
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*

Le 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 brecce 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* ≈ 1.88 cm, o al di sopra del centinaio di *fiumi* ≈ 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, inattacabile 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 predicono 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 ≥ 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 informazione 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 (≈ 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 β .
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 1.66×10^{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** Ω 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 teoria 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.