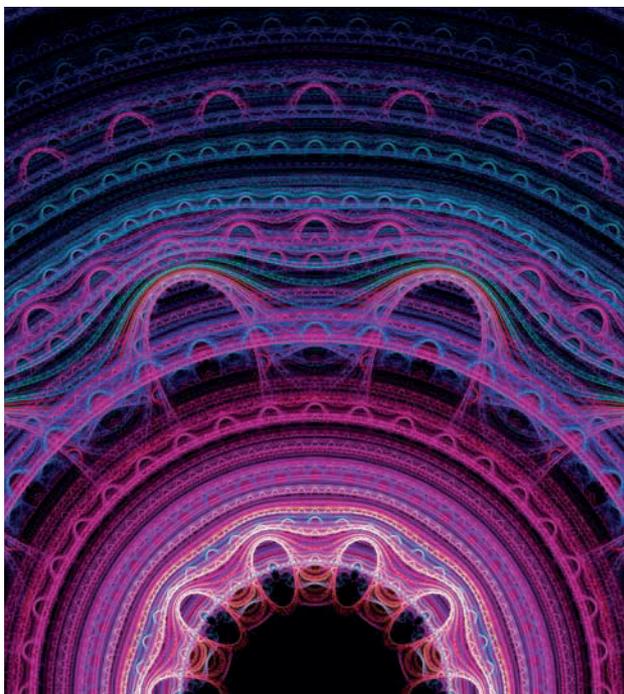


Helmut Satz

PIÙ DELLA SOMMA DELLE PARTI

La complessità in fisica e oltre

scienza **FA**



FrancoAngeli

Informazioni per il lettore

Questo file PDF è una versione gratuita di sole 20 pagine ed è leggibile con **Adobe Acrobat Reader**



La versione completa dell'e-book (a pagamento) è leggibile **con Adobe Digital Editions**.

Per tutte le informazioni sulle condizioni dei nostri e-book (con quali dispositivi leggerli e quali funzioni sono consentite) consulta [cliccando qui](#) le nostre F.A.Q.

scienza **FA**

Una collana di saggi per il lettore non specialista:
per comprendere la realtà che ci circonda

Collana diretta da:
Renato Betti, Politecnico di Milano
Roberto Lucchetti, Politecnico di Milano
Giuseppe Rosolini, Università di Genova

Helmut Satz

PIÙ DELLA SOMMA DELLE PARTI

La complessità in fisica e oltre

scienza **FA**

Traduzione di Daniele A. Gewurz

FrancoAngeli

Progetto grafico di copertina: Géraldine D'Alessandris

Titolo originale: *More than the Sum of the Parts.*
Complexity in Physics and Beyond
Oxford University Press, Oxford, 2022

Copyright © Helmut Satz 2022. All rights reserved.

This translation is published by arrangement with Oxford University Press.
FrancoAngeli is solely responsible for this translation from the original work
and Oxford University Press shall have no liability for any errors, omissions or inaccuracies in
such translation or for any losses caused by reliance thereon.

Traduzione dall'inglese: Daniele A. Gewurz

1a edizione. Copyright © 2023 by FrancoAngeli srl, Milano, Italy

L'opera, comprese tutte le sue parti, è tutelata dalla legge sul diritto d'autore. L'Utente nel momento in cui effettua il download dell'opera accetta tutte le condizioni della licenza d'uso dell'opera previste e comunicate sul sito www.francoangeli.it.

Le leggi della fisica sono semplici, ma la natura è complessa.

Bak, 1996

Indice

Prefazione, di <i>Helmut Satz</i>	pag.	9
1. Introduzione	»	13
2. Il flusso del tempo	»	22
3. Connessioni globali	»	34
4. La natura delle forze	»	41
5. La formazione della struttura	»	55
6. L'energia dello spazio	»	63
7. Comportamento critico	»	77
8. Criticità autorganizzata	»	91
9. Dimensioni frattali	»	97
10. Biforcazione e caos	»	104
11. Moto browniano	»	117
12. Turbolenza e convezione	»	126
13. Intermittenza	»	138
14. Parole e numeri	»	144

15. Complessità quantistica	pag.	150
16. Conclusione	»	160
Bibliografia	»	163
Indice delle persone	»	166
Indice degli argomenti	»	168

Prefazione

Gran parte delle nostre scienze naturali si basa sul presupposto che il tutto sia la somma delle proprie parti. In effetti questo presupposto ha funzionato sorprendentemente bene e ci ha fornito un corpus di conoscenze scientifiche su cui si basa gran parte del nostro mondo moderno. Negli ultimi anni, però, è diventato sempre più evidente che esiste un numero enorme di fenomeni per cui questo presupposto non è valido. Per molto tempo è andato bene dire «ipotizziamo che lo stato sia in equilibrio» oppure «ipotizziamo che il moto sia privo di attriti», e simili. Oggi vediamo che tutti i fenomeni ignorati formano un nuovo campo di studio, la complessità, che è ampio quanto e forse più di ciò che avevamo preso in considerazione finora nelle scienze naturali tradizionali.

Inoltre, i fenomeni complessi rivelano un grado di universalità sorprendente: la complessità si osserva in un'enorme varietà di fenomeni della natura. Nella fisica tradizionale molti concetti sono applicabili solo ai problemi che emergono in un certo ambito, e non a molto altro. Invece il comportamento che si osserva per l'insorgere della criticità, che porta a correlazioni tra costituenti anche molto distanti tra loro, si osserva non solo nello studio del magnetismo nella fisica della materia condensata, ma anche nella cosmologia dell'universo primordiale e nella formazione degli stormi di uccelli. Modelli imparentati con questi si trovano anche nei processi economici, nelle fluttuazioni del mercato azionario, nella crescita della popolazione, nella diffusione delle ma-

lattie. E ormai il comportamento critico è diventato parte della fisica tradizionale.

Non è una sorpresa che ciò abbia portato alla comparsa della teoria della complessità come nuovo campo di ricerca, con nuovi concetti fondamentali, come i fenomeni emergenti, l'autorganizzazione, la biforcazione e altro ancora. Questo libro non vuol essere un'introduzione alla teoria della complessità: a questo fine segnaliamo numerose opere eccellenti elencate nella bibliografia. Il nostro scopo qui è di studiare una varietà di diversi fenomeni in natura che non si possono descrivere in modo soddisfacente con la scienza tradizionale e di mostrare che in genere sorgono come risultato di interazioni collettive di molti enti. In alcuni casi li si può codificare in certi aspetti di una teoria della complessità emergente, in altri no. Un altro possibile sottotitolo del libro sarebbe quindi "fisica non convenzionale". Il mio scopo è più descrivere, far notare, che non cercare una teoria generale. Spero che il quadro multiforme presentato da questi diversi fenomeni serva da sfida ai futuri scienziati, e a loro lascio la formulazione di una possibile scienza della complessità.

La presentazione sarà ristretta a fenomeni che si verificano in natura, ai problemi posti alle scienze naturali. Non prenderemo in esame questioni di sociologia, politica o economia; sono chiaramente ben al di fuori del campo di competenza di un fisico teorico, anche se e quando portano a situazioni di fluttuazione non dissimili da quelle della fisica. Tuttavia, poiché la complessità è un argomento così nuovo, possono fornire contributi essenziali alla sua comprensione e al suo sviluppo futuro matematici, fisici e altri studiosi. Alcune tappe fondamentali – come il comportamento critico (Ken Wilson), l'avvicinamento al caos (Mitchell Feigenbaum) e l'autorganizzazione (Per Bak) – vengono dai fisici. Da approcci diversi si ottengono punti di vista diversi, e il mio è certamente quello di un fisico. In ogni caso, il campo è tutt'altro che completo, e per questo mi permetto di redigere questa presentazione, sebbene l'argomento del libro si sovrapponga solo in parte al mio campo di lavoro, la termodinamica delle interazioni forti. Negli ultimi anni, però, si è scoperto che la complessità svolge un ruolo sempre più importante anche qui e, inoltre, sono da molti anni in contatto con questo campo di ricerca e con i suoi fondatori.

Lo sviluppo della fisica è associato in modo del tutto naturale con i nomi di coloro che ne hanno determinato i progressi cruciali: Galileo, Newton, Maxwell, Boltzmann, Planck, Einstein e altri. I nuovi paradigmi legati alla fisica dei sistemi complessi non hanno ancora fatto diventare famosi di fronte al grande pubblico i loro pionieri. Volendo mostrare come lo studio dei sistemi complessi sta cambiando il nostro modo di pensare, è naturale indicare chi ha dato inizio a tutto. Il mio elenco personale, orientato verso la fisica, inizia con i tre nomi già citati, Kenneth Wilson, Mitchell Feigenbaum e Per Bak, ma continua con molti altri, ovviamente. Questi tre hanno indicato la strada della fisica che ora percorriamo e, sebbene non siano più con noi, li ho conosciuti tutti personalmente. Quindi, in un certo senso, è il mio modo per commemorarli.

Questo libro si rivolge a un pubblico di non addetti ai lavori, interessato alle nuove prospettive che si aprono ora nello studio dei sistemi costituiti da molti costituenti simili o identici. Non è un trattato, ma piuttosto un tentativo di trasmettere la scoperta che svariati sistemi di questo tipo giungono a un nuovo comportamento dovuto alle interazioni collettive delle parti, che il tutto è qualcosa di più della somma delle parti.

Indicazioni su cosa leggere per approfondire i dettagli, gli sviluppi generali e altro compaiono nella bibliografia alla fine del volume; ho incluso tra l'altro presentazioni dello stato della teoria della complessità, che è in rapida evoluzione. Oltre a questo elenco di fonti generali e specifiche, alla fine di vari capitoli cito alcuni libri o articoli di particolare attinenza con il tema specifico di quel capitolo. Un argomento che ha uno stretto collegamento con il presente lavoro è la struttura dei gruppi di animali, che è davvero molto imparentato con quello dei sistemi a molti corpi in fisica. Non l'ho incluso qui, poiché è trattato in dettaglio nel mio recente libro *The Rules of the Flock*, pubblicato nel 2020 dalla Oxford University Press.

Ho avuto il piacere di discutere diversi aspetti del nostro argomento con vari colleghi: sono gratissimo per le osservazioni stimolanti ad Andrzej Bialas (Cracovia), Philippe Blanchard (Bielefeld), Paolo Castorina (Catania) e Frithjof Karsch (Bielefeld). E ho mol-

to apprezzato la corrispondenza con Shaun Bullett (Londra) e Bob Doyle (Harvard). Senza l'interferenza del coronavirus forse avrei avuto il piacere di parlarne con loro di persona. Spero che il futuro ci riporti queste possibilità.

Dedico questo libro alla memoria di mia moglie Karin.

Helmut Satz

Bielefeld, novembre 2021

1

Introduzione

*Du siehst den Wald vor lauter Bäumen nicht.
(Non vedi la foresta per via degli alberi.)*

Proverbio tedesco

Divide et impera

Dai disegni rupestri ai telescopi spaziali, l'umanità ha sempre, in un modo o nell'altro, cercato di capire il mondo in cui vive. Vogliamo capire di cosa è fatto ciò che ci circonda, quali diverse forme può assumere e quali sono le forze che vi agiscono. Da più di duemila anni le scienze fisiche, con un grande aiuto da parte della matematica, hanno sviluppato un approccio efficacissimo per affrontare e rispondere a queste domande, che si può condensare nell'antico adagio latino «divide et impera». Invece di guardare al complesso quadro generale, individuiamo una piccola parte del tutto e cerchiamo di capirne il funzionamento. Se ci riusciamo, mettiamo insieme molte di queste piccole parti per arrivare a comprendere la situazione più ampia. Questa filosofia iniziò nell'antica Grecia, quando fu introdotta l'idea degli atomi come costituenti ultimi della materia, e le mille sfaccettature del mondo furono attribuite ai diversi modi in cui questi costituenti erano aggregati. L'approccio che consiste nella riduzione alle parti ultime ha portato, nei secoli passati, a una struttura atomica ben definita, inizialmente con atomi costituiti da nuclei ed elettroni; poi si è osservato che i nuclei sono costituiti da nucleoni (protoni e neutroni), e questi a loro volta da quark. L'interazione tra i diversi costituenti è mediata da forze elettromagnetiche nonché dalle forze nucleari forte e debole, e negli ultimi decenni è diventato possibile combinare tutti i componenti e le forze

corrispondenti in un'unica descrizione unificata, il cosiddetto *modello standard* della fisica delle particelle elementari, la cosa più vicina a una "formula globale" che abbiamo mai avuto. La sola forza che finora ha resistito a un'unificazione finale con quelle del modello standard è la gravità. Nonostante i numerosi tentativi di alcuni dei fisici più eminenti, ancora non abbiamo una "teoria del tutto". Molto di recente, anzi, si è ipotizzato che il motivo di ciò possa essere che la gravità ha una natura fundamentalmente diversa dalle altre forze; torneremo in seguito su questa nuovissima visione delle cose.

I filosofi dell'antica Grecia non si sono limitati a dare avvio al riduzionismo, ma ci hanno anche avvertiti che questo modo di pensare ha dei limiti. Lo sintetizza al meglio forse Aristotele, quando osserva che il tutto è più della semplice somma delle sue parti. Nel processo di riduzione ai costituenti ultimi alcune delle caratteristiche del tutto andranno necessariamente perdute, e non è chiaro se il modo specifico in cui successivamente ricombiniamo le cose condurrà di nuovo a ciò da cui siamo partiti. La riduzione e la ricombinazione sono lo yin e lo yang del mondo, complementari ma opposti, e la comprensione dell'uno non implica la comprensione dell'altro.

Il successo del riduzionismo ha messo in ombra per molti anni l'altra faccia della medaglia: se abbiamo i mattoni, come li possiamo mettere insieme e che cosa ci possiamo costruire? Nonostante ciò che sappiamo della struttura dell'atomo rimane ancora priva di spiegazione la maggior parte del comportamento della materia macroscopica, così come l'anatomia di un uccello ci dice poco sul comportamento degli stormi. In molte forme di materia i costituenti distanti tra loro sono completamente privi di correlazioni: i sistemi idealizzati di questo tipo si possono veramente smontare e ricombinare, spiegando così gran parte del comportamento osservato. Per loro e, come vedremo, solo per loro, il tutto è semplicemente la somma delle parti.

L'insorgere della complessità

Nei punti di transizione da uno stato della materia all'altro – per evaporazione, fusione, congelamento e così via – questo riduzionismo viene meno; il sistema si rifiuta di lasciarsi dividere in sottosi-

stemi indipendenti, i costituenti distanti sono ora collegati, tutto diventa correlato. I fisici, irritati da questa complicazione, l'hanno chiamata *comportamento critico*. Oggi ci rendiamo conto che ci sono sempre più fenomeni che hanno senso solo quando i sistemi di molti costituenti adottano questi comportamenti infidi. Un singolo atomo non può congelare o evaporare. Sono fenomeni di questo tipo a segnalare l'inizio della complessità; il tutto ora è decisamente più della somma delle sue parti.

È diventato sempre più chiaro che capire la natura delle particelle elementari e delle forze che vi agiscono, la formula globale complessiva del riduzionismo, la «teoria del tutto», non è sufficiente per una piena comprensione del comportamento dei sistemi formati da molte di queste particelle. Si scopre che anche l'approccio opposto, la combinazione di componenti per formare sistemi complessi, ha le sue leggi distinte; inoltre, queste leggi spesso dipendono molto poco dalla natura dei componenti e dalle loro interazioni, e quindi sono in genere in una certa misura universali. La magnetizzazione del ferro, la condensazione di un gas, la formazione di una galassia, ma anche quella di uno stormo di uccelli, portano tutte a schemi strutturali molto simili. In questo senso, la fisica veramente nuova degli ultimi 50 anni è la scienza universale del comportamento collettivo, che si occupa per la prima volta di sistemi che non sono più semplicemente la somma dei propri sottosistemi più piccoli. La formulazione di una teoria del comportamento critico attraverso la rinormalizzazione, il comportamento invariante per scala di sistemi di tutte le dimensioni, ha fatto vincere il premio Nobel per la Fisica nel 1982 al teorico statunitense Kenneth Wilson. Alcuni anni prima, nel 1977, il teorico russo-belga Ilya Prigogine aveva già ricevuto il Nobel per aver dimostrato che un comportamento dissipativo può portare a nuove strutture collettive. Il mondo è pieno di fenomeni fisici che si manifestano solo in sistemi composti da molti corpi. Tali fenomeni sono l'argomento di questo libro, e voglio affrontarli in un modo accessibile al lettore interessato anche se non addetto ai lavori, con un uso minimo della matematica. Come vedrete, ci sono volte in cui ho trovato impossibile evitare completamente la matematica; come disse un ex rettore della nostra università, è la lingua usata da Dio quando vuole parlare agli esse-

ri umani. E, come per la maggior parte delle lingue, anche se non se ne capisce ogni parola, spesso si riesce comunque a seguire il ragionamento. Questo libro non vuol essere un trattato scientifico, ma piuttosto una narrazione, che racconta al lettore come sono emersi gli affascinanti concetti della complessità nella nostra comprensione del mondo fisico.

Ovviamente dobbiamo cominciare definendo che cosa si intende per complessità. Purtroppo, è più difficile di quanto sembri, e ci sono varie definizioni, non sempre compatibili. Il nostro punto di partenza, naturalmente, è un sistema di molti costituenti semplici che interagiscono tra loro. Se il comportamento di questo sistema è uniforme, cioè se due sottosistemi anche distanti mostrano lo stesso tipo di comportamento, consideriamo il sistema generale come semplice (opposto a “complesso”). Esempi di sistemi semplici di questo tipo sono i gas diluiti, i liquidi a riposo e i cristalli. Rimangono però semplici solo se non ci si interagisce, se li si lascia all’equilibrio; introducendo gradienti di temperatura, flussi nel fluido, attriti, pressioni e altro li si trasforma in sistemi complessi, ed è proprio per questo motivo che nella fisica classica tradizionale tali effetti si considerano di solito come trascurabili. Si osserva che in genere un sistema semplice segue leggi deterministiche che consentono previsioni univoche del modo in cui lo stato del sistema varia in seguito a una lieve variazione dei parametri da cui dipende. L’aumento del volume di un gas ideale porta a una variazione prevedibile della sua pressione. Nei sistemi semplici piccole cause portano a piccoli effetti. Anche nei sistemi complessi i singoli costituenti sono in genere soggetti a leggi deterministiche, ma gli effetti collettivi si traducono in un nuovo comportamento macroscopico inaspettato. Una variazione di temperatura di un grado può trasformare l’acqua in ghiaccio.

Vedremo più in dettaglio che è possibile avere sistemi di molte particelle identiche disposti in modo da formare strutture diverse e la transizione da una di queste strutture a un’altra porta a un comportamento critico. Inoltre, il comportamento collettivo di molte particelle può produrre forze “emergenti”, che non si possono ridurre a interazioni a due a due tra i singoli costituenti. Questi due aspetti in un certo senso definiscono il tema di questo libro: comportamento critico e strutture emergenti in sistemi di molti corpi.

Negli ultimi decenni è stato riscontrato che anche i sistemi complessi mostrano regolarità e addirittura obbediscono a leggi generali. Il trasferimento di calore nei liquidi mostra effetti sorprendenti sui flussi, dalla convezione al caos. Come già accennato, lo sviluppo di formulazioni matematiche per questo tipo di fenomeni ha dato luogo a una notevole universalità, con applicazioni eterogenee, dalla turbolenza nei fluidi all'evoluzione delle popolazioni di animali. È per questo motivo che la struttura dei sistemi complessi è molto spesso indipendente dalla natura e dall'interazione dei suoi costituenti. E c'è un limite alle regolarità dei sistemi complessi: se un sistema a molti corpi mostra comportamenti del tutto irregolari e imprevedibili, se una variazione anche infinitesimale dei parametri porta a effetti su larga scala del tutto inaspettati, allora si parla di caos. Per quanto possa sembrare un concetto semplice, il caos condivide con la complessità la mancanza di una definizione univoca. Come si misura l'assenza di ordine?

Poiché la complessità è un campo di ricerca molto nuovo, si occupa di fenomeni disparati che a prima vista (e spesso anche a seconda vista) appaiono non correlati tra loro. Perciò sembra inevitabile presentare in questo libro un assortimento di argomenti in modo non molto strutturato: lo schema logico che mette tutto "in ordine" non esiste ancora e rimane un problema aperto per la scienza del futuro. Per il momento, ci troviamo di fronte a una varietà di concetti: comportamento critico, criticità autorganizzata, emergenza, intermittenza, comportamento invariante per scala, caos, turbolenza e molti altri; questi concetti sono ovviamente correlati, ma la maggior parte delle volte non è chiaro in che modo.

Devo osservare che esiste già un nuovo campo di ricerca, chiamato teoria della complessità, che si prefigge lo studio di modelli matematici che descrivono sistemi complessi: in alcuni casi ci riesce appieno, in altri non ancora. Accenneremo di tanto in tanto a questi tentativi, ma l'obiettivo essenziale qui è quello di presentare svariati modelli di comportamento complesso che si trovano in natura, indipendentemente dal fatto che disponiamo o meno di un quadro teorico per spiegarli. Vogliamo esaminare i fenomeni che non sono descritti compiutamente con i metodi tradizionali delle scienze naturali, e vedere se possiamo in qualche modo cominciare a capir-

ne la struttura, pur non avendo ancora una teoria. E per restringere il campo ci occuperemo specificamente di fenomeni naturali, tralasciando altre questioni che sorgono in politica, in economia, nel mercato azionario e altrove, questioni che riguardano la complessità e che sono affrontate dalla teoria della complessità. Vogliamo guardare alla complessità in natura.

Indizi di un nuovo comportamento

Per introdurre il nostro campo, iniziamo con un problema che ci accompagna da molti anni. Nella scienza fisica siamo passati dagli atomi dell'antichità alla tavola periodica degli elementi, alla struttura atomica, ai nuclei costituiti da protoni e neutroni e infine alla sottostruttura di questi nucleoni data dai quark. In tutti i duemila anni in cui si è evoluto questo approccio riduzionista, non siamo ancora arrivati a una risposta soddisfacente alla semplice domanda su perché il *tempo* nel nostro mondo, nella storia così come nella cosmologia, ha una direzione ben definita e non scorre mai all'indietro. Com'è evidente, si tratta per molti versi di una questione ben più fondamentale della grande unificazione di quark e leptoni nella teoria delle particelle elementari, ma è una questione che richiede nuovi modi di pensare nonché nuovi dati empirici. Vedremo che il tempo così come lo conosciamo emerge come effetto collettivo nei sistemi a molti corpi.

I sistemi complessi, come abbiamo osservato, molto spesso non si possono separare in sottosistemi non correlati: anche i costituenti distanti sono in qualche modo ancora connessi. Affrontiamo quindi il caso più semplice possibile di formazione della connettività: la percolazione. Mostreremo che, con l'aumentare della densità, anche oggetti distribuiti casualmente attraversano un comportamento critico, da insieme di entità isolate alla connettività globale. Oltre ai comportamenti critici abituali – magnetizzazione, condensazione e altro – negli ultimi anni abbiamo scoperto un'altra forma di criticità, quella *geometrica*. In Asia è presente da millenni nel gioco del go, ma la sua struttura più generale è apparsa, nella forma della percolazione, solo un centinaio di anni fa. In termini poetica possiamo descriverla parlando di ninfee su uno stagno. Quante ninfee posizio-

nate casualmente dobbiamo avere per permettere a una formica di attraversare lo stagno senza bagnarsi? Anche qui la natura fa un salto, e all'aumentare della densità delle ninfee l'attraversamento diventa possibile all'improvviso.

Esamineremo quindi in dettaglio la natura delle forze nel mondo fisico. Il nostro pensiero troverà qui un modello nella forza gravitazionale che fa cadere la mela dall'albero o tiene la Luna in orbita attorno alla Terra. In modo simile, la forza elettrica vincola gli elettroni al nucleo formando gli atomi e la forza nucleare lega i protoni e i neutroni dando luogo ai nuclei. Una forza sembra qualcosa di simile a una molla invisibile tesa tra due (o più) oggetti, che li tira l'uno verso l'altro o, nel caso di due cariche elettriche con lo stesso segno, li fa respingere a vicenda. Negli ultimi anni è stato preso in considerazione un diverso tipo di forza. Se si pratica un foro in uno pneumatico, l'aria fuoriesce, come se fosse spinta da una forza invisibile. Ma non c'è una forza specifica su ogni molecola di aria in uscita: è l'intero sistema a subire una spinta verso uno stato favorito dal punto di vista termodinamico. In termini fisici, il sistema subisce un cambiamento, dallo stato compresso e ordinato dello pneumatico allo stato disordinato delle molecole che fluiscono liberamente nell'aria circostante. Quindi l'agente fittizio è chiamato *forza emergente*, e appare solo nei sistemi a molti corpi come fenomeno collettivo.

Passiamo quindi al comportamento critico, a cui abbiamo già fatto cenno più volte. Parlarne implica che sappiamo quale sia il comportamento normale. In fisica, è normale che una piccola causa porti a un piccolo effetto, che una piccola variazione delle condizioni porti a una piccola variazione delle proprietà misurabili. Se abbassiamo di poco la temperatura, cambieranno di poco anche la densità o la struttura del sistema. Ciò è vero quasi ovunque; ma intorno a 100 gradi centigradi l'acqua evapora, cioè si trasforma in vapore, e intorno a zero gradi si congela, diventando ghiaccio. Questo tipo di comportamento è stato chiamato equilibrio punteggiato: in un vasto intervallo di valori dei parametri non accade nulla e poi improvvisamente c'è un cambiamento completo. Nel corso dell'ultimo secolo è diventato sempre più chiaro che questo effetto richiedeva un nuovo tipo di fisica. Il vecchio adagio secondo cui *natura non facit saltus* – «la natura non fa salti» – qui è semplicemente sbagliato: la natura salta eccome.

Per i matematici significava che un comportamento “liscio” e regolare diventava improvvisamente singolare. Per molti anni, sia per i fisici che per i matematici, critico ha significato indesiderabile.

Nelle forme classiche di comportamento critico si consideravano sempre sistemi i cui parametri – temperatura, densità e simili – venivano lentamente modificati da qualche operatore esterno. Il fisico danese Per Bak ha osservato che in realtà la maggior parte dei sistemi in natura non ha bisogno di questo aiuto esterno: si evolvono da soli verso un punto critico. A meno di interpretazioni religiose, non c'è alcun operatore che inneschi un terremoto o uno tsunami. Di conseguenza, la criticità autorganizzata è divenuta un nuovo importantissimo campo di ricerca.

In matematica la complessità ha portato a riconsiderare che cosa intendiamo per dimensione. Per millenni, il nostro mondo è stato composto da una, due e tre dimensioni, e la relatività ha aggiunto il tempo come quarta. Lo studio degli oggetti che conservano strutture irregolari a qualsiasi scala – le famose coste della Gran Bretagna o della Norvegia – ha portato il matematico francese Benoit Mandelbrot a introdurre la frattalità: esistono strutture la cui dimensione non è un numero intero e può avere, per esempio, un valore compreso tra uno e due.

Un altro concetto a cui abbiamo dovuto rinunciare è l'idea che le equazioni deterministiche portino a risultati unici e inequivocabili. Si è osservato che la cosiddetta mappa logistica, una relazione ricorsiva comune nell'evoluzione delle popolazioni, porta alla biforcazione: per certi parametri il risultato oscilla tra due valori, che a loro volta continuano a suddividersi ulteriormente. Mitchell Feigenbaum ha mostrato che questa situazione alla fine si traduce nell'imprevedibilità, nel caos.

Come accennato, la struttura atomica della materia era già stata proposta su basi filosofiche nell'antica Grecia. Duemila anni dopo la si mise in discussione: l'idea degli atomi poteva essere d'aiuto come strumento di calcolo per comprendere certe regolarità (come la tavola periodica degli elementi), ma gli atomi esistevano davvero, con una massa e un'estensione? Da questo punto di vista, gli atomi erano i quark del XIX secolo. Anche alcuni eminenti fisici esprimevano dubbi... La conferma definitiva venne da un fenomeno noto

fin dall'antichità e oggi chiamato moto browniano. In mezzi perfettamente omogenei, l'acqua o l'aria, particelle macroscopiche visibili come il polline o la polvere danzano in modo irregolare, in conseguenza del movimento casuale dei costituenti invisibili di questi mezzi, atomi o molecole.

L'indipendenza dalla scala che si riscontra in molti fenomeni naturali, e che porta per esempio alla distribuzione di Gutenberg-Richter osservata per i terremoti, continua sorprendentemente – e finora davvero senza alcuna chiara spiegazione – a riapparire in ambiti inaspettati. Si è scoperto che anche la frequenza d'uso delle parole usate nei testi in qualsiasi lingua umana segue una simile legge di potenza e se scomponiamo i numeri interi positivi nei numeri primi loro fattori, anche la frequenza di questi componenti obbedisce a un'analogia legge. Qual è l'origine di tale universalità?

L'avvento della fisica quantistica ha portato un'altra forma ancora di comportamento collettivo. A temperature bassissime, nei sistemi a molti corpi, gli elettroni come componenti quantistici portano alla formazione di un quinto stato della materia, oltre ai solidi, i liquidi, i gas e i plasm. Il nuovo stato, una specie di liquido dormiente (nella terminologia fisica, condensato di Bose-Einstein), dà origine a fenomeni sorprendenti come la superconduttività (la scomparsa della resistenza elettrica) e la superfluidità (la scomparsa della viscosità per i fluidi). Ancora una volta, si tratta di fenomeni che hanno senso solo per sistemi collettivi con molti costituenti: un singolo costituente non può mostrare tali proprietà.

In conclusione, ci sono due approcci distinti per comprendere il mondo che ci circonda. Nel primo, il più antico, identifichiamo gli elementi costitutivi ultimi, la loro struttura e la forma delle loro interazioni. Nel secondo, studiamo gli schemi e le regolarità generali che governano il comportamento collettivo dei sistemi di moltissimi costituenti. Questo secondo approccio è l'argomento di questo libro, e scopriremo che molte di queste "regole di comportamento collettivo" sono altamente universali. In forme molto simili, valgono per quark ed elettroni, magneti e stelle, insetti e uccelli e molto altro. Descrivono la formazione delle galassie, la comparsa della turbolenza e l'evoluzione delle popolazioni di animali. La complessità governa un mondo davvero sorprendente.

2

Il flusso del tempo

*Fugit irreparabile tempus.
(Il tempo fugge irreparabilmente.)*

Virgilio (70-19 a.C.)

L'invarianza temporale in fisica

Il tempo scorre ineluttabilmente dal passato al futuro e noi scorriamo con esso come un ramo in un ruscello. Gli esseri umani sanno da sempre che non se ne può invertire la direzione. Il corso del tempo è definito dalle costellazioni, dalle strutture geologiche, dai fossili, dai documenti scritti, dalle nostre vite, dai nostri ricordi e da altro ancora. Sappiamo che cosa è *successo*, ma non che cosa *succederà*. Possiamo dare un ordinamento al passato, al presente e al futuro: c'è un'ovvia *freccia storica del tempo*, dall'immutabile all'imprevedibile.

Può quindi risultare sorprendente che fino a non molto tempo fa i fondamenti della fisica fossero «invarianti rispetto all'inversione temporale», come si suol dire. Tutti gli assiomi fondamentali – i principi della dinamica di Newton, le equazioni di Maxwell per l'elettrodinamica, le equazioni di Schrödinger e di Dirac per i sistemi quantistici, così come la teoria della relatività di Einstein – consentono al tempo di procedere in avanti o indietro. Partendo dallo stato attuale, tutte queste leggi *predicono* il futuro e *postdicono* il passato nella stessa misura. Il tempo della fisica era il ticchettio di un pendolo ideale: sessanta tic definiscono un minuto, che è passato e che passerà. Siamo solo in un punto di una successione infinita di punti uguali. Quindi, per secoli, la scienza fisica non ha fornito alcun aiuto nell'assegnare una direzione al tempo. E anche la com-

binazione di spazio e tempo di Einstein nella teoria della relatività non è stata d'aiuto: la quarta coordinata dello spaziotempo era pur sempre simmetrica rispetto ai due versi, e quindi evidentemente non era il tempo che misurava la vita dei nostri nonni. In fisica i processi sono sempre stati reversibili, mentre nel mondo reale, nelle nostre vite, sono per la maggior parte irreversibili.

E per quanto riguarda l'universo, si pensava fosse eterno e immutabile, con le stelle sopra di noi a formare il *firmamento*; erano sempre lì in uno spazio immutabile e quindi non davano alcun aiuto nell'assegnare una direzione al tempo... Quando Einstein notò che le sue equazioni per la geometria dell'universo permettevano al tempo di andare tanto in avanti quanto indietro, rendendo possibile sia l'espansione sia la contrazione dell'universo, a malincuore aggiunse un termine per eliminare questa libertà, per impedire variazioni temporali dell'universo; non funzionò... e in seguito considerò questo tentativo come uno dei suoi errori più grandi.

Il motivo era che la visione cosmologica del tempo di lì a poco cambiò completamente, quando nel 1929 l'astronomo statunitense Edwin Hubble mostrò che le galassie lontane si stanno allontanando da noi e che l'universo si sta espandendo. Ciò significava, come infatti era stato anticipato poco prima sulla base delle equazioni di Einstein dal belga Georges Lemaître, che doveva essere partito da uno stato iniziale molto denso, con il *Big Bang*, e successivamente essersi espanso fino a formare il nostro mondo attuale. Lemaître, prete cattolico oltre che fisico, notò che la fisica dava un modo per includere la creazione. Nel 1998 è stato inoltre dimostrato che questa espansione sta addirittura accelerando. Quindi oggi abbiamo anche una chiara *freccia cosmologica del tempo*, che punta nella stessa direzione di quella storica. Il nostro universo una volta era giovane e poi è invecchiato, proprio come noi. Spazio e tempo non sono equivalenti: nello spazio, gli spostamenti sono possibili in qualsiasi direzione, nel tempo in una sola direzione: in avanti.

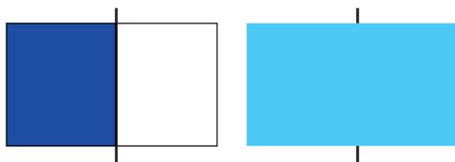
La cosmologia, la storia umana, nonché la maggior parte delle religioni, asseriscono quindi che il tempo abbia una direzione ben definita. C'è un modo per far sì che anche la fisica scelga una direzione? Il filosofo della scienza Hans Reichenbach affermava programmaticamente che «non c'è altro modo per risolvere

re il problema del tempo se non la via che passa per la fisica». Alla fine, si è effettivamente rivelato fattibile, ma ha richiesto un nuovo modo di pensare. Non solo: all'inizio la freccia sembrava puntare nella direzione sbagliata, e quindi dobbiamo approfondire un po' la faccenda.

L'esperimento di Joule

Il modo più chiaro per affrontare la situazione consiste forse nel pensare a un esperimento condotto dal fisico britannico James Prescott Joule intorno al 1850. Joule era figlio di un fabbricante di birra e in seguito gestì lui stesso il birrificio; il suo interesse per concetti come la pressione e la temperatura non era quindi soltanto accademico. Per il suo esperimento prese un contenitore isolato termicamente, diviso in due scomparti; uno conteneva un gas, l'altro niente: era più vicino possibile al vuoto. Quando rimuoveva il setto divisorio tra i due scomparti, il gas si diffondeva rapidamente nella parte vuota e si distribuiva in modo uniforme nell'intero contenitore ora più grande (si veda la Fig. 2.1).

Fig. 2.1 - L'esperimento di Joule



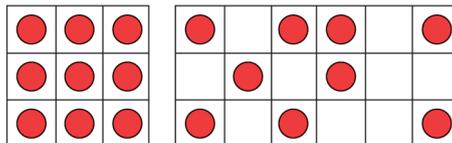
Per quanto tempo si potesse aspettare, il gas nel suo insieme non tornava mai nemmeno brevemente nello scomparto iniziale. Quello che succedeva, l'espansione, era *irreversibile*, non si poteva annullare; era impossibile invertire la freccia del tempo. D'altra parte, se svolgessimo un esperimento analogo con un solo atomo nello scomparto iniziale, dopo la rimozione del setto divisorio questo atomo avrebbe la stessa probabilità di trovarsi nella parte vecchia come in

quella nuova del contenitore. E due atomi avrebbero probabilità pari a $1/4$ di essere di nuovo insieme nella parte iniziale, e la stessa di trovarsi entrambi in quella nuova.

La rottura della simmetria temporale, dell'invarianza rispetto all'inversione temporale, deve quindi essere in qualche modo conseguenza dal fatto che il gas è composto da moltissime particelle. Con un numero crescente di componenti, un ritorno simultaneo alle condizioni iniziali diventa sempre più improbabile. Ci aspettiamo quindi che una direzione del tempo ben definita appaia solo per sistemi composti da molti componenti indipendenti, ognuno dei quali si muove per conto proprio. È forse la prima situazione fisica che indica che il comportamento di un sistema di molti corpi è concettualmente diverso, in linea di principio, da quello dei suoi singoli costituenti. Il tutto è davvero più della somma delle parti, come aveva osservato Aristotele più di duemila anni prima. Per un singolo atomo, il tempo non ha importanza, non scorre in modo irreversibile; lo scorrere del tempo è un fenomeno collettivo.

Questo significa che, dopo tutto, è vero che Dio gioca a dadi. Per chiarire in che senso, consideriamo una situazione più semplice, una scatola con nove caselle (si veda la Fig. 2.2). Date nove palline e volendo disporre una pallina in ogni casella, abbiamo quindi una sola possibile configurazione. Se ora raddoppiamo la grandezza della scatola portandola a 18 caselle, ancora con nove palline, otteniamo 48.620 diverse configurazioni possibili. Solo una di queste è il caso iniziale con le nove palline nella sezione iniziale. Se tutte le configurazioni sono ugualmente probabili, la probabilità di un ritorno completo allo stato iniziale è 1 su 48.620.

Fig. 2.2 - Nove palline in nove caselle e una delle 48.620 possibilità per nove palline in 18 caselle

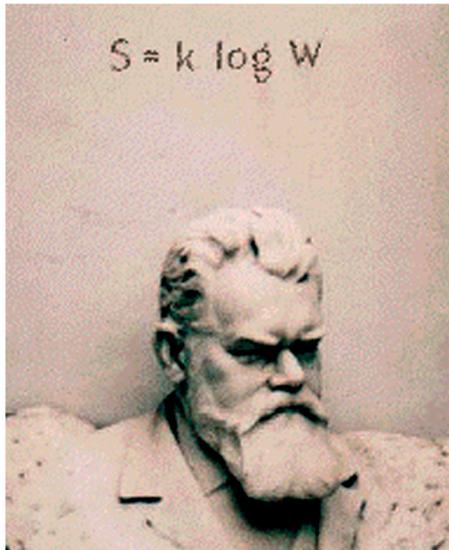


Un litro di gas contiene non nove, ma qualcosa come 10^{23} molecole; la rimozione del setto ha quindi come conseguenza un enorme aumento del numero di possibilità. La probabilità di un ritorno allo stato iniziale è di fatto zero: è inverosimile che ogni particella ripercorra la propria traiettoria a ritroso. Sembra che il flusso orientato del tempo sia una proprietà collettiva di un gran numero di particelle.

Entropia

Il grande fisico austriaco Ludwig Boltzmann creò le basi per la fisica dei sistemi con molti componenti, la *meccanica statistica*, e trasformò il flusso reversibile del gas dell'esperimento di Joule in un assioma di questa disciplina. In primo luogo, spiegò che il calore ha

Fig. 2.3 - La tomba di Ludwig Boltzmann a Vienna, su cui compare la definizione dell'entropia



(Foto per gentile concessione della Österreichische Zentralbibliothek für Physik, Vienna, Austria)

un'origine meccanica. È una misura del moto dei costituenti del sistema, e quindi il calore è una forma di energia: questo è il *primo principio della termodinamica*. Si chiese poi a quante configurazioni distinte, a quanti *microstati*, possono dare luogo le particelle per una data energia e un dato volume fissati. Così ottenne una nuova grandezza fisica fondamentale per la termodinamica, l'*entropia* S , definita in termini del logaritmo del numero W di possibili microstati compatibili con un dato insieme di informazioni *macroscopiche*, come l'energia e il volume. Un certo microstato è specificato dalle $3N$ posizioni e le $3N$ velocità di tutti i suoi N costituenti in un dato momento, e per valori dati dell'energia e del volume, c'è evidentemente un numero enorme di tali stati. Le variabili di posizione e velocità definiscono quello che viene chiamato *spazio delle fasi* $6N$ -dimensionale: un certo microstato corrisponde a un punto in questo spazio delle fasi.

Come si vede sulla tomba di Boltzmann a Vienna (Fig. 2.3), l'entropia è definita come $S = k \log W$. La costante di proporzionalità k , detta costante di Boltzmann, insieme alla velocità della luce c , alla costante di gravitazione universale G e alla costante di Planck h , è una delle quattro costanti fondamentali della natura. È l'unica delle quattro che si riferisce a sistemi di molti corpi e non ha nulla a che vedere con l'interazione di singole particelle. Può aver senso dire che la fisica classica (pre-relatività) poggia sulle spalle di tre giganti: Isaac Newton per la meccanica, James Clerk Maxwell per l'elettrodinamica e Ludwig Boltzmann per la meccanica statistica.

Nell'esempio relativo alle palline, $W = 1$ e quindi $S = 0$ per il caso iniziale, mentre la scatola raddoppiata dà $S = 4,7 k$. Per un numero costante di palline, l'entropia aumenta quindi all'aumentare del volume. E così Boltzmann propose quello che oggi viene chiamato *secondo principio della termodinamica*: nell'evoluzione di un sistema isolato l'entropia non diminuisce mai; o aumenta o rimane costante se è già al suo massimo. Se diamo al mezzo la possibilità di aumentare l'entropia espandendosi in un volume maggiore, lo fa sempre. Quindi nell'esperimento di Joule abbiamo proprio questo: l'espansione di un gas a energia totale fissa, a temperatura costante, si traduce in un'entropia che cresce al crescere

del volume complessivo. Qui abbiamo mostrato il secondo principio della termodinamica per un esempio piuttosto semplice, ma è forse l'affermazione più profonda di tutta la fisica. Il famoso fisico e astronomo inglese Sir Arthur Eddington avvertì i colleghi: *Se la vostra teoria preferita viene contraddetta dalle osservazioni, be', a volte gli sperimentatori fanno qualche pasticcio. Ma se scoprite che la vostra teoria va contro il secondo principio della termodinamica, non c'è speranza; non potete far altro che sprofondare nella più profonda umiliazione.*

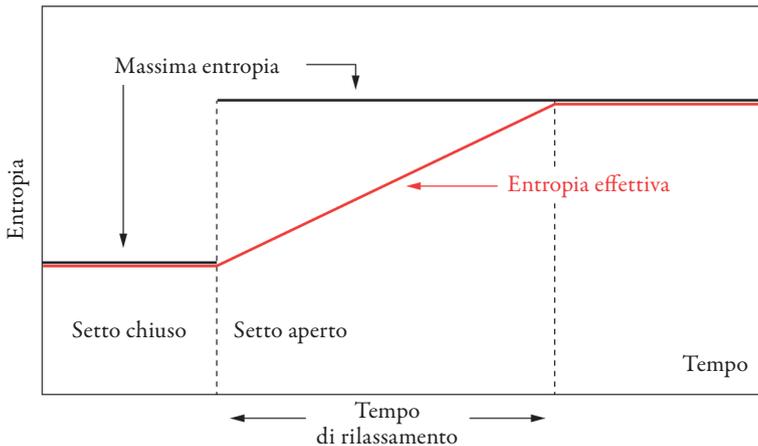
Abbiamo visto sopra che, dato un volume maggiore, lo stato molto ordinato di nove palline in nove caselle adiacenti corrisponde a un'entropia molto bassa e quindi diventa molto improbabile. Questa è in realtà una proprietà del tutto generale: più un sistema è ordinato, minore è in generale la sua entropia. Quindi l'evoluzione nel tempo di un sistema abbandonato a sé stesso tende a diminuirne l'ordine e ad aumentarne il disordine o casualità. Potremmo chiamarla *direzione entropica del tempo.*

Secondo i cosmologi successivi a Lemaître e Hubble, il nostro universo ha continuato a espandersi dai tempi del Big Bang; come abbiamo visto, questo definisce la freccia cosmologica del tempo. Secondo la meccanica statistica, ciò deve implicare anche un'entropia crescente. L'universo dei primissimi istanti deve quindi aver avuto un'entropia totale molto inferiore a quello attuale; è una conclusione a cui sono giunti vari scienziati molto preparati. C'è però un problema, come ha notato la maggior parte di loro. L'universo primordiale era, per quanto ne sappiamo oggi, un gas molto caldo di particelle elementari, e un sistema siffatto è, secondo la meccanica statistica abituale, già in uno stato di massima entropia. Il nostro mondo attuale, con galassie, stelle, pianeti e cosmologi, non è certo alla massima entropia. Se dovessimo trasformare tutto ciò che ci circonda in un gas di protoni e neutroni liberi, l'entropia aumenterebbe considerevolmente. L'entropia era massima all'inizio, ma non è massima ora. Qualcosa sembra non tornare: pare che l'evoluzione dell'universo violi la freccia entropica del tempo, quale ci è data dalla meccanica statistica.

Perché l'entropia dell'universo non è massima?

Oggi crediamo di avere la soluzione a questo enigma. L'idea di base si deve al fisico e cosmologo americano David Layzer, della Harvard University. All'inizio dell'esperimento di Joule il gas è in equilibrio nel volume iniziale; ha l'entropia massima rispetto al volume dato. Dopo che abbiamo rimosso il setto, il gas esce, si espande e raggiunge un'uniformità, fino a quando dopo qualche tempo è di nuovo in equilibrio, in un volume maggiore e con un'entropia maggiore. Nella fase intermedia l'entropia sale dal valore iniziale (volume piccolo) verso uno maggiore (volume grande) (si veda la Fig. 2.4). In questa fase intermedia, durante il tempo di rilassamento, il sistema non è in equilibrio e il valore della sua entropia rimane al di sotto del valore possibile per il volume maggiore. Di fatto l'entropia non è ancora massima, perché le particelle di gas si muovono preferenzialmente in direzione del nuovo volume, piuttosto che in una direzione ortogonale a questa. In questa fase di *rilassamento* abbiamo quindi un certo ordine, che alla fine viene distrutto dalle collisioni tra le molecole, le quali ripristinano l'isotropia e l'equilibrio.

Fig. 2.4 - L'evoluzione dell'entropia nell'esperimento di Joule



In una situazione così, ma di fatto anche più in generale, l'ordine è la differenza tra l'entropia effettiva e quella massima possibile. Esso scompare quando l'entropia diventa massima: allora abbiamo un disordine completo. Quindi l'ordine diventa mancanza di disordine, non il contrario come potremmo pensare. Ma per un dato sistema il disordine, la massima entropia, è unico, mentre ci sono molti diversi tipi di ordine, dai fiocchi di neve ai cristalli.

Il tempo di rilassamento è determinato da una parte dall'intensità dell'interazione tra le molecole: il raggiungimento dell'equilibrio è il processo in cui i componenti eliminano le differenze attraverso le collisioni. D'altra parte, dipende dalla densità del mezzo: se è molto rado, ci sono poche collisioni. Poiché l'espansione fa diminuire la densità, il tempo di rilassamento aumenta. Un sistema in espansione è quindi soggetto a una competizione tra il tempo di rilassamento e il tasso di espansione. Se il sistema si espande a una velocità sufficiente, rispetto al tempo di rilassamento, l'entropia effettiva, sebbene in continuo aumento, si trova, sempre più, al di sotto del valore massimo possibile. Abbiamo quindi una situazione in cui l'entropia del sistema aumenta di continuo, coerentemente con il secondo principio della termodinamica, ma allo stesso tempo cresce anche la differenza tra entropia effettiva e massima: anche l'ordine è in continuo aumento; si veda la Fig. 2.5. Questo scenario è la spiegazione che David Layzer (Fig. 2.6) suggerì intorno al 1975 per spiegare le direzioni in apparenza opposte dell'evoluzione del tempo in cosmologia e in meccanica statistica.

La meccanica statistica richiede un'entropia crescente, la cosmologia un ordine crescente. Vediamo qui che entrambe le cose possono verificarsi simultaneamente, a partire da uno stato di massima entropia al momento del Big Bang. La successiva espansione dello spazio fu troppo rapida per consentire al plasma caldo iniziale di particelle elementari di rimanere in equilibrio. Così l'evoluzione temporale in un volume più grande portava a un'entropia effettiva che da una parte aumentava, e dall'altra rimaneva sempre più indietro rispetto al massimo possibile, il quale cresceva ancor più velocemente. In questo modo, sia l'ordine sia il disordine aumentavano simultaneamente, contrariamente alla nostra esperienza quotidiana.