizzata a  $2^N$ .

Consideriamo due sistemi  $A_1$  e  $A_2$  come quelli presentati che hanno diversi numeri di particelle, rispettivamente  $N_1$  e  $N_2$ , e diverse energie  $U_1$  e  $U_2$ . Una volta messi in contatto, i due sistemi ne formano uno unico, chiuso (ossia con energia, numero di particelle e volume costanti), con numero di particelle  $N$  ed energia  $U$  pari alla somma di quelli di  $A_1$  e  $A_2$ , raggiungendo l'equilibrio termodinamico. Si ipotizza che tutti gli stati accessibili da tale sistema, compatibili cioè con le sue caratteristiche fisiche, abbiano la stessa probabilità di essere occupati. Poiché per la dinamica interna del sistema lo stato in cui si trova il sistema cambia continuamente, dunque, considerato un intervallo di tempo sufficientemente grande si può ipotizzare che il sistema avrà attraversato tutti gli stati accessibili, permanendo in ognuno di essi per la stessa porzione di tempo. Il contatto fra i due sistemi permette lo scambio delle direzioni dello *spin* delle particelle di un sistema rispetto all'altro; ipotizzando che gli stati accessibili abbiano in entrambi i sistemi uguali valori di energia  $+m$  e  $-m$ , si ha che alla fine l'energia totale del sistema unione sarà pari a  $U = 2(s_1 + s_2)m$  e rimarrà costante anche se singolarmente  $s_1$  e  $s_2$  cambiano.

Considero la funzione di molteplicità del sistema unificato  $A$  come la somma di tutte le possibili configurazioni ottenute scambiando la direzione degli *spin* e mantenendo costante l'energia totale e il numero di particelle  $N$ . Posso

quindi scrivere

$$w(N, s) = \sum_{s=-1/2N_1}^{1/2N_1} w_1(N_1, s_1) w_2(N_2, s - s_1). \quad (12)$$

Utilizzando l'approssimazione di Stirling come indicato in precedenza, ottengo che la funzione di molteplicità può essere scritta come

$$w_1(N_1, 0) w_2(N_2, 0) \exp\left(-\frac{2s_1^2}{N_1} - \frac{2(s - s_1)^2}{N_2}\right). \quad (13)$$

Indico con  $s_1^m$  il valore di  $s$  per cui la funzione  $w_1 w_2$  raggiunge un massimo. Si può vedere come la funzione (13) sia molto piccata attorno al massimo [2]. Se  $N$  è molto grande, tutte le configurazioni per cui  $s_1$  è diverso da  $s_1^m$  saranno in numero trascurabile rispetto agli stati in cui  $s$  è uguale a  $s_1^m$ . Infatti già in un sistema costituito da 100 particelle si ha che di tutti i microstati possibili  $2^{100} = 1.3 \times 10^{30}$  circa  $10^{29}$  corrispondono al macrostato di equilibrio, e più il numero di particelle aumenta più l'approssimazione si fa accurata.

Con tale considerazione, la funzione può quindi essere ben approssimata a

$$w(N, s) \simeq w_1(N_1, s_1^m) w_2(N_2, s - s_1^m). \quad (14)$$

Per trovare il valore di  $s_1$  per cui la funzione raggiunge il suo massimo si trova il punto di massimo del logaritmo della funzione (ciò può essere fatto perchè la funzione logaritmo è monotona crescente). Si ottiene che il massimo si raggiunge per  $s_1 = s_1^m$  con

$$\frac{s_1^m}{N_1} = \frac{s - s_1^m}{N_2} = \frac{s_2^m}{N_2} = \frac{s}{N}, \quad (15)$$

ossia nel macrostato in cui il rapporto fra eccesso di spin e numero di particelle è uguale nei due sistemi.

Sostituendo nella funzione di molteplicità del sistema totale si ottiene che il massimo è dato da

$$\begin{aligned} (w_1, w_2)_{\max} &= w_1(N_1, s_1^m) w_2(N_2, s - s_1^m) \\ &= w_1(N_1, 0) w_2(N_2, 0) \exp\left(-\frac{2s^2}{N}\right). \end{aligned} \quad (16)$$

Le oscillazioni intorno allo stato di equilibrio

possono essere descritte come

$$\begin{aligned} (dw)_{\max} &= \left(\frac{\partial w_1}{\partial U_1}\right)_{N_1} w_2 dU_1 \\ &+ \left(\frac{\partial w_2}{\partial U_2}\right)_{N_2} w_1 dU_2. \end{aligned} \quad (17)$$

Considerando che, trattandosi del massimo di una funzione, la sua derivata è nulla, e imponendo che l'energia totale del sistema sia costante, si ottiene

$$\frac{1}{w_1} \left(\frac{\partial w_1}{\partial U_1}\right)_{N_1} = \frac{1}{w_2} \left(\frac{\partial w_2}{\partial U_2}\right)_{N_2} \quad (18)$$

e quindi

$$\left(\frac{\partial \ln w_1}{\partial U_1}\right)_{N_1} = \left(\frac{\partial \ln w_2}{\partial U_2}\right)_{N_2}. \quad (19)$$

Definendo l'entropia come  $\sigma \equiv \ln w(N, U)$  tale condizione diviene

$$\left(\frac{\partial \sigma_1}{\partial U_1}\right)_{N_1} = \left(\frac{\partial \sigma_2}{\partial U_2}\right)_{N_2}. \quad (20)$$

Essa è una relazione fra due sistemi posti in contatto termico che raggiungono l'equilibrio, e viene naturale dare la stessa relazione fra temperatura ed entropia data nella definizione termodinamica, ossia

$$\frac{1}{\tau} = \left(\frac{\partial \sigma}{\partial U}\right) \quad (21)$$

le cui dimensioni qui sono però quelle di un'energia. Quella che viene considerata in termodinamica, ossia la temperatura assoluta, è legata alla temperatura definita nell'equazione precedente dalla costante di Boltzmann  $k_B$  ( $k_B = 1.381 \times 10^{-23}$  J/K)

$$\tau = k_B T. \quad (22)$$

L'entropia termodinamica (che ha, come previsto, le dimensioni dell'energia) diviene quindi la funzione di stato  $S$  tale che

$$\frac{1}{T} = \left(\frac{\partial S}{\partial U}\right) \quad (23)$$

e cioè

$$S = k_B \sigma = k_B \ln w, \quad (24)$$

che è la definizione di entropia proposta da Boltzmann.

## Confronto fra entropia di Boltzmann ed entropia di Gibbs

La definizione di entropia proposta da Gibbs parte direttamente da considerazioni statistiche sui microstati e le loro probabilità. L'entropia  $S$  è:

$$S = -k_B \sum_i P_i \ln P_i \quad (25)$$

dove  $P_i$  è la probabilità di ogni macrostato  $i$  di essere occupato.

Le due definizioni di entropia, quella data da Boltzmann e quella data da Gibbs, possono essere confrontate utilizzando un modello proposto in origine da Ehrenfest [3].

Il modello di Ehrenfest prende in considerazione due urne: nella prima ci sono  $N_A$  palline rosse ed  $N_B$  palline blu, nella seconda, al contrario,  $N_A$  palline blu ed  $N_B$  palline rosse, per un totale di  $N$  palline in ciascuna urna. Possono liberamente avvenire degli scambi di palline fra un'urna e l'altra, a condizione che il loro numero in ciascuna urna rimanga sempre pari ad  $N$ .

In tale sistema ogni macrostato può essere contraddistinto da  $N_A$ , il numero di palline rosse nella prima urna e di palline blu nella seconda. Come visto in precedenza, ad ogni macrostato corrispondono più microstati, in particolare in numero uguale a

$$w = \frac{N!}{(N - N_A)!N_A!} = \frac{N!}{N_B!N_A!}. \quad (26)$$

Per Boltzmann l'entropia può essere scritta come

$$S = \ln w = \ln N! - \ln N_A! - \ln N_B! \quad (27)$$

e, utilizzando l'approssimazione di Stirling  $\ln x! \simeq x \ln x - x$ , si ha

$$\begin{aligned} S &= \ln w \simeq N \ln N - N - N_A \ln N_A \\ &+ N_A - N_B \ln N_B + N_B \\ &= N \ln N - N_A \ln N_A - N_B \ln N_B \\ &= (N_A + N_B) \ln N - N_A \ln N_A \\ &- N_B \ln N_B. \end{aligned} \quad (28)$$

Definisco le densità di particelle rispettivamente

te  $\rho_A$  e  $\rho_B$ , come  $\rho_i = N_i/N$  ( $i \in \{A, B\}$ ) e la densità di entropia  $s[\rho] = S/N$ . Queste grandezze hanno il vantaggio di avere distribuzioni che si concentrano sul loro valore medio, in accordo col fatto che la varianza tende a zero per  $N$  tendente all'infinito.

Per la legge dei grandi numeri, per  $N \rightarrow \infty$ ,  $\rho_A$  e  $\rho_B$ , tendono alle rispettive probabilità e possono essere più semplicemente chiamate  $\rho$  e  $1 - \rho$ . Riprendendo la (28), si ha che

$$\begin{aligned} s[\rho] &= \ln \frac{N}{N} - N_A \ln \frac{N_A}{N} - N_B \ln \frac{N_B}{N} \\ &= -\rho_A \ln \rho_A - \rho_B \ln \rho_B \\ &= -\rho \ln \rho - (1 - \rho) \ln (1 - \rho). \end{aligned} \quad (29)$$

Calcolo ora il valore di  $\rho$  per cui l'entropia per particella raggiunge il suo massimo.

$$\begin{aligned} 0 = \frac{ds}{d\rho} &= \frac{d}{d\rho} [-\rho \ln \rho - (1 - \rho) \ln (1 - \rho)] \\ &= -\ln \rho - \rho \frac{1}{\rho} + \frac{1}{1 - \rho} + \ln(1 - \rho) \\ &- \frac{\rho}{1 - \rho} = -\ln \left( \frac{\rho}{1 - \rho} \right) \end{aligned} \quad (30)$$

quindi

$$-\ln \frac{\rho}{1 - \rho} = 0 \quad ; \quad \frac{\rho}{1 - \rho} = 1 \quad ; \quad 2\rho = 1.$$

L'entropia del sistema raggiunge quindi un estremo quando ha  $\rho = 1/2$ .

Per verificare che si tratti di un massimo, calcolo la derivata seconda. Nel punto di estremo, per  $\rho = 1/2$ , la derivata seconda assume il valore  $-4 < 0$  quindi si tratta di un punto di massimo.

Ciò significa che l'entropia raggiunge il suo valore massimo quando in entrambe le urne vi è lo stesso numero di palline blu e di palline rosse: tale configurazione è quella di massimo disordine. Al contrario, le configurazioni di massimo ordine sarebbero state quelle in cui in un'urna vi sono tutte le palline blu e nell'altra tutte quelle rosse.

Dato che l'equilibrio si raggiunge per  $\rho = 1/2$  è conveniente usare  $N_A = N/2 + s$  e  $N_B = N/2 - s$  e riscrivere l'entropia, secondo Boltzmann,  $S_B$  come:

$$S_B = \ln w_s = \ln \frac{N!}{(1/2N + s)! (1/2N - s)!}. \quad (31)$$

Utilizzando l'approssimazione di Stirling l'entropia diventa

$$S_B = - (1/2N + s) \ln (1/2N + s) - (1/2N - s) \ln (1/2N - s) + \text{costante.} \quad (32)$$

dove il pedice  $B$  è stato aggiunto per indicare l'entropia definita secondo Boltzmann.

Descriverò ora il sistema da un altro punto di vista che definirò come *dinamico*, per arrivare ad una definizione dell'entropia dal punto di vista probabilistico.

Supponiamo di estrarre una pallina a caso in maniera uniforme nel tempo, e di metterla in una delle due urne. Attribuiamo alla pallina una probabilità  $q$  di rimanere nell'urna da cui è stata estratta ed una probabilità  $1 - q$  di finire nell'altra urna. Quando una pallina passa da  $B$  ad  $A$  si ha che  $\Delta N_A = +1$  con probabilità  $(1 - q) N_B/N$ . Al contrario, quando una pallina passa da  $A$  a  $B$ , si ha  $\Delta N_A = -1$  con probabilità  $(1 - q) N_A/N$ . Nell'ipotesi che le estrazioni avvengano con una tempistica costante possiamo ipotizzare che il tempo necessario per far variare di un certo valore il numero di particelle sia direttamente proporzionale al numero delle particelle coinvolte  $\Delta t \simeq N\delta t$ . Considerando grandi valori di  $N$  e piccole variazioni abbiamo anche che  $\Delta N_A \sim N\delta\rho_A = N\delta N_A/N$ .

Posso quindi scrivere un'equazione differenziale

$$\frac{\delta\rho_A}{\delta t} = \rho_B (1 - q) \rho_A (1 - q) (1 - q) \quad (33)$$

Facendo per le densità  $\rho_A$  e  $\rho_B$  le stesse considerazioni fatte per la (28), cioè  $\rho_A = \rho$  e  $\rho_B = 1 - \rho$ , la (33) diventa

$$\frac{\delta\rho}{\delta t} = (1 - q) (1 - 2\rho). \quad (34)$$

La derivata si annulla per  $q = 0, 1$ . Ma questi sono valori da escludere perchè implicano una probabilità nulla di estrarre le palline. Esclusi questi valori di  $q$ , la derivata si annulla quando  $\rho = 1/2$ , in completo accordo con quanto ottenuto precedentemente.

Indico l'entropia definita secondo Gibbs come

$S_G$ . Considero l'equazione (25), per cui

$$S_G = -k_B \sum_i P_i \ln P_i \quad (35)$$

dove  $P_i$  è la probabilità che il macrostato  $i$  sia occupato.

Tale espressione, tuttavia, deriva dalla considerazione che ogni macrostato che può essere occupato dal sistema è costituito da un certo numero di microstati: ciò fa sì che ci sia dell'entropia ulteriore, associata proprio a tali microstati. Ipotizzando di avere un sistema caratterizzato da un totale di  $N$  microstati, tutti equiprobabili e tali che  $n_i$  microstati siano associati all' $i$ -esimo macrostato (e ovviamente  $\sum_i n_i = N$ ), posso scrivere

$$S_{tot} = S + S_{micro} \quad (36)$$

dove  $S_{tot}$ , l'entropia totale, è la somma di  $S$ , l'entropia associata alla capacità del sistema di trovarsi in diversi macrostati, e  $S_{micro}$ , l'entropia associata alla capacità di trovarsi in diversi microstati ma sempre nello stesso macrostato.

Nel modello di Ehrenfest, in particolare, gli  $n_i$  sono il numero di palline di colore rosso presenti nella prima urna e di palline blu presenti nella seconda urna dopo un certo numero di estrazioni, cioè  $n_i = N/2 + s$ .

L'entropia totale  $S_{tot}$  è

$$S_{tot} = k_B \ln N, \quad (37)$$

perchè  $N$  è proprio il numero totale di microstati possibili, considerando anche quelli appartenenti allo stesso macrostato, mentre  $S_{micro}$  è

$$S_{micro} = \sum_i P_i S_i \quad (38)$$

dove  $P_i = n_i/N$  è la probabilità che il sistema si trovi nell' $i$ -esimo macrostato e  $S_i = k_B \ln n_i$  è l'entropia dei microstati ad esso associati.

Allora si ottiene

$$\begin{aligned} S_G &= S_{tot} - S_{micro} \\ &= k_B \left( \ln N - \sum_i P_i \ln n_i \right) \\ &= k_B \sum_i P_i (\ln N - \ln n_i) \end{aligned} \quad (39)$$

dove l'ultima uguaglianza viene raggiunta tenendo in considerazione il fatto che, poiché

$$\sum_i n_i = N ; \quad \sum_i P_i = 1.$$

Si ritrova la (25) considerando che

$$\begin{aligned} S_G &= k_B \sum_i P_i \left( \ln \frac{N}{n_i} \right) \\ &= -k_B \sum_i P_i \left( \ln \frac{n_i}{N} \right) \\ &= -k_B \sum_i P_i \ln P_i. \end{aligned} \quad (40)$$

È possibile notare, inoltre, come

$$S_G = k_B \sum_i P_i \ln n_i - k_B \sum_i P_i \ln N. \quad (41)$$

L'espressione di  $S_G$  riportata in questa forma è la media dell'entropia di Boltzmann ( $k_B \sum_i P_i \ln n_i$ ) sommata al termine  $-k_B \sum_i P_i \ln N$ .

Le due definizioni di entropia analizzate finora vengono quindi confrontate all'equilibrio.

Per quanto riguarda la definizione di Boltzmann, si è dimostrato che l'equilibrio viene raggiunto per  $\rho = 1/2$ , ossia nel macrostato caratterizzato dalla presenza dello stesso numero di palline rosse e di palline blu in entrambe le urne. Quello di equilibrio è quindi uno stato vero e proprio. Esso, però, non viene mai raggiunto una volta per tutte; si ha invece che il sistema fluttua continuamente attorno allo stato di equilibrio.

Secondo la definizione di entropia data da Gibbs, invece, non esiste uno stato di equilibrio vero e proprio, ma solo la distribuzione di probabilità per cui l'entropia risulta massima. In questo caso lo stato di equilibrio (uso questo termine anche se non si può parlare propriamente di stato), una volta raggiunto, viene mantenuto. Nonostante il valore di entropia fluttui, infatti, tali variazioni avvengono sempre all'equilibrio.

Nonostante tali differenze, i due diversi concetti di entropia di fatto coincidono. All'equilibrio, infatti, si ha che per Boltzmann

$$\begin{aligned} S_{B,eq} &= k_B \ln w_0 = k_B \ln \frac{N!}{\left(\frac{N}{2}\right)! \left(\frac{N}{2}\right)!} \\ &= k_B N \ln 2, \end{aligned} \quad (42)$$

e per Gibbs

$$\begin{aligned} S_{G,eq} &= -k_B \sum_i P_0 \ln P_0 = -k_B N \ln \frac{1}{2} \\ &= k_B N \ln 2. \end{aligned} \quad (43)$$

L'entropia secondo le due diverse definizioni all'equilibrio assume quindi lo stesso valore.

Le definizioni di Boltzmann e di Gibbs mostrano due comportamenti dell'entropia diversi, ma non contrastanti.

È ormai chiaro che un sistema termodinamico isolato tende a raggiungere l'equilibrio, aumentando in tale processo la sua entropia. Le due definizioni esaminate cercano di completare tale concetto, riformulando il secondo principio in modo che esso comprenda anche le fluttuazioni attorno all'equilibrio che vengono osservate.

Operando con la definizione di Boltzmann si mantiene l'idea di un unico macrostato di equilibrio, ma si ammette che vi siano delle continue fluttuazioni che portino ad una temporanea diminuzione dell'entropia: lo stato di equilibrio, quindi, pur essendo uno e ben definito, non viene mantenuto.

Al contrario, l'approccio gibbsiano considera lo stato di equilibrio come un insieme di stati fra cui il sistema si sposta secondo la legge probabilistica; in tale visione le fluttuazioni sono parte dello stato di equilibrio e non ci sono quindi violazioni del secondo principio che portano alla diminuzione dell'entropia: essa, allo scorrere del tempo, deve aumentare monotonamente. [4]

## L'entropia nella teoria dell'informazione

Il concetto di informazione, se analizzato in modo adeguato, può essere collegato a quello di entropia termodinamica. Tale studio confluisce in quella che prende il nome di *teoria dell'informazione*.

Dato un evento, si ha che maggiore è la probabilità che esso si avveri, in assenza di informazioni precedenti, minore è il contenuto informativo estratto dall'avvenire dell'evento stesso. Ad esempio se considero come eventi i lanci di due monete, la prima truccata con esito certo *testa*, la

seconda normale (cioè per la quale la probabilità di testa eguaglia quella di croce), e ne paragono il contenuto informativo, dall'esito del primo lancio non estraggo praticamente informazione (poichè già ero certa del risultato), al contrario del secondo: la frase *nel primo lancio ho collezionato testa* di fatto non convoglia informazione. Ciò può essere parafrasato dicendo che più un'affermazione è ovvia, meno informazione, di fatto, fornisce.

Nella definizione di informazione proposta da Claude Shannon, il contenuto informativo  $Q$  di un evento è dato da

$$Q = -k \log P \quad (44)$$

dove  $P$  è la probabilità che l'evento si avveri e  $k$  è una costante positiva. Il segno negativo concorda con il fatto che quando la probabilità aumenta, il contenuto informativo diminuisce.

Utilizzando  $\log_2$  per il logaritmo e ponendo  $k = 1$ , si ha che  $Q$  è misurata in bit. Se invece si utilizza il logaritmo naturale e la costante di Boltzmann  $k_B$  come  $k$ , allora tale definizione è compatibile con quanto trovato in termodinamica.

Shannon dimostra che, avendo una serie di eventi,  $i = 1, \dots, N$ , ciascuno con probabilità  $P_i$  (e informazione  $Q_i = -k \log P_i$ ), e ponendo alcuni criteri minimali, allora il loro contenuto informativo medio è dato da

$$\begin{aligned} S[P] &= \langle Q \rangle = \sum_i Q_i P_i \\ &= -k \sum_i P_i \log P_i \quad (45) \end{aligned}$$

Questa quantità prende il nome di entropia di Shannon, e quantifica l'informazione media ottenuta dopo una misura o, allo stesso modo, l'incertezza sulla quantità prima che venga effettuata la misura. In altre parole, essa rappresenta la quantità di struttura contenuta nella distribuzione di probabilità  $P$ .

I criteri su  $S$  di cui si è parlato, in particolare, sono i seguenti:

1.  $S$  dev'essere una funzione continua di  $P$ .
2. Se tutti i  $P_i$  sono uguali,  $S$  dev'essere una funzione monotona crescente.

3. Se un evento  $j$  è a sua volta suddiviso in più eventi secondari, l'entropia  $S[P]$  totale è pari alla somma dell'entropia degli eventi iniziali  $i = 1, \dots, N$ , e dell'entropia degli eventi secondari, dove quest'ultima è pesata con la sua probabilità  $P'_j$ .

La condizione (2) indica come, avendo un numero  $N$  di eventi con uguale probabilità, al crescere del numero  $N$  l'informazione espressa dall'entropia  $S$  diminuisca. Per esempio, se si ha un solo evento, esso sarà inevitabilmente vero, con una distribuzione di probabilità  $P$  altamente strutturata. Per  $N$  grande, invece, ogni evento ha uguale probabilità di essere vero e questo fornisce quindi meno informazioni sull'esito inerente la sua misura.

La condizione (3), invece, si riferisce al fatto che, se un evento è suddiviso in più eventi secondari, l'entropia totale è pari alla somma dell'entropia relativa agli eventi principali e dell'entropia relativa a quelli secondari.

Si può notare come la formula (45) sia uguale a quella dell'entropia di Gibbs, Eq. (40), nonostante  $P_i$  in questo caso, come già detto, rappresenti la probabilità che il sistema si trovi nel macrostato  $i$ . Ciò ci porta ad ampliare ancor di più il concetto di entropia. Essa dà una misura del grado di incertezza di un sistema, conoscendo alcune delle sue proprietà e ignorando invece in quale microstato si trovi.

Si può quindi intuire come la teoria dell'informazione possa essere applicata anche ad un sistema termodinamico. Ma non solo: l'informazione è essa stessa, infatti, una grandezza fisica.

Si pensi, ad esempio, ad un dispositivo fisico che contiene  $N$  bit di informazioni ed è a contatto con una sorgente di calore a temperatura  $T$ . Si vuole eliminare irreversibilmente l'informazione contenuta nel dispositivo, e per fare ciò tutti i bit vengono resettati, trasformati tutti in zero. Tale processo fa sì che il numero di stati del sistema diminuisca di  $\ln 2^N$  e quindi che l'entropia totale del sistema diminuisca di  $Nk_B \ln 2$ . Ovviamente si ottiene lo stesso risultato resettando tutti i bit al valore 1.

Affinchè non venga violato il secondo principio, però, ad una diminuzione di entropia nel sistema deve corrispondere un suo equiva-

lente aumento nell'ambiente: in questo modo si garantisce che l'entropia nel sistema universo non diminuisca. Tale aumento di entropia nell'ambiente avviene tramite una dispersione di calore in quantità pari a  $TNk_B \ln 2$  [5].

**Gaia Sacquegna:** è studentessa del collegio I.S.U.F.I. dell'Università del Salento e frequenta il secondo anno della corso di Laurea triennale in Fisica.

## Conclusioni

Si è discusso del concetto di entropia, partendo dalla sua definizione termodinamica, che considera il sistema in esame soltanto tramite sue proprietà globali, e arrivando ad enunciare l'espressione fornita da Boltzmann, che invece comporta delle considerazioni sulle caratteristiche microscopiche del sistema considerato. Quindi la formulazione di Boltzmann è stata confrontata, per un sistema in particolare, il modello di Ehrenfest, con un'altra definizione probabilistica di entropia, quella fornita da Gibbs. È stato dimostrato che le due definizioni concordano nel descriverne l'equilibrio termodinamico, seppur mostrando due comportamenti diversi con i rispettivi vantaggi e limiti. Infine, un'analisi dell'entropia di Shannon ha mostrato come tale quantità, introdotta nella teoria dell'informazione per quantificare l'informazione ottenuta dopo aver eseguito una misura sul sistema, abbia un comportamento equivalente a quello dell'entropia di Gibbs. Tale corrispondenza fra quantità diverse ma con caratteristiche molto simili permette di realizzare una profonda connessione fra i due campi e di interpretare lo studio dei sistemi termodinamici dal punto di vista della teoria dell'informazione.



- [1] C. Mencuccini, V. Silvestrini: *Fisica I. Meccanica e termodinamica*, Liguori, Milano (1998).
- [2] G. Co': *Statistica, entropia e temperatura*, Ithaca, XI (2018) 125.
- [3] P. Ehrenfest, T. Ehrenfest: *Phys. Z.*, 8, 1907 (311)
- [4] M. J. Klein: *Entropy and the Ehrenfest urn model*, *Physica*, XXII (1956) 569.
- [5] K. Blundell, S. Blundell: *Concepts in Thermal Physics*, Oxford University Press, Oxford (2006).



The logo for Ithaca Educational features the word "Ithaca" in a large, bold, serif font, with the word "Educational" in a smaller, bold, sans-serif font directly below it. The text is surrounded by several overlapping, thin, grey circles of varying sizes, some of which are partially obscured by the letters.

# Ithaca

## Educational

Numero II Anno 2020

---

