

Avvertenza

Questa dispensa costituisce il § 2 del capitolo due della nuova edizione in preparazione della *Introduzione alla filosofia della scienza. Un approccio storico ai concetti fondamentali* (1a ed. Bonanno, Catania 2004) che viene messo on line ad esclusivo uso didattico per gli studenti che seguono il corso facente uso della prima edizione, in modo che essi possano fruire delle migliorie in esso contenuto. In carattere blu sono indicate le novità rispetto alla prima edizione. Per ogni ulteriore suggerimento o eventuali correzioni scrivere a f.coniglione@unict.it.

© Francesco Coniglione

2.2. Il calore e la termodinamica

La visione meccanicistica del mondo viene in primo luogo messa in crisi dai concetti che vengono elaborati per lo studio dei fenomeni termici, sia perché sembrava che la scienza che veniva edificata – la termodinamica – dovesse sfuggire alla sistematizzazione unitaria di tutta la conoscenza del mondo fisico nell’ambito della dinamica newtoniana (secondo l’idea di Laplace) (v. § 2.2.1), sia in quanto i fenomeni connessi alla propagazione del calore manifestavano un comportamento che contraddiceva alcuni dei principi basilari della dinamica classica (v. § 2.2.2).

2.2.1. *La termodinamica di Fourier mette in crisi l’idea laplaciana di scienza unitaria* – Per quanto riguarda il primo aspetto, per i fenomeni termici era stato proposto l’esempio di un modo non laplaciano di intendere la scienza dal fisico francese Joseph Fourier (1768-1830). Questi aveva, infatti, dimostrato all’inizio dell’Ottocento come fosse possibile edificare una scienza dei fenomeni termici prescindendo da una visione meccanicistica della realtà e, quindi, evitando di ipotizzare componenti ultime della natura. Egli partiva da grandezze macroscopiche, da fatti “generalì”, che permettevano la previsione e la formulazione di teoremi ed equazioni sulla propagazione del calore che avevano altrettanta validità e rigore matematico di quelli tipici della meccanica. Veniva a cadere nella sua impostazione l’idea che fosse necessario trarre le equazioni che regolamentano il comportamento del calore da ipotesi di fisica molecolare e quindi veniva meno la necessità – sottolineata da Laplace – di inserire le leggi fenomeniche della termodinamica in un quadro unitario coerente che abbracciasse tutta la realtà. La teoria del calore di Fourier metteva in crisi la fisica laplaciana in quanto, spezzandone l’unità, «si veniva a porre come capitolo indipendente dal resto della fisica e, in particolare, dalla meccanica (su questo punto Fourier fu esplicito), che forniva i principali strumenti necessari alla trattazione dei modelli molecolari».¹

In tal modo la termodinamica si poteva costituire come scienza autonoma, indipendentemente dalla meccanica e senza dividerne le ipotesi di fondo: l’unitarietà della scienza e della natura sembrava così messa in grave difficoltà. «La rottura dell’unità della fisica, assicurata dal modello meccanico, il venir meno della speranza di possedere uno schema di natura sufficientemente potente ed elastico da essere applicato all’insieme dei fenomeni inorganici, in ciò consistette la crisi della fisica laplaciana. Nel corso del secolo, sotto gli attacchi che provenivano dalle prospettive più disparate [...] il modello della fisica molecolare si rivelò inesorabilmente inadeguato al compito che Laplace gli aveva assegnato, quello di riunificare la fisica. Esso rimarrà perfettamente adeguato alla trattazione di alcuni settori limitati dell’esperienza, come l’elasticità dei solidi o la capillarità, ma si manifesterà troppo povero per raggiungere l’ambizioso obiettivo di fungere da elemento unificatore di tutta l’esperienza. Gran parte della storia della scienza ottocentesca è storia del riconoscimento dei limiti sempre nuovi, sempre più numerosi alla applicabilità del modello di Laplace al mondo empirico».²

2.2.2. *I fenomeni termici e la freccia del tempo* – Più seria era la sfida alla dinamica newtoniana proveniente da una particolare caratteristica dei fenomeni termici, cioè gli eventi in cui si ha scambio di calore.

Costituisce una evidenza empirica il fatto che *il calore si trasmette secondo una direzione*: esso va sempre dal corpo più caldo a quello più freddo, e mai avviene il contrario (che cioè un corpo più freddo si raffreddi ulteriormente per rendere più caldo un corpo col quale è in contatto, avente una temperatura iniziale più elevata). **Non abbiamo mai osservato che la pizza calda appena comprata diventi più calda lungo la strada che ci porta a casa, né che**

¹ R. Maiocchi, *Storia della scienza in Occidente. Dalle origini alla bomba atomica*, La Nuova Italia, Firenze 1995, p. 383.

² *Ibidem*.

L'acqua fredda in un bicchiere posto sul tavolo in una torrida giornata d'agosto diventi ancora più fredda. E se teniamo lo sportello del frigo aperto esso si riscalderà e mai capiterà che il suo interno diventerà più freddo. Questo fa parte della nostra esperienza di ogni giorno, per cui sappiamo bene, a livello intuitivo, come si comportano i corpi caldi e come il calore si trasmette.

Ciò mette in luce un fatto che concerne innanzi tutto i fenomeni termici, ma che in generale riguarda quasi ogni evento della realtà che ci circonda (non capita mai che la gallina ritorni pulcino, né che l'anidride carbonica che esce da una bibita gassata possa ritornare dentro la bottiglia). Insomma i fenomeni termici seguono *spontaneamente* una direzione temporale; si evolvono cioè solo in una direzione e pertanto ci danno il senso del tempo, di un prima e di un poi: si dice che per essi esiste una *freccia temporale*. Sarebbe naturale aspettarsi che vi sia una legge fisica che giustifichi questo modo di comportarsi e spieghi perché questi eventi si svolgano secondo una certa sequenza e mai in quella inversa. Ma la cosa sorprendente è che nella scienza a nostra disposizione – e in particolare nella fisica a partire da Newton (ma vi si può comprendere anche l'elettromagnetismo e persino la relatività di Einstein, delle quali parleremo in seguito) *non esiste alcuna legge che ci possa spiegare questo comportamento*, che cioè sia in grado di farci capire il perché di questa freccia temporale.

Infatti, i fenomeni descritti dalla *dinamica classica* sono indifferenti rispetto al tempo e possono svolgersi in un senso o in un altro. Essi, cioè, sono governati da equazioni nelle quali si può invertire la variabile che indica il tempo senza che il fenomeno diventi per ciò impossibile: un pianeta può ruotare intorno al sole in un verso o nell'altro senza che ciò contraddica alcuna legge fisica. Insomma, «le leggi note non solo non ci spiegano perché vediamo gli eventi svolgersi unicamente in un senso, ma ci rivelano che in teoria questi eventi potrebbero svolgersi anche in quello contrario».³ Si dice che le leggi fisiche sono *simmetriche per inversione temporale*.

Il primo ambito fenomenico in cui appunto tale comportamento venne evidenziato e studiato fu quello dei fenomeni termici. Come abbiamo detto, il calore non può scorrere indifferentemente in una direzione o nell'altra; esso sembra avere un decorso privilegiato. Al mondo senza tempo (o ad esso indifferente) della meccanica *classica* sembra contrapporsi un mondo – *innanzi tutto quello che ha a che fare col calore* – che segue la freccia del tempo. Come conciliare, dunque, il mondo descritto dalla meccanica con i fenomeni di diffusione termica? Ovvero – guardando la cosa dal punto di vista di un laplaciano – come spiegare i fenomeni termici nel quadro della scienza meccanicistica? Come ristabilire l'unitarietà della natura e della scienza?

2.2.3. *Il secondo principio della termodinamica e l'entropia* – Il solco tra i fenomeni descritti dalla termodinamica e la visione meccanicistica sembrò ulteriormente approfondirsi quando nel 1854 venne scoperto – ad opera di Rudolf Clausius (1822-88), che aveva profittato delle riflessioni del 1824 di Sadi Carnot sulle macchine termiche – il cosiddetto *secondo principio della termodinamica*, che introdusse il concetto di *entropia*, reso poi celebre dalla formulazione fornita da William Thomson (Lord Kelvin) (1824-1907) nel 1852.

Esso in sostanza nega la possibilità che non è possibile trasferire calore da un corpo freddo ad uno caldo, a meno che non si fornisca del lavoro tratto da un sistema esterno; ovvero, *il calore non passa mai spontaneamente da un corpo più freddo ad uno più caldo*. Così ad es., non è possibile costruire un frigorifero che trasferisca il calore dal suo interno all'esterno senza che ad esso sia fornita energia esterna; ed in effetti, nei nostri frigoriferi do-

³ B. Greene, *La trama del cosmo. Spazio, tempo, realtà*, Einaudi, Torino 2004, p. 173. Possiamo esprimere tale situazione anche con le parole di P. Coveney e R. Highfield: «Per avere un'idea di questa simmetria del tempo, potremmo servirci, ad esempio, della ripresa cinematografica dei moti planetari eseguita dalla sonda spaziale *Voyager 2*, lanciata nel 1977 per esplorare il sistema solare esterno. I moti dei pianeti furono i primi movimenti che Newton ridusse ad una legge matematica. Ebbene, il film sarebbe perfettamente coerente con queste leggi della meccanica celeste sia se fosse proiettato in avanti, sia se fosse proiettato all'indietro. Questa credenza in un mondo deterministico, nel quale il tempo non ha direzione e il passato e il futuro sono predeterminati, ha svolto un ruolo di grande importanza nello sviluppo della fisica» (P. Coveney, R. Highfield, *La freccia del tempo*, Rizzoli, Milano 1991, p. 25).

mestici questa energia è quella elettrica che permette di far funzionare la pompa di calore. Inoltre lo stesso Clausius dimostrò che il secondo principio è legato ad una variabile termodinamica, che lui chiamò appunto *entropia*, per cui esso si può anche esprimere quantitativamente nei termini di questa. In tal modo il secondo principio può essere formulato in forma più semplice e generale con l'affermare che in un sistema chiuso nel quale avvengono solo trasformazioni reversibili l'entropia è costante, mentre se in esso avvengono trasformazioni irreversibili, l'entropia aumenta. In sintesi, in un sistema chiuso l'entropia non può diminuire. Questo enunciato (detto legge dell'entropia), afferma in sostanza che dati due stati qualsiasi di un sistema chiuso, lo stato che presenta una maggiore entropia è sicuramente futuro rispetto a quello che presenta una minore entropia; viene così introdotta nei processi fisici la cosiddetta *freccia del tempo*: è l'aumento dell'entropia ad indicare il verso in cui scorre il tempo e quindi ad essere l'indicatore dell'evoluzione di un sistema.

Questa nuova grandezza fisica – l'entropia – sta ad indicare il processo necessario di decadimento dell'energia derivante dal fatto che, in un sistema chiuso, i corpi prima o poi finiscono per assumere la medesima temperatura, qualunque sia la loro differenza iniziale. Si dice che in questo caso l'entropia del sistema è pervenuta al suo massimo. Pertanto si afferma che in un sistema *isolato* – cioè senza scambi di *materia e di* energia con l'esterno – l'entropia tende inesorabilmente ad aumentare e non può accadere il contrario: è pertanto questo un processo *irreversibile*, che contrasta con il divenire della meccanica, che viene descritto sempre come *reversibile*.

Per dare un'idea intuitiva della differenza tra processi reversibili ed irreversibili, immaginiamo di filmare un fenomeno meccanico molto semplice: due palle di biliardo si avvicinano, si urtano e quindi si allontanano l'una dall'altra. Ebbene il filmato così ottenuto può essere proiettato sia nel verso giusto sia al contrario e otterremo sempre la raffigurazione di un fenomeno meccanico perfettamente possibile, al punto che una persona che non abbia visto il fenomeno originale non sarebbe in grado di dire quale tra i due filmati è quello corretto. Ciò significa che la direzione del processo può essere invertita senza contraddire nessuna delle leggi della dinamica newtoniana; esso è pertanto *reversibile* dal punto di vista meccanico. Lo stesso non accadrebbe invece se filmassimo l'avanzare di una locomotiva a vapore (che è una macchina termica che trasforma calore in lavoro): proiettando il filmato al contrario vedremmo il fumo rientrare nel fumaiolo e tutti ci accorgeremmo che in questo caso non è indifferente il verso in cui avviene il fenomeno fisico. In questo caso esso è *irreversibile*. Gran parte dei fenomeni che avvengono in natura sono di questo tipo: lo zucchero che si scioglie nell'acqua, il calore che si diffonde da una stufa in una stanza, il legno che brucia nel camino ecc.

Essendo la differenza tra temperature essenziale affinché si possa produrre lavoro, come aveva dimostrato Sadi Carnot, ne derivava che un sistema in cui l'entropia giunge al suo massimo (cioè tutte le sue parti hanno la stessa temperatura) non è in grado di generare alcun lavoro; diremo che esso è inerte. Insomma l'universo (considerato come un sistema termodinamico chiuso) tenderebbe ad evolvere nel senso di un progressivo aumento dell'entropia, la quale pertanto ne definisce la direzione. Il tempo non è altro che un'espressione del processo entropico. Diversamente dalla meccanica, per la quale il tempo era indifferente, nei processi termodinamici esso è un elemento essenziale, che scorre nel senso dell'aumento progressivo ed inesorabile dell'entropia. Com'è possibile conciliare la meccanica con questi aspetti della natura messi in evidenza dalla termodinamica?

2.2.6. La morte termica dell'universo e le sue implicazioni filosofiche – Le conseguenze che scaturiscono da questa prospettiva sono gravide di implicazioni filosofiche, che colpiscono i contemporanei e che accendono una vivace discussione. Infatti, se si assume che l'universo sia un sistema chiuso e finito, prima o poi tutte le sue parti avranno la medesima temperatura e quindi in esso non sarà possibile più alcun tipo di lavoro: esso andrà incontro alla *morte termica*. Questa la conclusione cui giunse Thomson nel 1852, cui fece successivamente eco Hermann Helmholtz nel 1854, che così sintetizza la questione: «Se l'universo è lasciato in balia del decorso dei suoi processi fisici senza l'intervento di azioni esterne, alla

fine tutto il contenuto di forza dovrà trapassare in calore, e tutto il calore distribuirsi in un equilibrio termico. Allora è esaurita ogni possibilità di un'ulteriore trasformazione; allora debbono completamente cessare tutti i processi naturali di qualsiasi tipo. Anche la vita delle piante, degli animali e degli uomini non può ulteriormente sussistere, ove il Sole abbia perduto la sua elevata temperatura e, con essa, la sua luce, e quando tutte le parti costitutive della superficie terrestre abbiano contratto i legami chimici, che comportano le loro forze di affinità. In breve, da questo momento in poi l'universo sarà condannato alla quiete eterna».⁴

Questa prospettiva di una vera e propria *fine del mondo* contrastava con la tesi, sostenuta da materialisti e meccanicisti, di un universo infinito ed eterno, che si basava sull'idea della conservazione dell'energia formulata dal *primo principio della termodinamica*, proposto nella sua forma più completa e generale dallo stesso Helmholtz.

Questo principio afferma – in breve – che in nessun caso l'energia viene creata o distrutta, ma viene piuttosto continuamente scambiata fra i vari sistemi fisici sotto forma di calore o lavoro. **Ne segue, pertanto, che l'energia totale dell'universo resta sempre costante: essa non può né aumentare né diminuire, ma solo trasformarsi da una forma all'altra. Quando bruciamo un pezzo di carbone per ricavarne energia (sotto forma di calore) non è stata distrutta l'energia in esso accumulata, ma l'abbiamo solo convertita in altre forme, come il calore, l'anidride solforosa o gli altri gas che si disperdono nell'atmosfera. L'energia così trasformata non è da noi facilmente utilizzabile, allo stesso modo di come avveniva quando era concentrata nel pezzo di carbone, ma è tuttavia ancora lì, dispersa nell'ambiente, ma sempre esistente.**

Ma l'ammissione della morte termica dell'universo dava fiato a tutti coloro che volevano combattere il materialismo ed il positivismo col negare l'autonomia e l'eternità della natura e miravano quindi ad introdurre, con l'idea di un inizio e di una fine del mondo, la necessità di ammettere un intervento *esterno* in grado di spiegarne la nascita e di scongiurarne l'altrimenti inevitabile fine: l'ammissione dell'esistenza di un provvido Dio sembrava ormai una esigenza che scaturiva dal seno stesso della scienza.

Ovviamente non tutti i filosofi e gli scienziati accettavano una tale prospettiva; essa, ribattevano, si basa sul postulato che l'universo sia un sistema chiuso e finito, in quanto solo in questi sistemi termodinamici l'entropia tende inevitabilmente ad aumentare sino a raggiungere l'equilibrio termico. Far derivare dal secondo principio della termodinamica la necessità di ammettere la fine del mondo, e quindi un universo finito e non eterno, significa commettere una vera e propria *petitio principii*, cioè assumere che l'universo sia un sistema chiuso e finito, presupponendo così la tesi che si vuole dimostrare. Così ad esempio il filosofo Herbert Spencer, rigettava l'ipotesi della morte termica sostenendo l'idea che il nostro universo fosse parte di un universo più ampio ed infinito in grado di intervenire dall'esterno, impedendone il degrado entropico.

Ma, al di là delle implicazioni filosofiche tratte a ragione o a torto dal degrado entropico, è importante rilevare che emerge in ogni caso una discrepanza, in seno stesso alla termodinamica, tra il primo e il secondo principio. Il *primo principio*, infatti, sostiene la conservazione dell'energia e quindi la persistente capacità di lavoro (essendo appunto l'energia definita come capacità di compiere lavoro); il *secondo*, invece, afferma il necessario degrado dell'energia e quindi l'impossibilità di compiere lavoro una volta raggiunto l'equilibrio termico. Il primo è del tutto in linea con una visione meccanicistica della natura; il secondo, invece, introducendo la freccia del tempo e l'irreversibilità, è in palese contrasto con la reversibilità propria della dinamica classica. Com'è possibile conciliare tali due principi?

La soluzione sarebbe venuta dalla interpretazione dei fenomeni termici come processi meccanici coinvolgenti un numero grandissimo di particelle in moto cinetico.

2.2.8. *Tentativi di interpretare cinematicamente i fenomeni termici* – Già da tempo v'erano stati dei fisici che avevano cercato di sostenere la natura meccanica del calore, rifiutando la concezione del *calorico*. Questo era inteso come un fluido indistruttibile trasmesso da un corpo all'altro, analogamente a come

⁴ H. Helmholtz, "Sull'azione reciproca delle forze naturali e sulle più recenti determinazioni della fisica che ad essa si riferiscono" (1854), in Id., *Opere*, a cura di V. Cappelletti, UTET, Torino 1967, p. 231.

avviene per i fluidi, e sembrava spiegare abbastanza bene i fenomeni termici allora conosciuti. La teoria del calorico – a suo tempo proposta tra gli altri da A. L. Lavoisier (1743-1794) e C.L. Berthollet (1755-1794) – aveva subito dei duri colpi in seguito alle scoperte effettuate nei primi anni quaranta da J.R. Mayer (1814-1878) e J.P. Joule (1814-1878). Nei loro lavori si era dimostrato che il calore è prodotto da una certa quantità di lavoro meccanico, arrivando Joule a stabilire nel 1843, con un ingegnoso esperimento, l'esistenza di una proporzionalità diretta tra quantità di calore prodotto e lavoro eseguito. Si affermava pertanto l'idea che il calore non è un fluido indistruttibile ma una particolare forma di energia che può essere trasformata in energia elettrica o meccanica (con ciò introducendo l'idea di quel principio della conservazione dell'energia, o primo principio della termodinamica, che, come abbiamo visto prima, venne pienamente formulato da Helmholtz). Tuttavia lo sviluppo della termodinamica, mettendo da parte il problema di elaborare un modello meccanico del calore, si era sviluppata su di una base fenomenologica a partire da grandezze macroscopiche (come pressione, volume e temperatura). È evidente in tale approccio l'influenza della teoria analitica del calore elaborata da Fourier. Non erano però mancati i tentativi di interpretare la natura dei gas come costituita da molecole in rapido movimento; su questa base Daniel Bernoulli aveva cercato di spiegare già nel 1738 la pressione esercitata da un gas sulle pareti di un contenitore come l'effetto dell'urto su di esse delle molecole che lo costituivano. Successivamente passi in avanti in questa direzione erano stati compiuti da J. Herapath (1790-1868) e J.J. Waterston (1811-1883), senza tuttavia esercitare un grande impatto sulla comunità scientifica dell'epoca. L'interpretazione cinetica della costituzione dei gas venne in seguito ripresa da Joule e A.K. Krönig (1822-1879), il quale, benché non abbia detto nulla di nuovo rispetto a quanto sostenuto dai suoi predecessori, ebbe tuttavia grande risonanza grazie al suo prestigio di scienziato. L'articolo in cui riproponeva la teoria cinetica ebbe una influenza decisiva su Clausius, che si decise a pubblicare le sue riflessioni in merito già effettuate in connessione alla teoria del calore e nelle quali stabilisce una importante espressione matematica che lega insieme pressione, volume e moti molecolari.

2.2.9. Maxwell e la formulazione della teoria cinetica dei gas – È stato il grande fisico inglese James Clark Maxwell (1831-1879) a formulare, a partire dal 1860, una convincente teoria cinetica dei gas, stimolato dalla lettura dell'articolo di Clausius in cui questi esponeva le sue concezioni. In essa il comportamento delle molecole veniva trattato in modo probabilistico, **allo scopo di** calcolare sia il percorso medio da ciascuna effettuato nel suo moto casuale prima di collidere con un'altra particella, sia la distribuzione statistica della loro velocità, che viene compresa entro certi valori, con un addensamento intorno a quelli medi (secondo la nota curva a campana di Gauss).

Maxwell rappresenta le molecole mediante un'analogia: **le paragona** a sfere di piccolissime dimensioni, dure e perfettamente elastiche, che si muovono caoticamente all'interno di un recipiente, sicché possono occupare indifferentemente qualsiasi posizione; tutte le direzioni e le posizioni da esse tenute sono pertanto *equiprobabili*. Considerando che le molecole hanno massa e velocità media – e quindi una certa energia cinetica – nel loro movimento caotico un certo numero di esse finisce per urtare contro le pareti del recipiente, trasmettendo loro parte della propria energia e quindi esercitando una certa spinta. Se si considera che questo avviene per milioni e milioni di molecole che compongono il gas, sarà facile immaginare come l'energia così trasmessa alle pareti non sia altro che la *pressione*, cioè una delle grandezze macroscopiche fondamentali della termodinamica.

Questo ragionamento, che qui abbiamo svolto in maniera informale ed intuitiva, viene rigorosamente condotto da Maxwell con considerazioni matematiche e probabilistiche che gli permettono di derivare in modo stringente una grandezza macroscopica (la *pressione*) dal comportamento di grandezze microscopiche (le molecole), **le quali** ubbidiscono solo alle leggi classiche della dinamica newtoniana. **Così**, con l'aiuto di un semplice modello meccanico e di alcune ipotesi statistiche, Maxwell compiva un grande passo per gettare un ponte tra i fenomeni appartenenti al mondo macroscopico e quelli del mondo microscopico: il meccanicismo e l'idea laplaciana del reale sembrava risorgere a nuova vita.

Maxwell riusciva **in tal modo** a spiegare importanti proprietà osservabili dei gas e a proporre la teoria cinetica come una prospettiva teorica assai promettente per **intendere** i fenomeni naturali, utilizzando il calcolo delle probabilità già adoperato da Laplace, e per sostenere una visione atomistica della materia. Inoltre **essa** è in grado di fornire una interpretazione della termodinamica che permette di superare il contrasto tra il primo e il secondo principio. Infatti «se si considera l'energia, che si conserva secondo il primo principio, come la somma delle energie delle singole molecole del corpo, allora il secondo

principio non nega affatto, con la dissipazione dell'energia, che l'energia, cioè la capacità di compiere lavoro, delle singole molecole diminuisca. Tale principio afferma soltanto che essa non è più utilizzabile per l'uomo, ad esempio quando si ha un livellamento di temperatura fra i corpi, cioè si ha una distribuzione più uniforme della velocità delle molecole in essi». ⁵ Insomma l'energia non si annulla, non scompare, ma solo si distribuisce in modo da risultare inutilizzabile, cioè da non essere più in grado di produrre lavoro (che, abbiamo visto, può essere ottenuto solo se si hanno sistemi fisici a diversa temperatura).

Analogamente, diventa possibile spiegare con la teoria cinetica dei gas il contrasto tra la reversibilità che caratterizza i processi meccanici e l'irreversibilità dei fenomeni termodinamici, espressa dall'aumento dell'entropia **che si rileva con il fatto che** il calore si sposta spontaneamente dal corpo più caldo a quello più freddo. Anche in questo caso, spiegando il calore come effetto macroscopico del moto più o meno vorticoso delle molecole che compongono il gas, Maxwell sostiene che «la irreversibilità riguarda il fenomeno nel suo complesso, ma che, da un punto di vista molecolare sarebbe possibile, per quanto estremamente improbabile, una reversibilità della conduzione del calore». ⁶

Per chiarire questo punto egli introdusse il famoso esempio del diavoletto. Immaginiamo un sistema chiuso, ad es. un recipiente, in cui temperatura e pressione sono le stesse e che non cambia di volume. In questo caso sappiamo che non è possibile alcun tipo di lavoro e inoltre – per il secondo principio della termodinamica – non è possibile che parte del calore si trasferisca spontaneamente in una metà del recipiente, lasciando l'altra metà più fredda. Ma, afferma Maxwell, «se noi concepiamo un essere le cui facoltà sono così raffinate che egli può seguire ogni molecola nel suo corso, un tale essere i cui attributi sono essenzialmente finiti come i nostri, sarebbe in grado di compiere ciò che ci è attualmente impossibile. Si è visto infatti che le molecole in un recipiente pieno d'aria a temperatura uniforme, non si muovono affatto con velocità uniforme, sebbene la velocità media di un gran numero di esse, scelte arbitrariamente, è quasi esattamente uniforme. Si supponga ora che il recipiente in questione sia diviso in due parti, *A* e *B*, mediante un divisorio in cui vi sia un piccolo foro e che il nostro essere, che può vedere le singole molecole, apra e chiuda il foro, in modo da lasciar passare soltanto le molecole più veloci da *A* a *B* e soltanto le più lente da *B* a *A*. Egli in tal modo, senza dispendio di lavoro, aumenterà la temperatura di *B* ed abbasserà la temperatura di *A*, in contrasto con la seconda legge della termodinamica». ⁷

Questo esempio immaginario serve solo per sottolineare che in effetti sarebbe possibile invertire il processo di degrado entropico e quindi far sì che un sistema ad alta entropia si trasformi in uno a bassa entropia – così rendendo di nuovo disponibile energia utilizzabile – violando il secondo principio della termodinamica. Ma ciò è possibile solo ipotizzando un diavoletto che sia in grado di agire senza sprecare alcuna energia (neanche quella necessaria per muoversi o aprire la parete divisoria od osservare le singole molecole), altrimenti il bilancio energetico diventerebbe di nuovo negativo e l'entropia aumenterebbe. Ma tale assunzione ha carattere meramente ipotetico e serve solo a mettere in luce il fatto che il secondo principio della termodinamica è il risultato a livello macroscopico di un comportamento statistico medio delle molecole che compongono il gas e che ubbidiscono alle normali leggi della meccanica, per cui esse tendono a distribuirsi uniformemente nella scatola eliminando ogni differenziale termico, indispensabile per ottenere lavoro; come dice Maxwell la funzione di tale "diavoletto" è quella di «mostrare che la seconda legge della termodinamica ha solo una certezza statistica». ⁸

2.2.10. Boltzmann: l'entropia come evoluzione verso il disordine – La strada intrapresa da Maxwell fu in seguito perfezionata e studiata a fondo da un altro grande scienziato austriaco, Ludwig Boltzmann (1844-1906), il fondatore con J.W. Gibbs (1839-1903) della meccanica statistica. Egli approfondì il significato della distribuzione probabilistica delle molecole che

⁵ L. Geymonat, *Storia del pensiero filosofico e scientifico*, vol. V, *Dall'Ottocento al Novecento*, Garzanti, Milano 1971, p. 217.

⁶ *Ibidem*.

⁷ J.C. Maxwell, cit. in L. Geymonat, *op. cit.*, p. 218.

⁸ J.C. Maxwell, cit. in G. Peruzzi, *Maxwell. Dai campi elettromagnetici ai costituenti ultimi della materia*, Le Scienze, Milano 1998, p. 92.

compongono un gas e interpretò l'entropia come lo stato macroscopico più probabile verso il quale evolve il sistema. A sua volta, anche su suggerimento di Helmholtz e sviluppando alcune implicite conseguenze già contenute in Maxwell, stabiliva una *stretta connessione tra probabilità e disordine*, nel senso che la condizione di maggiore probabilità veniva ad essere identificata con lo stato di maggior disordine del sistema: l'aumento dell'entropia poteva essere considerato come *l'evoluzione dall'ordine al disordine*.

Di solito per illustrare tale caratteristica dell'entropia si riporta nei manuali di fisica il seguente esempio: si consideri un contenitore a pareti isolanti (come ad esempio un thermos) contenente del gas, che perciò non ha alcun tipo di interazione con l'ambiente esterno al contenitore (il sistema fisico è "isolato") e sia questo gas separato all'interno per mezzo di una parete che lo divida in due porzioni, una più calda e l'altra più fredda. Possiamo dire che questo gas ha una determinata misura di "ordine", in quanto possiamo predire che una molecola più veloce si troverà più probabilmente nel lato caldo piuttosto che nel lato freddo e viceversa (come accade ad es. in un'urna nella quale si abbiano in una metà le palline bianche e nell'altra le palline nere: in questo caso il sistema sarà ordinato).

È importante notare come l'ordine del sistema fisico sia in tal modo definito in base al concetto di probabilità. Per capire ciò facciamo un semplice esempio. Se prendiamo un mazzo di carte e lo mescoliamo, sarà assai improbabile che tutti i semi si dispongano in modo crescente, dall'uno al dieci ordinatamente per ciascun seme (ad es., cuori, quadri, fiori e picche). Potremmo calcolare la probabilità che ciò avvenga e vedremo che essa è bassissima. Per cui partendo da un mazzo di carte con i semi tutti ordinati, i successivi rimescolamenti faranno sì che essi diventino sempre più uniformemente distribuiti (ecco perché quando si gioca a carte si vuole che vengano mescolate a lungo). Sarà ben difficile che alla decima o centesima mescolata accada di ottenere le carte di nuovo ben ordinate. E in questo caso abbiamo solo 56 carte. Tale effetto è enormemente più evidente quando abbiamo a che fare con miliardi di molecole che si mescolano.⁹ Pertanto diremo che la situazione di disordine e massima entropia (le carte uniformemente distribuite) è più probabile di quella caratterizzata dall'ordine e dalla minima entropia (la carte ordinate per semi e grandezza). *Il sistema-carte evolve - grazie ai successivi rimescolamenti - dall'ordine al disordine.*

Ritorniamo ora all'esempio del nostro contenitore. Eliminiamone la parete interna: dopo un certo periodo il sistema evolverà verso una situazione di equilibrio, in quanto il gas si diffonderà uniformemente per il contenitore e si perverrà ad una temperatura uniforme in tutto il contenitore: ora il sistema è più "disordinato", in quanto le molecole di gas, qualunque sia la loro velocità, si sono uniformemente mescolate in modo casuale in tutto il recipiente. Si badi che l'energia totale è rimasta quella di prima, in quanto il sistema è isolato e non si può avere dispersione verso l'esterno: è cambiata solo la disposizione di essa per il diverso disporsi delle molecole di diversa velocità. Tuttavia, ciò è fondamentale perché in questo modo non è possibile generare all'interno del sistema alcun lavoro, cioè trasformazione di energia, in quanto esso può avvenire solo in presenza di diversi livelli termici. Viceversa, ogni lavoro utile, che presuppone la trasformazione dell'energia, necessariamente produce entropia o, altrimenti detto, aumenta il disordine complessivo del sistema. Affinché si possa ancora produrre lavoro (ad es. per ridare "ordine" alle molecole del nostro gas) è necessario mettere in contatto il nostro sistema (nel nostro caso il contenitore) con un altro sistema che possa assorbire l'entropia in eccesso e quindi fornire

⁹ Il che significa che quante più componenti ha un sistema tanto più è probabile la sua evoluzione verso stati entropici elevati; quanto meno ne ha, tanto più è facile che nella sua evoluzione possa riguadagnare stati a bassa entropia. Se il mazzo di carte lo limitiamo a un solo seme, è assai più probabile ottenere in successivi rimescolamenti le dieci carte ordinate in modo crescente; e ancora più probabile se le carte sono cinque o solo due (in quest'ultimo caso abbiamo il 50% di probabilità che le due carte siano in ordine progressivo). Ma ciò è proprio quanto *non* accade nei sistemi complessi, in cui sono coinvolte innumerevoli componenti (come i miliardi di molecole di una porzione anche limitata di gas, o i miliardi di organismi, cellule e parti varie che compongono il corpo umano): in questo caso le configurazioni ordinate sono assai più improbabili di quelle ordinate, per cui tali sistemi complessi evolvono verso un'entropia sempre più elevata. È più facile mantenere l'ordine in una classe di 10 studenti che in una di 100; e una classe di 100 studenti se abbandonata a se stessa - senza l'intervento dell'insegnante - tenderà gradualmente a diventare sempre più disordinata: i ragazzi si muovono, vanno da un luogo all'altro, si mescolano maschi e femmine e così via.

l'ordine mancante: cioè un sistema dal quale il nostro gas possa trarre *negaentropia* (o "entropia negativa") (ad es., che il nostro contenitore venga messo in contatto con l'ambiente esterno, sostituendo le pareti isolanti con pareti che conducano il calore, e quindi non sia più isolato, e dal quale attraverso un opportuno meccanismo possa trarre negaentropia). Un esempio di una macchina del genere è fornito dal frigorifero domestico che trae dall'esterno – energia elettrica + ambiente circostante – la negaentropia, che gli permette di mantenere una temperatura interna costantemente bassa, espellendo entropia sotto forma di calore verso l'esterno.

Ciò sta a dimostrare un fatto: l'entropia può essere diminuita solo mediante dispendio di energia e quindi a scapito di entropia creata altrove. Possiamo mantenere il nostro appartamento confortevolmente fresco con la climatizzazione, ma solo riversando al suo esterno il calore in esso contenuto, cioè facendo aumentare l'entropia nell'ambiente. Insomma, *si contrasta l'aumento di entropia in un sistema fisico solo aumentando l'entropia globale dell'ambiente che lo circonda*. L'entropia complessiva tende ad aumentare; la sua diminuzione può essere solo locale, al prezzo di consumo di energia, che si deve ricavare dall'ambiente esterno al sistema fisico considerato.

Diventa ancora più evidente in tal modo la natura non assoluta, ma semplicemente probabilistica, della seconda legge della termodinamica: nulla *in linea di principio* può escludere che il processo che porta al "mescolamento" delle molecole calde e fredde – e quindi ad uno stato di maggior disordine – non possa essere invertito (ad es. grazie al demone di Maxwell). In fin dei conti, trattandosi di eventi probabili, anche il processo inverso che porta "ordine" al sistema è possibile, nonostante la probabilità che esso accada sia bassissima; ma aspettando un tempo *infinitamente* lungo potrà benissimo capitare che le molecole calde (ovvero con più energia cinetica), nel loro movimento casuale, si dirigano tutte in una direzione, occupando una metà del recipiente e così ricreando la condizione di partenza: una parte più calda ed una più fredda.

È importante notare che la ridefinizione del concetto di entropia come un indicatore della quantità di disordine di un sistema fisico lo rende indipendente dai fenomeni termici, per farlo diventare un principio generale in grado di spiegare l'ordine e il disordine della natura, ovvero il suo livello di organizzazione. Così come nell'esempio fatto prima delle carte da gioco (in cui non sono implicati fenomeni di trasmissione del calore), il concetto di entropia diventa una legge generale dell'universo che ne governa il divenire nel tempo e ne misura lo stato energetico (del quale il calore è solo una delle manifestazioni), in grado di spiegarci l'evoluzione di ogni fenomeno, dalla nascita e organizzazione della vita¹⁰ all'equilibrio ecologico del sistema terra; dal funzionamento dell'economia alla evoluzione della società.¹¹ Ed appunto in tal senso è stato da alcuni utilizzato, facendone un principio di comprensione complessiva della realtà, che si contrappone al paradigma meccanicistico e che – una volta se ne prenda piena consapevolezza – potrà dare origine a una nuova "visione del mondo" in grado di farci uscire dalla crisi energetica ed ecologica addebitata al meccanicismo e all'utilizzazione indiscriminata della natura.¹²

¹⁰ Non a caso l'etologo e fondatore dell'epistemologia evoluzionista Konrad Lorenz (v. §§ 731-738) considera i sistemi viventi come "divoratori" di entropia negativa, in quanto solo così possono evolvere dal semplice al complesso, in sistemi sempre più ordinati. Cfr. Lorenz, *L'altra faccia dello specchio. Per una storia naturale della conoscenza* (1973), Adelphi, Milano 1991 (1^a ed. 1974), pp. 47-8. Tale circostanza è stata anche sottolineata dal fisico Erwin Schrödinger (che sarà, come vedremo, uno dei protagonisti della meccanica quantistica; v. §§ 251-2524), che appunto lega l'organizzazione e la vita degli organismi viventi alla loro capacità di trarre dall'ambiente entropia negativa (cfr. Schrödinger, *Che cos'è la vita? Scienza e umanesimo*, Sansoni, Firenze 1988).

¹¹ Come ha sostenuto Jeremy Rifkin, «a ben guardare lo sviluppo sociale è in sostanza un tentativo di creare sacche di ordine che permettano di dare continuità alla sopravvivenza dell'essere umano. Come tutte le creature viventi, anche noi esseri umani sopravviviamo grazie alla capacità di mantenere un flusso costante di energia e la nostra cultura serve da strumento per ricavare questa energia dall'ambiente. Il primo e il secondo principio della termodinamica diventano così i supremi principi operativi a cui devono sottostare tutte le culture e le civiltà, così come avviene per tutto il resto dell'universo» (*Entropia*, Baldini & Castoldi, Milano 2000², p. 110).

¹² Cfr. di Rifkin, oltre all'opera già citata, anche *Economia all'idrogeno* (2002), Oscar Mondadori, Cles (TN) 2003² e soprattutto F. Capra (*Il punto di svolta. Scienza, società e cultura emergente* [1982], Feltrinelli, Milano 1990²), che insiste sulla necessità di un "mutamento di paradigma" complessivo nel modo stesso di concepire la conoscenza, che porti dalla visione di un universo come sistema meccanico ad una visione della realtà intesa in senso olistico e sistematicamente interconnesso. Tale approccio è stato poi ulteriormente sviluppato da Capra in relazione alla

2.2.11. *Discontinuità tra conoscenza del macroscopico e del microscopico* – Su queste basi si è sviluppata la meccanica statistica tra il 1860 e il 1880. Essa non solo costituiva una risposta da un punto di vista “classico” alle sfide poste dalla termodinamica, ma introduceva nel modo di considerare la conoscenza della natura una discontinuità tra la conoscenza sensibile dei suoi stati macroscopici e la conoscenza concettuale di quelli microscopici: uno stato di quiete empiricamente constatabile, ad es., veniva ad essere il risultato di un moto vorticoso di miliardi di particelle, il cui comportamento non poteva essere direttamente osservato, ma solo ipotizzato grazie all'utilizzo di sofisticate tecniche matematiche e probabilistiche. «Ciò significava ammettere che una particella costituente un corpo può avere proprietà meccaniche molto differenti dal corpo a cui essa appartiene. L'uniformità apparente di un corpo perciò non è più la pura somma di uniformità infinitesime delle sue particelle ma la compensazione o la media di difformità reali».¹³

Inoltre la trattazione statistica dei processi fisici segna un'importante svolta nella fisica ottocentesca in quanto segna il passaggio dalla interpretazione causale deterministica, propria delle leggi della meccanica, a una interpretazione di tipo probabilistico che contribuisce a mettere sempre più in luce i nessi tra il determinismo e la predicibilità, nonché il ruolo delle nozioni di causalità e caso nei processi fisici, con ciò preparando il terreno ad importanti sviluppi della fisica del Novecento.¹⁴ Come afferma L. Geymonat, «ciò che più interessa, dal punto di vista metodologico, è che – con i lavori di Maxwell e Boltzmann – il calcolo delle probabilità entra a far parte, come uno dei suoi componenti essenziali, dell'apparato matematico in uso nella fisica. Il ricorso a questo tipo di calcolo non comportava di per sé – è bene notarlo in modo esplicito – una totale rinuncia al vecchio determinismo laplaciano, potendosi sempre pensare che il moto di ogni singola molecola risulti “in realtà” determinato secondo le leggi della meccanica classica, e che l'uso di metodi statistici sia *per noi* necessario solo per l'impossibilità pratica in cui ci troviamo di seguire i singoli percorsi. Si avrebbe cioè un divario tra ciò che accade nel mondo “oggettivo” e ciò che siamo in grado di descrivere di esso».¹⁵

La menzionata dicotomia tra ipotesi teoriche concernenti il microscopico ed osservazione empirica del macroscopico portò molti fisici, attaccati ad una concezione strettamente empirista della scienza, a respingere la teoria cinetica e la meccanica statistica. Ciò fece sì che negli ultimi due decenni dell'Ottocento e nei primi anni del Novecento i risultati raggiunti in questi due campi siano stati per lo più ignorati e rifiutati dagli ambienti scientifici più influenti, che vedevano nell'atomismo più che un'ipotesi empiricamente fondata, una tesi speculativa, motivata da una visione materialistica della natura. Vana fu la lotta ingaggiata da Boltzmann per difendere la teoria cinetica e per sostenere un'idea della conoscenza scientifica che non si fermasse a cogliere solo gli aspetti fenomenici del reale, limitandosi a sistematizzarli mediante la loro trascrizione matematica. In nome di una concezione realistica della conoscenza, Boltzmann era infatti convinto della necessità di penetrare oltre l'apparenza fenomenica, servendosi di audaci ipotesi in grado di stabilire connessioni tra le componenti più intime della materia, allo scopo di spiegare quanto ci viene mostrato dall'esperienza. Era pertanto importante per lui penetrare teoreticamente i meccanismi profondi che spiegano i fenomeni della termodinamica, consentendo di inquadrarli in una visione unitaria della natura, nello spirito di Laplace, senza fermarsi alla sola considerazione delle grandezze macroscopiche. Il sostanziale fallimento di questa sua battaglia e l'incomprensione dei contemporanei per la sua meccanica statistica non furono certo irrilevanti sulla sua decisione di suicidarsi.

Altre erano infatti le direzioni verso le quali si muoveva la scienza di fine secolo: fisici come J.B. Stallo (1823-1900), G. R. Kirchoff (1824-87), P. Duhem (1861-1916) ed E. Mach

scienza della vita e dei sistemi viventi: cfr. Id., *La rete della vita* (1996), Rizzoli, Milano 1997 e *La scienza della vita*, Rizzoli, Milano 2002. Si noti che l'idea di “mutamento di paradigma” non fa che riprendere le concezioni e la terminologia introdotta da Thomas Kuhn, della cui influenza nella crisi della filosofia della scienza standard parleremo in seguito (v. §§ 631-636).

¹³ L. Geymonat, *op. cit.*, p. 221.

¹⁴ Cfr. G. Peruzzi, *op. cit.*, p. 86.

¹⁵ L. Geymonat, *op. cit.*, p. 169.

(1838-1916), che tanta influenza avrà sul futuro Circolo di Vienna (v. § 143), erano orientati verso una critica del meccanicismo e dell'atomismo, cui contrapponevano una visione della fisica che fosse aderente all'evidenza empirica e quindi non facesse ipotesi su entità non osservabili (come gli atomi), ma consistesse solo nella trattazione matematica di regolarità empiriche. Non solo, ma sembrava che gli sviluppi della termodinamica, specie in campo chimico, dessero la possibilità di concepire questa scienza – assunta nella sua interpretazione fenomenologica – come un possibile sostituto della meccanica, scalzandone il primato secolare. Tale impostazione venne sviluppata in particolare dalla cosiddetta fisica *energetica*, che assumeva quale suo concetto di base quello di energia. Proposta da William Rankine (1820-72) e quindi dal fisico tedesco Georg Helm (1851-1923) – che riprendevano le intuizioni di Robert Mayer – essa rifiutava la riduzione dell'energia all'azione di masse corpuscolari; l'energia veniva piuttosto concepita come qualcosa di originario e primitivo, capace di assumere in natura varie forme di manifestazione. Il suo più deciso sostenitore fu il chimico-fisico tedesco Wilhelm Ostwald (1853-1932), che interpretava l'energia come il substrato di tutti i fenomeni, cercando di edificare sulla sua base una vera e propria filosofia monistica.