

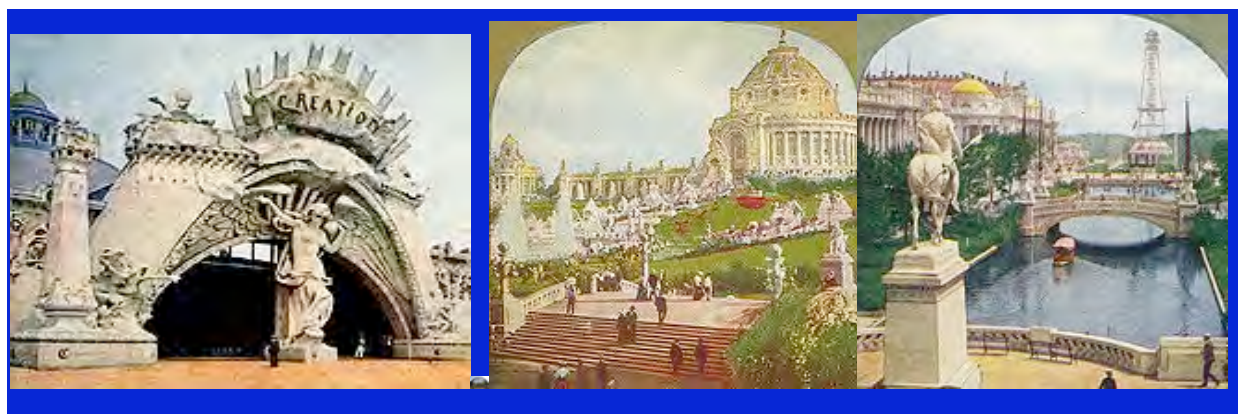
FRANÇOISE BALIBAR

EINSTEIN 1905

DALL'ETERE AI QUANTI

A CURA DI LUISA BONOLIS

EDIZIONI KAMI 2005



1904, UN ANNO PRIMA DI EINSTEIN

**L'Esposizione universale di Saint-Louis
e il Congresso di Scienze e Arti**

Luisa Bonolis

Introduzione

Un secolo di progresso scientifico e tecnologico viene messo in mostra nel corso dell'Esposizione Universale del 1904 a Saint-Louis, capitale del Missouri, in occasione del centenario della liberazione della Louisiana dalla Francia. Nel mese di settembre l'Esposizione culmina con il Congresso di Arti e Scienze. L'idea di un congresso scientifico associato a una grande esposizione non era nuova; conferenze e convegni avevano avuto luogo a

Vienna nel 1873, a Filadelfia nel 1876 e a Parigi, nel 1878 e nel 1889, ma soprattutto in occasione della grande Esposizione del 1900. Tuttavia, soltanto a Saint-Louis l'esposizione e il convegno furono progettati fin dall'inizio come due eventi strettamente correlati: la prima doveva mostrare i prodotti tangibili della mente e della mano dell'uomo mentre il congresso doveva rappresentare l'essenza culturale di tali attività, che si sarebbe espressa attraverso il tema centrale prescelto, l'"unità del sapere". Il Congresso delle Arti e delle Scienze di Saint-Louis si prefiggeva quindi lo scopo di presentare una visione unificata dei progressi intellettuali dell'umanità attraverso i temi più vari: la storia politica, l'economia, il diritto, le lingue, le arti, la musica, la religione, la metafisica, la medicina, la filosofia, la tecnologia, le scienze matematiche, fisiche e biologiche.

Il congresso aveva luogo in un momento di grande fermento sperimentale, teorico e ideologico per la fisica, una disciplina che nel corso del secolo appena concluso aveva vissuto un periodo di gigantesco sviluppo legato a innovazioni concettuali come la conservazione dell'energia, il concetto di campo, la teoria della luce come vibrazioni di un "etere elettromagnetico", il concetto di entropia come espressione del carattere direzionale dei processi fisici. Henri Poincaré, a quell'epoca scienziato di fama mondiale e membro di innumerevoli accademie, aveva iniziato il suo discorso sui "Principi della fisica matematica" con una serie di interrogativi: "Qual è lo stato attuale della fisica matematica? Quali sono i problemi che è costretta a porsi? Qual è il suo futuro? I suoi orientamenti sono sul punto di modificarsi? Gli scopi e i metodi di questa scienza tra dieci anni appariranno ai nostri immediati successori nella stessa luce o, al contrario, stiamo per essere testimoni di una profonda trasformazione?".

"Pur essendo tentati di rischiare un pronostico, dobbiamo resistere a questa tentazione - osservava Poincaré -, basti soltanto pensare alle stupidaggini che i più eminenti scienziati di cento anni fa sarebbero stati pronti a proferire se qualcuno avesse chiesto loro quale sarebbe stata la scienza del XIX secolo".

Dopo aver ricordato che la fisica matematica era nata alla fine del Settecento con la meccanica celeste, Poincaré aveva osservato che per molto tempo la "forma ideale di legge fisica" era stata la legge di Newton che, in quanto "relazione costante tra i fenomeni di oggi e quelli di domani", ha la forma di una equazione differenziale. Differenziale nel

senso che procede per piccole differenze che fanno dipendere il valore assunto da una certa grandezza fisica in un punto, dal valore che essa assume in un punto dello spazio immediatamente vicino, o in punti immediatamente vicini. La posizione di un corpo in movimento, per esempio, dipende stante per istante soltanto dai punti immediatamente precedenti lungo la traiettoria e non da quelli esterni ad essa. Regina incontestata dell'“universo astronomico”, la legge di Newton sembrava applicabile anche a livello microscopico, dove i corpuscoli costituenti la materia si attraggono o si respingono secondo una legge dipendente soltanto dalla distanza e agente lungo una linea retta, analoga a quella che Newton aveva trovato per i corpi celesti. Tuttavia, sottolineava Poincaré, era arrivato il momento in cui la “concezione di forza centrale non appariva più sufficiente” e questa era soltanto “la prima delle crisi” che lo scienziato dell'epoca era stato chiamato a fronteggiare: “Allora gli investigatori rinunciarono a penetrare nei dettagli della struttura dell'universo, ad isolare i pezzi di questo gigantesco meccanismo, ad analizzare una per una le forze che li mettono in movimento e si accontentarono di assumere come guida certi principi generali che hanno come oggetto proprio lo scopo di evitare questo studio dettagliato”. La fisica newtoniana aveva dovuto cedere il passo alla “fisica dei principi”. Il principio di conservazione dell'energia, per esempio, enunciava solennemente Poincaré, aveva appunto la funzione di trarre delle conclusioni che riguardano l'universo e in particolare le sue parti più nascoste. “Osservando i movimenti di quelle che possiamo vedere, con l'aiuto di questo principio, siamo in grado di trarre conclusioni che rimangono vere indipendentemente dai dettagli del meccanismo invisibile che le anima”.

La legge di conservazione dell'energia

Lo studio della relazione tra calore e lavoro meccanico era stato di importanza centrale nella fisica del XIX secolo. L'impossibilità pratica di realizzare una macchina in grado di creare energia dal nulla, il cosiddetto *moto perpetuo di prima specie*, aveva contribuito in modo importante all'affermazione della prima legge della termodinamica, che è l'estensione ai fenomeni termici del principio di conservazione dell'energia. Sebbene a quell'epoca fosse ancora in auge la teoria del calorico, uno tra i vari “fluidi imponderabili” caratteristici della scienza tra Settecento e Ottocento, si era fatta strada la concezione del calore come forma di energia in termini

di movimenti a livello molecolare. La dimostrazione dell'equivalenza tra calore e lavoro meccanico da parte di James Joule e la formulazione matematica della legge di conservazione dell'energia da parte di Hermann von Helmholtz, entrambi avvenute negli anni '40 dell'Ottocento, avevano costituito la base per l'unificazione dei processi meccanici e termici.

Il primo principio della termodinamica, nel mettere in relazione calore, energia e lavoro utile nel corso dei processi termici, li esprimeva attraverso la prescrizione che la variazione di energia interna di un sistema termodinamico chiuso può verificarsi solo per apporto o sottrazione di energia dall'esterno, sotto forma di calore o di lavoro, o di entrambi. Ma oltre a stabilire il principio di equivalenza tra calore e lavoro meccanico, la scienza della termodinamica era interessata a quale fosse la direzione del flusso di calore nel corso della produzione di tale lavoro. La seconda legge, che in realtà era stata scoperta per prima da Sadi Carnot, scaturì dalla constatazione sperimentale che è impossibile trasformare in lavoro utilizzabile il calore estratto dai corpi senza alcuna limitazione. Un enunciato equivalente di questa seconda legge afferma che la trasformazione di energia meccanica in calore non è reversibile, allo stesso modo il calore non è in grado di passare in modo naturale da un corpo "freddo" a uno a temperatura più elevata.

La prima legge della termodinamica poteva essere compresa in termini di moti e collisioni di particelle microscopiche, cosa che non si riusciva a fare nel caso della seconda legge, in base alla quale il flusso di calore nei processi naturali, come nel caso di un cubetto di ghiaccio che si scioglie, è sempre irreversibile: il calore non fluisce mai nella direzione opposta in modo naturale, così che il cubetto disciolto non tornerà a congelarsi spontaneamente e una goccia di vino in un bicchiere d'acqua si diffonderà più o meno lentamente attorno al punto iniziale, sino a che l'interno del bicchiere non sarà diventato di un rosa tenue e uniforme. Come era dunque possibile rendere conto di un tale comportamento attraverso la spiegazione meccanica? Nonostante ciò la formulazione delle due leggi fondamentali della termodinamica, nel fornire il quadro teorico relativo alla dinamica dei flussi di calore, costituiva un ponte tra processi meccanici e non meccanici, due aspetti della realtà fino a quel momento ritenuti disgiunti. La legge di conservazione dell'energia, elevata al rango di principio, aveva fornito a sua volta un nuovo potente quadro concettuale per la costruzione delle teorie fisiche basate sulla visione meccanica della natura. Sembrava proprio che la fisica, accanto alle leggi

generali della dinamica e alla loro applicazione alle interazioni nell'ambito dei corpi solidi, liquidi e gassosi, potesse quindi occuparsi di quegli agenti che erano stati sempre designati come imponderabili – luce, calore, elettricità e magnetismo, etc. – trattandoli come forme di moto, come manifestazioni della stessa energia fondamentale.

I due principi della termodinamica erano consistenti fra loro: sebbene l'energia fosse dissipata nel corso dei processi irreversibili, non veniva distrutta, ma semplicemente trasformata in altre forme di energia. La chiarificazione della natura dei processi irreversibili venne soprattutto dall'introduzione del concetto di entropia. Ogni processo naturale si svolge necessariamente nella direzione che comporta un aumento di entropia dei corpi (sistema fisico e sorgenti di calore) che hanno preso parte alla trasformazione. Qualsiasi trasformazione naturale crea entropia nell'universo e quest'ultima a sua volta fornisce una misura della direzione dei processi termodinamici, del grado di irreversibilità di una trasformazione. In questo senso la seconda legge sollevava problemi inquietanti. L'energia si conservava, ma allo stesso tempo veniva dissipata progressivamente e irreversibilmente. Quando un sistema isolato ha raggiunto il valore massimo dell'entropia compatibile con la sua energia, esso non è più capace di evolvere ulteriormente. Anche il calore della terra doveva dissiparsi allo stesso modo, condannando il pianeta a trasformarsi in un luogo gelido e inospitale per la specie umana. A quell'epoca non era stato preso in considerazione il calore generato dalla radioattività naturale, di cui non si conosceva ancora l'esistenza, e l'età della terra era stata valutata intorno ai cento milioni di anni, considerando il tempo necessario perché questa si raffreddasse, passando dallo stato fuso alla temperatura attuale.

In ogni caso le conseguenze del primo principio si traducevano nel trasformare tutta l'energia in calore e quindi in una completa cessazione dei processi naturali: l'universo stesso sembrava condannato alla "morte termica", incapace di cambiamenti e paralizzato nello stato di massima entropia. Alcuni fisici formulavano teorie alternative, che davano vita a un universo parallelo, eterno, immutabile e invisibile in cui l'energia dissipata nel nostro universo transitorio potesse rifluire nuovamente utilizzando come supporto un etere onnipresente, anch'esso invisibile. In queste idee sembravano riaffacciarsi le antiche concezioni che vedevano l'universo suddiviso in "sfere" in alcune delle quali tutto era perfetto e

immutabile, come in quella delle stelle fisse, mentre in altre, come nella zona "sublunare", tutto era imperfetto, corruttibile, transitorio.

A maggior ragione appariva dunque necessario ancorarsi all'energia come concetto fisico fondamentale, elevandola al rango della materia quanto a realtà e indistruttibilità. Per molti si trattava di una riformulazione e generalizzazione della dottrina della convertibilità l'uno nell'altro dei vari "poteri" o "forze" naturali, la cui indistruttibilità complessiva costituiva una struttura concettuale per l'interpretazione teorica delle scoperte sperimentali. La possibilità di utilizzare l'energia come metodo per caratterizzare il comportamento di un sistema fisico indipendentemente dalla conoscenza della sua struttura meccanica veniva visto con favore anche da James Clerk Maxwell, il quale pensava che perfino un sistema elettromagnetico potesse essere trattato in termini di energia potenziale e energia cinetica senza fare ipotesi particolari riguardo la sua struttura nascosta. Un nuovo quadro concettuale si era delineato attraverso un programma universale di spiegazione dinamica basato sullo status dell'energia intesa come costituente fondamentale della realtà fisica e sulla sua legge di conservazione come principio dinamico unificante.

Meccanicismo e energetismo

In quel periodo la maggior parte dei fisici riteneva che la fisica avesse raggiunto un livello di sviluppo tale da poter ragionevolmente sperare di pervenire ben presto a una spiegazione di tutti i fenomeni naturali. La crescente esigenza di quantificazione e di ricerca di leggi matematiche si accompagnava all'emergere di una visione unificata della disciplina e all'aspirazione che una sola teoria fondamentale dovesse essere sufficiente a rendere conto di tutti i fenomeni; tutte le altre discipline scientifiche dovendo essere dedotte da tale teoria. Il punto sul quale le opinioni divergevano fortemente riguardava la questione di scegliere quale teoria potesse aspirare al ruolo di teoria fondamentale della scienza. Due scuole principali si contendevano il primato: il meccanicismo e l'energetismo. La visione meccanicistica del mondo per un certo tempo era stata egemone nel ricondurre tutti i fenomeni naturali - e perfino quelli "soprannaturali" - alla dinamica di un mezzo etereo universale. Nel pensare che sarebbe stato possibile spiegare tutti i fenomeni in termini di particelle di materia in moto e di forze agenti tra queste, parecchi fisici avrebbero voluto attribuire agli atomi tale moto. Il meccanicismo si articolava in teorie che si rifacevano a modelli meccanici ipotetici (come

ruote e molle) utilizzati per la rappresentazione e illustrazione dei fenomeni osservati, o che addirittura evitavano qualsiasi ipotesi sulla struttura fisica del meccanismo di rappresentazione, ricorrendo al formalismo astratto della dinamica analitica di Lagrange. Queste diverse soluzioni, pur rifacendosi individualmente ai principi di una spiegazione meccanica, riflettevano le problematiche legate alla consapevolezza dell'esistenza di un profondo divario tra la teoria, intesa in termini di rappresentazioni meccaniche, e realtà fisica nelle sue diverse manifestazioni.

Se, come Newton e i suoi seguaci suggerivano, tutta la materia consiste di atomi (o molecole), che nel muoversi in tutte le direzioni si urtano a vicenda cambiando la direzione del proprio moto ad ogni collisione, deve esistere una velocità media e quindi una energia cinetica media delle particelle contenute in un gas, aggregati di un enorme numero di particelle. Secondo la teoria cinetica il calore stesso non sarebbe altro che l'energia del moto, o energia cinetica, degli atomi. Una maggior quantità di calore significa una maggior energia cinetica media, che a sua volta è una misura della temperatura del gas o del liquido. Ma anche gli atomi, come accade per le palle da biliardo, devono interagire a livello microscopico seguendo le leggi della meccanica newtoniana. Queste interazioni sono reversibili: la scena di una collisione tra atomi sembrerebbe perfettamente normale, cioè plausibile, se venisse osservata facendo girare la pellicola al contrario. Da dove nasce quindi l'irreversibilità di un processo come quello del ghiaccio che si scioglie, o di una sbarra di ferro che si raffredda? Questo ed altri paradossi incoraggiavano coloro che, come Ernst Mach, negavano l'esistenza stessa degli atomi. Gli energetisti, più radicali come il fisico chimico Wilhelm Ostwald, rifiutavano l'intero programma meccanicistico accusandolo di ricorrere ad ipotesi come quella degli invisibili atomi. Nel ragionare da una prospettiva più fenomenologica Ostwald mirava a fare della termodinamica il piedistallo su cui basare la spiegazione fisica, convinto che la termodinamica sarebbe stata una scienza irriducibile e che tutti i fenomeni (compresi quelli meccanici) sarebbero stati alla fine descritti non attraverso i movimenti di atomi, ma attraverso degli scambi di energia nel mondo di tutti i giorni. Secondo gli energetisti, l'ipotesi atomica poteva tutt'al più rappresentare un artificio di calcolo che consentiva di ottenere risultati interessanti, ad esempio come sistema di classificazione utile per i chimici, ma in ogni caso lontano da una descrizione reale della natura. La

stessa teoria cinetica dei gas, nel rappresentare le molecole come piccole sfere rigide, non poteva essere altro che una descrizione conveniente, da non prendere alla lettera. Oltre a sottolineare sia le difficoltà non ancora superate dall'atomismo in teoria cinetica dei gas, sia le contraddizioni esistenti fra i diversi modelli di atomo proposti all'epoca, gli energetisti opponevano quindi degli argomenti di principio alla nozione stessa di atomo e osservavano che nel basare l'intera teoria della materia su oggetti ipotetici, che nessuno era mai riuscito ad osservare, si rischiava di mettere in crisi la credibilità stessa della scienza in un'epoca in cui quest'ultima veniva presa di mira da molti filosofi, fortemente critici verso il suo carattere riduzionistico, apparentemente disumano.

Il concetto di campo

Ma nel panorama di metà Ottocento, accanto alle ormai consolidate scienze della meccanica e della termodinamica, la "fisica del continuo" trionfa nelle ricerche di Faraday e di Maxwell che culminano nella scoperta dell'interazione elettromagnetica, la seconda interazione universale dopo quella gravitazionale. La formulazione definitiva delle leggi fondamentali dell'elettrodinamica prende corpo attraverso il concetto di "campo" fisico, tramite la supposizione che le forze elettriche e magnetiche siano distribuite nello spazio attraverso la mediazione del campo stesso. Il termine "campo magnetico" era stato introdotto nel 1845 da Faraday, il quale aveva utilizzato il concetto di linee di forza per rappresentare la disposizione delle forze elettriche e magnetiche nello spazio. Queste teorie fornirono la base concettuale per la nozione di un agente di supporto del campo, l'etere elettromagnetico, o luminifero, che permeava gli spazi esistenti tra i corpi elettrificati e magnetici consentendo la trasmissione delle forze elettriche e magnetiche tra particelle. Le linee di forza di Faraday avevano "intessuto una rete attraverso il cielo", secondo la definizione dello stesso Maxwell, spazzando via ogni residuo di *fluidi* elettrici e magnetici, nonché di forze a distanza agenti tra corpi elettrificati e magnetizzati attraverso distanze finite di spazio. Le forze della gravitazione, dell'elettrostatica e del magnetismo obbediscono alle leggi di Newton e di Coulomb ed agiscono lungo la linea di congiunzione tra due corpi che si attraggono o si respingono. Ma Faraday e Ørsted avevano scoperto che ogni variazione del campo magnetico genera un campo elettrico e viceversa, in modo tale che l'improvviso fluire di una corrente elettrica in un conduttore genera nelle sue immediate vicinanze

un campo magnetico e quindi una forza in grado di agire su un ago calamitato. Nel rivelare una sorprendente relazione tra magnetismo e elettricità, questi esperimenti mettevano in evidenza un fenomeno del tutto inaspettato: la forza agente fra il polo magnetico e le piccole porzioni del conduttore non giace lungo linee congiungenti il filo e l'ago, ovvero tra le particelle del "fluido" elettrico in moto nel filo e i dipoli magnetici elementari dell'ago. La forza è *perpendicolare* a queste linee di congiunzione e non è quindi riconducibile a un punto di vista di tipo meccanicistico.

Alla metà degli anni '60 dell'Ottocento l'opera di Maxwell, che affondava le sue radici nelle ricerche di Faraday, aveva definitivamente fuso luce, elettricità e magnetismo in una sola entità fisica, il campo elettromagnetico. Maxwell aveva dato alla sua teoria del campo elettromagnetico uno statuto fisico e matematico coerente: "La teoria che propongo può essere denominata una teoria dinamica del campo elettromagnetico, poiché essa ha a che fare con lo spazio in vicinanza dei corpi elettrici o magnetici, e può essere denominata dinamica, perché presuppone che in tale spazio esista della materia in movimento che produce i fenomeni elettromagnetici osservati". Il suo *Trattato di Elettricità e Magnetismo*, pubblicato nel 1873, riuniva in un unico contesto teorico i risultati delle ricerche che lo avevano preceduto nel corso della fine del Settecento e nella prima metà dell'Ottocento. Nella sintesi di Maxwell l'energia elettrica, magnetica e radiante erano considerate tutte manifestazioni di uno stesso insieme di leggi fondamentali: le "equazioni di Maxwell".

La teoria di Maxwell aveva delle implicazioni inaspettate. Nel 1888 Heinrich Hertz aveva dimostrato che le onde elettromagnetiche possono essere prodotte e propagarsi nell'aria alla velocità della luce, possedendo quindi tutte le proprietà delle onde luminose – riflessione, rifrazione, interferenza, diffrazione, polarizzazione. La verifica sperimentale dell'esistenza di tali onde fu immediatamente interpretata come una conferma eclatante dell'esistenza del campo elettromagnetico, in opposizione alle varie versioni di teorie dell'"azione a distanza", una visione che secondo il matematico Hermann Weyl corrisponderebbe a "due mani che si afferrano al di sopra di un abisso".

La possibilità di trasmettere a breve distanza – qualche metro – dei segnali apriva la strada dello sfruttamento commerciale delle onde radio, tuttavia anche quando Guglielmo Marconi ottenne il suo primo brevetto

nel 1898, nessuno, nemmeno i più audaci profeti delle meraviglie del futuro, poteva immaginare che la radio e la televisione avrebbero avuto un ruolo enorme nella vita dell'uomo del XX secolo.

Onde e particelle, continuo e discontinuo, forze a distanza

La nozione di particella materiale aveva dominato la fisica del XVII e XVIII secolo e tuttavia, fin dall'epoca della rivoluzione scientifica, le stesse indagini sulla natura della radiazione luminosa avevano posto in evidenza l'alternativa tra ipotesi di natura "particellare" e ipotesi facenti riferimento a una propagazione di tipo ondulatorio. Newton aveva avuto una concezione sostanzialmente corpuscolare, anche se era ben consapevole che alcuni fenomeni non potevano essere spiegati agevolmente secondo questo punto di vista, mentre Huygens, contemporaneo di Newton, aveva ipotizzato che la luce è un'onda, un trasferimento cioè di energia e non di sostanza, in modo tale che "questo movimento impresso alla materia interposta sarà progressivo e pertanto si propagherà come fa il suono, per superfici sferiche e per onde; poiché le chiamo onde per la loro somiglianza con quelle che vediamo formarsi nell'acqua allorché vi si getta un sasso e la cui propagazione si effettua in cerchi successivi".

Per i primi quarant'anni del XIX secolo lo sviluppo della fisica matematica in Francia e nell'Europa continentale, si diramò secondo due scuole di pensiero rivali: quella che faceva capo a Laplace (tra cui spiccano Biot, Navier, Cauchy e soprattutto Poisson) che sosteneva una concezione corpuscolare basata su interazioni del tipo "forze a distanza", e la scuola che seguiva l'approccio dinamistico-analitico di Lagrange (Fresnel, Fourier, Ohm, Ampère). Una inversione di tendenza si era infatti prodotta in seguito a una quantità di scoperte sperimentali in base alle quali era apparso che le teorie ondulatorie risultavano essere in migliore accordo con l'esperienza. Tuttavia, secondo le affermazioni di Poisson, la "meccanica analitica" di Lagrange sarebbe stata rimpiazzata dalla "meccanica fisica" di Laplace, basata sull'ipotesi di moti e di forze molecolari, applicabile a problemi come lo studio delle corde flessibili, delle superfici elastiche e della pressione di fluidi. La rivalità tra queste due scuole aveva caratterizzato non soltanto la nascita e lo sviluppo della teoria elettromagnetica, ma aveva esteso il suo influsso anche in altri campi.

Per un certo tempo restò soprattutto molto acceso il dibattito sulla natura della luce, ma il concetto di onda, insieme alla teoria ondulatoria della

luce, finì con l'imporsi e diventare un concetto centrale in tutta la fisica del XIX secolo. Nell'attraversare diversi domini delle scienze fisiche, come il calore, l'ottica, la dinamica dei fluidi, l'astronomia, l'elettricità, la concezione ondulatoria finì col prendere il sopravvento rispetto alla concezione particellare sulla quale si fondava la fisica classica erede di Galilei e di Newton. In realtà le due descrizioni, la corpuscolare e l'ondulatoria, convivevano grazie alla loro capacità di spiegare alcuni fenomeni in modo soddisfacente. Una serie di fenomeni in cui si ha a che fare con luce e ombra possono spiegarsi ammettendo che luce si propaga in linea retta nel vuoto o nell'aria. La legge del moto rettilineo non è valida quando la luce attraverso il vetro o l'acqua, ma il fenomeno della rifrazione può essere ancora spiegato in termini di teoria meccanica ammettendo la materia agisca sui corpuscoli luminosi attraverso una forza che ne faccia variare la velocità, determinando una variazione nella direzione originaria del moto. Anche la riflessione della luce prodotta dagli specchi può essere spiegata in modo semplice dalla teoria corpuscolare per analogia con quanto si osserva nel caso delle palle da biliardo che rimbalzano su una superficie solida e piana.

Ma se la luce bianca è formata da luce di vari colori separabili per mezzo di un prisma, come già aveva osservato a suo tempo Newton, genera una certa perplessità il dover ammettere che esistono altrettanti tipi di corpuscoli quanti sono i colori, la cui velocità risulta diversa all'interno del vetro, ma torna ad essere la stessa nel vuoto o nell'aria, quando contribuiscono tutti insieme a formare la luce bianca. D'altra parte, se la luce si comporta come un'onda nell'incontrare un ostacolo abbastanza piccolo non deve produrre un'ombra nettamente delimitata, come vuole invece la teoria corpuscolare. Infatti, facendo passare una luce sufficientemente intensa da un minuscolo forellino non si osserverà più una separazione netta fra luce ed oscurità, la luce si smorzerà gradualmente passando al fondo scuro con una serie di anelli chiari e scuri. La teoria ondulatoria fornisce una spiegazione brillante del fenomeno della diffrazione in termini di interferenza costruttiva e distruttiva delle onde che sono all'origine delle zone chiare e scure.

Come notava Huygens, l'acustica, scienza dei suoni, aveva preceduto l'ottica come dominio privilegiato della teoria ondulatoria, che risultava ugualmente efficace nel descrivere i movimenti dei fluidi, che rientravano nel campo d'azione dell'idrodinamica, prototipo per la fisica del continuo e dei fluidi conservati, che cioè non vengono né creati né distrutti. Anche la

teoria dell'elasticità dei corpi solidi era un caso di fisica dei mezzi continui, in cui la meccanica poteva essere applicata senza ricorrere all'ipotesi di una suddivisione della materia in punti materiali. Questi settori di ricerca ebbero una importanza enorme nell'acquisizione di nuovi strumenti formali nel campo della fisica matematica, che consentirono a loro volta una descrizione completamente nuova dei fenomeni fisici.

All'inizio dell'Ottocento la scuola di Laplace proponeva di studiare i fenomeni relativi alla propagazione del calore in termini di "atomi di calorico" che si supponeva venissero irradiati da ogni singola molecola. Se un corpo è riscaldato in modo che la temperatura in un punto di esso sia inizialmente più elevata, il calore si spanderà sino a che la temperatura del corpo diverrà uniforme. Questo processo spontaneo è intrinsecamente irreversibile perché manifesta la tendenza naturale della distribuzione spaziale di una quantità a passare da uno stato non uniforme a uno più uniforme. Un fenomeno analogo si ottiene quando una goccia di vino cade in un bicchiere d'acqua: il vino si spargerà più o meno lentamente attorno al punto iniziale, sino a che l'interno del bicchiere non sarà diventato di un rosa tenue ed uniforme. Possono tornare a separarsi scuotendo a lungo il recipiente? In linea di principio non è impossibile, ma solo infinitamente improbabile. Jean-Baptiste Fourier, il primo a impostare teoricamente lo studio dei processi irreversibili, capovolse completamente l'approccio meccanicistico dominante in Francia e partì dall'idea di "calorico" come fluido, traducendo in formule il fenomeno della diffusione del calore e considerando tale fluido come una quantità che complessivamente si conserva nel tempo. Questo concetto, che matematicamente si esprime attraverso le equazioni alle derivate parziali, equazioni differenziali che esprimono l'influenza su un punto dato di un insieme di punti immediatamente vicini, diventerà il fulcro della fisica ottocentesca. L'oggetto elementare, che fino a quel punto era stato il punto materiale, diventa l'onda sferica uscente da una sorgente. Su questa scia nascerà la teoria del campo elettromagnetico, che utilizza la conservazione della carica elettrica come "fluido elettrico".

Nell'analizzare l'evoluzione del fenomeno Fourier tracciò una curva della temperatura in funzione della distanza e la scompose in tante curve sinusoidali di frequenza diversa. Aveva inventato un potentissimo strumento matematico, la cosiddetta "analisi di Fourier", che consisteva nel rappresentare qualsiasi distribuzione non uniforme nello spazio e nel tempo come una sovrapposizione di onde elementari, ciascuna di una ben

determinata frequenza. L'analisi di Fourier di un fenomeno periodico permette di caratterizzare il comportamento dinamico di un qualsiasi sistema fisico mediante "frequenze caratteristiche", una possibilità che si rivela determinante per i cosiddetti sistemi "lineari", per i quali la risposta a una somma di *input* è la somma degli *output* agli input singolarmente applicati ("principio di sovrapposizione").

Nonostante il successo di queste efficaci rappresentazioni fenomenologiche in termini di continuo, alcuni fenomeni risultavano enigmatici: come mai la materia, pur essendo discontinua, una volta riscaldata emette luce, il cui comportamento è di natura ondulatoria, quindi continuo? La teoria atomica della materia fondata sulla meccanica e la teoria della luce sembravano quindi difficilmente conciliabili. Infatti, a partire dagli anni sessanta dell'Ottocento la problematica teorica della fisica europea è sempre più contraddistinta dalla contrapposizione tra una concezione atomistica, o "molecolare", della materia ordinaria, ancora in gran parte basata su uno schema che si rifaceva a Newton e a Laplace secondo cui l'atomo è visto come centro di forze a distanza, e una concezione continua, o "di campo", delle azioni elettromagnetiche e dei processi di propagazione luminosa che vede nell'etere - concepito e descritto come mezzo onnipervasivo, omogeneo, uniforme, continuo e privo di struttura interna - una sostanza primordiale, di cui è imbevuta la stessa materia ordinaria e che si estende senza dislocazioni o fratture in ogni zona dello spazio. Di questo dibattito faceva anche parte integrante una discussione sulla natura dell'etere il cui status nell'ambito della fisica era stato notevolmente accresciuto dalla teoria elettromagnetica di Maxwell.

Il concetto di etere risaliva all'antichità, ma presso gli antichi greci aveva avuto un carattere più filosofico che fisico. All'inizio l'unica funzione dell'etere era stata quella di riempire lo spazio eliminando la possibilità dell'esistenza del vuoto in natura. Le onde elastiche, come per esempio le onde sonore, riescono a diffondersi nei gas, nei liquidi e nei solidi. In assenza di un mezzo le onde elastiche non si manifestano. Per spiegare anche la diffusione della luce attraverso lo spazio apparentemente vuoto sembrava quindi indispensabile ricorrere a un mezzo imponderabile nel quale potessero aver luogo le oscillazioni. Un'onda non è nient'altro che una perturbazione che si propaga in un mezzo appropriato, se la luce era un'onda era necessario supporre che un mezzo di propagazione esistesse non soltanto in prossimità della terra, ma nell'intero spazio, per spiegare

la luce che proveniva dalle stelle, dal sole e dalla luna. Era necessario dedurre la natura di questo etere dalle leggi che regolano i fenomeni luminosi e, viceversa, spiegare le leggi che regolano i fenomeni luminosi sulla base di un modello meccanico dell'etere, una faccenda che si rivelò assai spinosa.

Inoltre, man mano che le esperienze di elettricità rivelavano altri tipi di effetti a distanza, tre nuovi tipi di etere fecero la loro apparizione: l'etere elettrico, l'etere magnetico e l'etere gravitazionale. Perfino la teoria di Maxwell, presupponeva l'esistenza di un etere elettromagnetico, detto anche "luminifero" – che "trasporta la luce" – come supporto onnipresente responsabile della propagazione nello spazio dei fenomeni elettrici, magnetici e ottici, manifestazioni di una stessa classe di fenomeni, l'elettromagnetismo. All'inizio tale etere veniva dotato di proprietà analoghe a quelle dei liquidi, ma a causa delle proprietà di polarizzazione e riflessione della luce fu necessario riconoscere che l'onda luminosa era dotata di una perturbazione trasversale e non longitudinale, come nel caso della propagazione delle onde nell'acqua: le oscillazioni dovevano essere perpendicolari e non parallele alla direzione di propagazione dell'onda. Non potendo essere un liquido, l'etere venne paragonato a un corpo solido quasi rigido, un solido che tuttavia possedeva delle ben strane proprietà: doveva essere dotato di un'elasticità molto elevata, nello stesso tempo doveva essere completamente trasparente e non doveva offrire resistenza ai movimenti dei pianeti e delle stelle... Inutile dire che questo strano miscuglio di proprietà, era del tutto contraddittorio, non corrispondendo ad alcuna rappresentazione plausibile della materia.

Malgrado ciò l'esistenza dell'etere diventò un articolo di fede universalmente riconosciuto tra i fisici. Le equazioni di Maxwell, fondate sul concetto di campo, implicavano una ripartizione continua dell'energia elettromagnetica nello spazio. L'etere non poteva avere dunque che una struttura continua. Tuttavia l'elettricità in quanto rappresentata come spostamento di particelle cariche si rifaceva a una rappresentazione discontinua. D'altra parte, la contrapposizione tra continuo e discontinuo risulta particolarmente evidente nell'opera dello stesso Maxwell, che fornisce contemporaneamente fondamentali contributi sia alla teoria cinetica dei gas (il caso esemplare di teoria atomistica) sia alla teoria del campo elettromagnetico e all'ottica ondulatoria, entrambe impennate sul concetto di etere. Un bel dilemma per Maxwell, che nel 1879, poco prima

di morire, si chiese "la costituzione ultima dell'etere: molecolare o continua?".

La soluzione di Maxwell e Boltzmann e la nascita della meccanica statistica

La teoria atomistica aveva fornito a James Clerk Maxwell, Rudolf Clausius e Ludwig Boltzmann il mezzo per interpretare la termodinamica in termini di meccanica classica. Eredi della teoria meccanica del calore della prima metà del XIX secolo, essi cercarono di conciliare rappresentazione meccanica e termodinamica del mondo fisico estendendo il dominio d'azione di quest'ultima nell'ambito della struttura microscopica della materia. Lo strumento di tale riconciliazione fu il concetto di probabilità. La termodinamica si occupa di processi di trasformazioni della materia nel corso di variazioni di temperatura e in quanto tale è per sua natura una teoria che si applica al mondo macroscopico. Ma il più piccolo volume immaginabile di materia contiene un numero enorme di elementi microscopici: è impossibile descrivere il loro comportamento individuale attraverso un sistema di equazioni. La seconda legge della termodinamica dice che la maggior parte dei processi naturali sono irreversibili, in contraddizione con la meccanica newtoniana, se applicata a entità microscopiche come gli atomi: le equazioni del moto sono reversibili per inversione del tempo, restano valide anche se si fa scorrere la variabile tempo verso il passato, piuttosto che verso il futuro. Boltzmann in particolare risolse questa contraddizione interpretando la seconda legge come una legge statistica, non assoluta. Lo studio di un sistema composto da un gran numero di atomi, per esempio un gas racchiuso in un contenitore, non richiede necessariamente il calcolo esplicito della traiettoria di ciascun atomo, è sufficiente conoscere il comportamento medio delle molecole per dedurre temperatura o pressione. Maxwell e Boltzmann cercarono di calcolare il comportamento medio degli atomi, sotto l'ipotesi che ciascuno di essi obbedisse alle leggi della meccanica newtoniana, mostrando come le leggi sperimentali della termodinamica dei gas si potessero dedurre da tali calcoli statistici. Anche Maxwell riteneva che la seconda legge della termodinamica fosse una legge essenzialmente statistica che descriveva il comportamento di un numero immenso di molecole e che non poteva essere spiegata da una teoria dei moti individuali delle molecole. Questi tentativi daranno origine alla meccanica statistica, che trovò la sua prima applicazione nella teoria

cinetica dei gas. Tale teoria, i cui principi sono tuttora validi, assimila un gas ad un insieme di atomi (o di molecole) che si spostano liberamente nello spazio e che subiscono delle collisioni occasionali sia con un altro atomo del gas, sia con le pareti del contenitore. Temperatura e pressione corrispondono rispettivamente all'energia media del movimento di ciascun atomo e all'intensità degli urti di tali atomi contro le pareti del contenitore, stabilendo un'analogia tra gas e bocce da biliardo che subiscono continuamente delle collisioni. Poiché ci sono tantissimi atomi e molecole perfino in un piccolissimo pezzo di ghiaccio, è estremamente improbabile – seppure non impossibile in linea di principio – che la miriade di molecole che fanno parte del pezzetto disciolto si riorganizzi in un tempo finito da uno stato di disordine come quello del liquido, in uno stato di ordine come quello del solido cristallino. L'interpretazione di Boltzmann dell'irreversibilità della trasformazione dell'energia meccanica in calore consisteva nell'interpretare questa legge facendo appello alle nozioni di ordine e disordine. Il calore è disordine, in quanto manifestazione dell'agitazione "termica", disordinata, delle molecole. Il solo fatto di agitare in un contenitore un certo numero di biglie bianche e nere separate inizialmente da una parete di separazione implica che alla fine non ci sarà più differenza tra le due parti nelle quali il numero di biglie dei due colori sarà approssimativamente lo stesso. Questo processo appare del tutto naturale a un osservatore esterno, che al contrario considererebbe del tutto innaturale il processo inverso attraverso il quale, agitando il contenitore, le biglie bianche e nere tornassero a disporsi in due gruppi perfettamente separati. L'intuizione comune sa che è possibile produrre "disordine" in modo naturale a partire dall'ordine, mentre non è vero il contrario.

Nel 1877 Boltzmann aveva stabilito una relazione tra entropia e analisi statistica dei moti molecolari, caratterizzando l'aumento irreversibile dell'entropia nei fenomeni naturali come una legge statistica. Questa constatazione trovava una semplice formulazione matematica nella formula di Boltzmann: $S = k \ln W$: l'entropia S (una grandezza termodinamica, dunque macroscopica, che esprime l'aumento di disordine) è proporzionale attraverso una costante universale k (precedentemente trovata da Planck, ma che sarà chiamata da Einstein costante di Boltzmann), al logaritmo della probabilità W , probabilità microscopica che Boltzmann attribuisce al numero di configurazioni possibili del sistema fisico. Se si considera un sistema ordinato costituito da due gas di specie

diverse chiusi in un contenitore e inizialmente separati per mezzo di una parete mobile, non è difficile immaginare che un numero enorme di configurazioni corrisponde a uno stesso stato macroscopico: quello che rappresenta i due gas mescolati fra loro. L'entropia S cresce dunque con il crescere del logaritmo di W . Questa formula di Boltzmann non dice nulla né dei meccanismi che sono all'opera in un gas portato a una certa temperatura, né delle forze di interazione tra le molecole, eppure ha il potere di stabilire un collegamento ben preciso fra aspetti macroscopici e microscopici di un sistema fisico. Le proprietà macroscopiche del calore e degli oggetti materiali, come l'irreversibilità, scaturiscono dunque dal comportamento statistico di un numero enorme di atomi "meccanici", un comportamento che può essere descritto dalla "meccanica statistica", una disciplina destinata a conoscere sviluppi straordinari nel corso del XX secolo.

La meccanica statistica applicata alla teoria cinetica permetteva di calcolare l'ordine di grandezza del numero di Avogadro, che fornisce il numero di molecole presenti in una grammo-molecola (o grammo-atomo), la quantità di una specie chimica corrispondente a un numero di grammi pari al suo peso molecolare (atomico). Riconciliando la visione atomistica di Dalton e i risultati di Gay-Lussac sulle leggi di combinazione dei gas Avogadro aveva formulato nel 1811 una legge secondo la quale, nelle medesime condizioni di temperatura e di pressione, uguali volumi di gas di diversa composizione contengono lo stesso numero di molecole. La teoria cinetica dei gas di Maxwell e Boltzmann, non soltanto era in grado di mostrare che questa legge è rigorosamente valida per i gas perfetti, cioè per gas molto rarefatti con valori bassi di pressione e densità, ma attraverso la valutazione approssimativa del numero di Avogadro riusciva in un certo senso a "contare le molecole". Incoraggiati dai successi della teoria di Maxwell e Boltzmann, i meccanicisti intravedevano il giorno in cui sarebbe stato possibile interpretare tutti i fenomeni così come era stato fatto con la teoria cinetica dei gas, giorno nel quale sarebbe stato dimostrato che la termodinamica, lungi dall'essere una scienza fondamentale, sarebbe stata ridotta a una "meccanica atomistica".

La possibilità di ottenere un sistema coerente di formule per tutti i composti chimici appariva come una valida conferma della teoria atomica della materia. La chimica, che fin dai lavori di Dalton dell'inizio dell'Ottocento si era basata sull'ipotesi atomica, mostrava che un atomo di ossigeno era sedici volte più pesante di uno di idrogeno, ma nessuno

sapeva quanto in realtà ciascuno pesasse. Nel 1869 il chimico russo D. I. Mendeleev aveva effettuato una classificazione degli elementi chimici, disponendoli nell'ordine dei pesi atomici crescenti, e aveva osservato che, riunendoli in gruppi di sette elementi, appariva evidente un'analogia nelle proprietà chimiche di elementi corrispondenti di questi gruppi. Successivamente risultò che le cose sono meno semplici di quanto si potesse supporre in base al semplice schema di Mendeleev, che pure costituiva un enorme punto di arrivo per i chimici. Restava il fatto che essi erano in grado di spiegare quale fosse l'origine del diverso comportamento degli atomi corrispondenti ai differenti elementi. La vera comprensione delle regolarità e irregolarità della tavola periodica avverrà soltanto nella prima metà del Novecento e richiederà molti sforzi da parte della comunità dei fisici e l'apporto fondamentale di teorie del tutto nuove.

Circa nello stesso periodo il microscopio aveva raggiunto il suo limite teorico di perfezione, ma gli atomi restavano comunque fuori della sua portata. D'altro canto il positivismo era all'apice del suo sviluppo, ed esponenti autorevoli come Ernst Mach insistevano sul fatto che la fisica dovesse, in generale, evitare di postulare l'esistenza di entità inosservabili per spiegare dei fenomeni osservabili. Il violento attacco alla teoria atomica veniva da personaggi come Wilhelm Ostwald, il padre della fisica chimica moderna. Nel congresso di Lubeca del 1895, durante il quale la maggioranza degli scienziati tedeschi attaccò violentemente i temi di fondo del pensiero di Boltzmann, Wilhelm Ostwald lesse una conferenza il cui titolo suonava "Il superamento del materialismo scientifico". Secondo Ostwald la visione meccanicistica del mondo è insostenibile per ragioni interne alla stessa fisica: "La congettura secondo cui tutti i fenomeni naturali si lasciano ridurre a quelli meccanici non può essere neppure definita un'utile ipotesi di lavoro: essa è semplicemente un errore. Tale errore è chiaramente rivelato dal seguente fatto. Tutte le equazioni della meccanica hanno la proprietà di ammettere l'inversione temporale. Vale a dire, i processi meccanici si svolgono allo stesso modo indipendentemente dallo scorrere del tempo verso il futuro o verso il passato. In tal modo, in un mondo puramente meccanico, non potrebbe esistere un prima e un dopo come accade nel nostro mondo: l'albero potrebbe tornare ad essere un germoglio, un seme... Il verificarsi dell'irreversibilità nei fenomeni naturali prova dunque l'esistenza di processi che non possono essere descritti dalle equazioni della meccanica". Ostwald era disposto a

considerare l'atomo come un concetto "euristico", utilizzato tutt'al più come elemento ausiliario per la comprensione della realtà, ma in ultima analisi, egli sperava che l'atomismo potesse essere rimpiazzato da una estensione del concetto di energia. "Chi li ha visti?", tuonava a sua volta Ernst Mach riferendosi agli atomi. Nonostante questa visione antiatomistica fosse sostenuta da solide argomentazioni scientifiche, la negazione dell'idea di atomo ricordava che Galilei e Newton erano stati costretti a occultare le loro speculazioni atomistiche per non essere accusati di empietà associata a materialismo e che nella Francia del XVII secolo la pena di morte minacciava coloro che insegnavano tali teorie.

Al Congresso di Saint-Louis del 1904 Ostwald tenne una conferenza sulle metodologie della scienza sottolineando l'importanza di stabilire una completa e ben definita "corrispondenza" tra la "molteplicità" delle esperienze riguardanti una certa situazione empirica e la "molteplicità" delle espressioni formali espressa in termini di costruzioni concettuali degli scienziati, siano esse parole, equazioni, o simboli. A proposito dei fenomeni fisici e chimici Ostwald insisteva nel promuovere l'energetica e la sua enfasi sulle trasformazioni misurabili di energia, promettendo l'accordo più pieno nell'ambito del ventaglio delle possibilità concettuali ed empiriche. Nella sua convinzione che sia nella fisica sia nella chimica la nuova prospettiva fenomenologica fornita dall'energetica fosse superiore alla vecchia visione ipotetica, meccanica e atomistica, Ostwald concludeva che, giudicando secondo il criterio di una corrispondenza diretta tra concetti e dati empirici "tutte le precedenti sistematizzazioni in forma di ipotesi" risultavano del tutto insufficienti.

Tra l'uditorio presente alla conferenza di Ostwald si trovava lo stesso Boltzmann, che parlò il giorno successivo. Nonostante non si dimostrasse contrario in linea di principio alle teorie di carattere fenomenologico, Boltzmann rifiutava di credere che fossero più adeguate a ristabilire l'ordine rispetto a specifiche ipotesi meccaniche riguardanti gli atomi, le molecole e l'etere. Nel negare che quelle stesse teorie fossero del tutto libere da ipotesi e idealizzazioni, e quindi irrefutabili, Boltzmann riteneva che l'utilità delle teorie fenomenologiche fosse limitata a riassumere o sviluppare "conoscenze già acquisite". D'altro canto Boltzmann rivendicava la libertà di fare ipotesi specifiche e dichiaratamente provvisorie che "forniscono all'immaginazione lo spazio per giocare" e così ispirano "le più inaspettate scoperte". I recenti risultati sperimentali che ruotavano intorno ai raggi catodici e ai fenomeni della radioattività,

secondo Boltzmann, non facevano che fornire credibilità al punto di vista atomistico.

La spiegazione della seconda legge della termodinamica in termini di una teoria statistica dei moti molecolari fu severamente attaccata nel corso degli ultimi dieci anni del secolo XIX anche dallo stesso Max Planck, che nel sottolineare la validità assoluta del concetto di entropia ne aveva fin dall'inizio cercata una interpretazione puramente termodinamica. Nel 1906, due anni dopo il Congresso di Saint-Louis, al momento del suo suicidio a Duino, presso Trieste, Boltzmann, di temperamento depressivo, si sentiva ormai praticamente isolato nella lotta contro la crescente accettazione delle idee antiatomistiche. Sulla sua tomba nel cimitero di Vienna fu incisa perenne ricordo la formula che riassume il senso profondo della sua battaglia scientifica $S=k \ln W$.

Eppure, appena un anno prima, Einstein aveva utilizzato la "teoria cinetico-molecolare del calore" per mostrare come "particelle in sospensione in una soluzione compiano, in conseguenza del moto termico delle molecole, movimenti di ampiezza tale da poterli agevolmente osservare al microscopio". Subito dopo Einstein aveva osservato che i moti da lui considerati potevano coincidere "con il cosiddetto moto molecolare browniano". Infatti, fin dal 1827, il botanico Robert Brown, armato di microscopio, aveva osservato che microscopiche particelle in sospensione in un liquido sono soggette a una serie incessante di movimenti disordinati. Quelle troppo grandi non si muovono perché "vengono urtate da tutte le parti dagli atomi in movimento" come aveva osservato Poincaré nel 1904, nel corso della conferenza di Saint-Louis. I colpi che ricevono sono talmente tanti che si compensano l'uno con l'altro, a causa del suo carattere irregolare e casuale, mentre le più piccole ne ricevono troppo pochi perché si crei questo equilibrio e quindi si muovono incessantemente da una parte all'altra. Da dove veniva quell'energia che sembrava non dovesse mai esaurirsi? si era chiesto Poincaré: "A dire il vero non dovremmo rinunciare alla nostra fiducia nella conservazione dell'energia, eppure sotto i nostri occhi il moto si trasforma in calore per attrito, e il calore si ritrasforma in moto, tutto ciò senza alcuna perdita poiché il movimento dura per sempre". La spiegazione secondo Einstein sta nel fatto che il moto casuale dei granelli in sospensione è dovuto a delle fluttuazioni della densità delle molecole del gas o del liquido. Nel concludere la premessa al suo primo articolo sul moto browniano Einstein aveva aggiunto che "una determinazione esatta della vera grandezza degli

atomi sarà possibile. Se viceversa la nostra previsione si dimostrasse inesatta, ciò fornirebbe un serio argomento contro la concezione cinetico-molecolare del calore". Nel 1909 Jean-Baptiste Perrin seguirà il metodo indicato da Einstein per fare una nuova determinazione del numero di Avogadro e nel suo famoso libro *Les Atomes*, pubblicato poco dopo, renderà omaggio all'intuizione scientifica di Dalton e Boltzmann: "Indovinare in tal modo l'esistenza o le proprietà di oggetti che sono ancora al di là della nostra conoscenza, *spiegare il visibile complicato con l'invisibile semplice*". Einstein vedrà in questo risultato sperimentale "un significato essenziale... a livello dei principi... si vede direttamente al microscopio una parte dell'energia termica sotto forma di energia meccanica". Di fronte a tale evidenza lo stesso Ostwald sarà costretto ad accettare la sconfitta e ad ammettere la realtà degli atomi.

Le sorprendenti scoperte di fine Ottocento

In effetti, la concezione atomistica della materia si era andata imponendo ai fisici anche grazie a una serie di sorprendenti scoperte avvenute negli ultimi anni del secolo XIX.

Nel corso dell'Ottocento si erano accumulate prove che, quando la materia assorbe o emette radiazione luminosa, lo fa in modo specifico, tanto specifico da costituire una sorta di impronta digitale. Tutto ciò non soltanto venne interpretato come una conseguenza del fatto che la materia sembrava assorbire ed emettere energia luminosa nell'ambito di un certo numero di frequenze caratteristiche degli atomi che entravano a far parte della composizione del materiale, ma a sua volta suggerì che l'atomo poteva essere esso stesso composto di parti, e che queste frequenze assorbite o emesse potessero essere una manifestazione dell'attività vibratoria fondamentale di queste parti. L'analisi degli spettri consentì addirittura la scoperta di nuovi elementi chimici. Inoltre, a partire dall'inizio della seconda metà del secolo si cominciarono a scoprire numerosi fenomeni che suggerivano l'esistenza di processi fisici operanti all'interno dell'atomo stesso. Lo studio della scarica elettrica in tubi di vetro dove era stato praticato un vuoto spinto, aveva portato nel 1859 alla scoperta di una radiazione proveniente dal catodo, fatta da J. W. Hittorf. Inizialmente anche i raggi catodici furono interpretati, particolarmente dai fisici tedeschi, come fenomeno ondulatorio, mentre gli inglesi erano orientati a considerarli delle particelle, presumibilmente un qualche tipo di ioni. Lo studio delle proprietà di tali raggi condusse W. C.

Röntgen nel 1895 alla scoperta dei raggi X, una radiazione sconosciuta emessa dal tubo a raggi catodici, capace di attraversare il corpo umano impressionando una lastra fotografica. L'impatto di questa scoperta sulla comunità scientifica fu enorme: la "Revue Général des Sciences" annunciò subito la nascita della "fotografia dell'invisibile" e nei due anni successivi le riviste scientifiche pubblicarono più di mille articoli sull'argomento e si svilupparono immediatamente le applicazioni mediche della scoperta. Lo stimolo derivante dal tentativo di comprendere la natura dei raggi X, che soltanto più tardi risultarono essere radiazione elettromagnetica ad alta frequenza, portò un anno più tardi, nel 1896, alla scoperta della radioattività dell'uranio da parte di Henri Becquerel. A questo punto luce, magnetismo, elettricità, "vuoto", comportamento variabile della materia sottoposta a queste diverse radiazioni, apparivano costituire i pezzi di un gigantesco puzzle. La scoperta della radioattività da parte di Henri Becquerel aggiunse un nuovo mistero, perchè questa radiazione apparve subito come qualcosa di "naturale", nel senso che veniva prodotta senza strumenti costruiti dall'uomo. Nel 1898 Maria e Pierre Curie scoprono nuovi elementi radioattivi oltre l'uranio, il radio e il polonio e Ernest Rutherford dimostra che i "raggi uranici" di Becquerel contengono due tipi di radiazioni che egli chiamò "alfa" e "beta"; questi ultimi risultarono essere elettroni con velocità prossime a quelle della luce. L'effettiva comprensione della radioattività venne soprattutto dalla straordinaria collaborazione tra Ernest Rutherford e Frederick Soddy, che proposero, almeno per i decadimenti naturali (alfa e beta) la necessità di un cambiamento della specie chimica e investigarono in dettaglio la natura delle radiazioni emesse. Cominciavano a essere messe radicalmente in discussione concezioni come quelle espresse nel 1873 dallo stesso James Clerk Maxwell: "Le pietre di fondazione dell'universo materiale rimangono inalterate. Esse sono oggi, così come erano quando furono create, perfette in numero, misura e peso". La radioattività è proprio la trasmutazione di un elemento in un altro. Nessuno all'epoca poteva essere consapevole del fatto che stava nascendo la fisica nucleare, perfino l'esistenza degli atomi non era un fatto scontato, né tanto meno si aveva un'idea della loro struttura in termini di nucleo circondato da una nube di elettroni. Al momento queste emanazioni vennero classificate tutte come "raggi": catodici, X, alfa, beta o gamma, esse rivelavano che l'atomo nella sua capacità di produrre fenomenologie complesse potesse addirittura suddividersi in parti più piccole, a loro volta indivisibili. Nel 1895 J. B.

Perrin dimostra che i raggi catodici sono carichi negativamente e nel 1897 J. J. Thomson riesce a determinarne il rapporto e/m , carica diviso massa, studiandone la deflessione in campi magnetici ed elettrici. Queste ricerche utilizzavano un particolare modello di tubo a raggi catodici, il precursore di quello successivamente utilizzato negli apparecchi televisivi. Sorprendentemente risultò che la massa della particella a denominatore era 2000 volte inferiore rispetto a quella dello ione idrogeno, già noto attraverso il processo di elettrolisi dell'acqua. D'altra parte Faraday aveva a suo tempo dimostrato che era necessaria sempre la stessa quantità di elettricità per liberare una quantità di materia corrispondente a una mole dell'elemento chimico considerato. Il significato reale di questo risultato fu espresso da Helmholtz nel 1881, nel corso di una delle conferenze intitolate a Faraday: "Se accettiamo l'ipotesi che le sostanze elementari siano composte di atomi, non possiamo evitare di concludere che l'elettricità stessa si divida in porzioni elementari che si comportano come atomi di elettricità". E ora, per la prima volta, si parlava esplicitamente di una particella più leggera dell'idrogeno. Due anni dopo si trovò che le particelle prodotte per effetto fotoelettrico, bombardando con radiazione elettromagnetica la superficie dei metalli, erano caratterizzate dallo stesso rapporto e/m e inoltre fu dimostrato che il valore del rapporto e/m era indipendente dal materiale utilizzato per il catodo. Per lo stesso motivo anche i raggi beta risultarono essere presumibilmente della stessa natura, anche se fin dall'inizio apparve chiaro che la massa di questa particella variava con la velocità, quando le velocità si avvicinavano in modo significativo a quella della luce.

Nel 1900 P. Villard scopre l'esistenza di una radiazione molto penetrante emessa dai corpi radioattivi, i raggi gamma, che più tardi si rivelò essere radiazione elettromagnetica ad altissima frequenza, simili ai raggi X, ma di lunghezza d'onda molto più corta. In quello stesso anno viene fatta la prima determinazione della vita media di un decadimento radioattivo e Soddy osserva la disintegrazione spontanea di elementi radioattivi in varianti che chiama "isotopi".

Tra il 1898 e il 1904 Thomson concepì uno dei primi modelli di atomo nel quale gli elettroni carichi negativamente erano immersi in un volume elettropositivo, come l'uvetta in un panettone. Varie proposte si erano succedute dopo la teoria dell'atomo come vortice nell'etere luminifero pubblicata da Kelvin nel 1867, una teoria che, nel rimuovere la solita dicotomia tra etere e materia e i vari moti all'interno di un sistema,

sembrava poter costituire la base per una visione unificata per i fenomeni osservati in ottica, elettricità, magnetismo e calore. Più tardi Kelvin abbandonò questo modello e verso la fine del secolo parlava di atomi come sfere o centri di forza, senza essere convinto che fosse una vera e propria descrizione degli atomi reali. Questi modelli presentavano grandi difficoltà teoriche, particolarmente riguardo alla loro stabilità meccanica ed elettromagnetica, che tuttavia poteva spiegare il verificarsi dei fenomeni radioattivi.

Sul fronte energetico questi nuovi fenomeni riservavano delle vere sorprese. Dalla valutazione dell'energia cinetica associata alle particelle alfa o stesso Rutherford era riuscito a valutare che l'energia in gioco nel corso dei processi di disintegrazione risultava circa un milione di volte maggiore rispetto a quella connessa alle trasformazioni chimiche conosciute. I sali di radio risultavano luminosi nell'oscurità, le sostanze radioattive concentrate emettevano calore e lo stesso Pierre Curie aveva dimostrato che un grammo di radio, posto in un calorimetro, era in grado di fondere, in un'ora, una quantità di ghiaccio pari almeno al proprio peso. Da dove proveniva questa continua emanazione di energia, apparentemente inesauribile e dalle origini del tutto misteriose? A questo stadio gli scienziati erano in grado di osservare soltanto il risultato finale di un processo che mutava la natura stessa del nucleo atomico di cui ancora non sospettavano nemmeno l'esistenza: la sua comprensione fu molto più ardua rispetto allo studio delle sue proprietà. Parecchie decine di anni di ricerche assai complesse saranno necessarie per identificare le leggi che regolano l'emissione dei "raggi uranici" da parte della materia. L'irruzione di questa incredibile serie di scoperte nel panorama della fisica si accompagnava al permanere di pressanti interrogativi sul carattere continuo o discontinuo della materia, che riguardava anche gli annosi rapporti tra materia ponderabile ed etere. A questo proposito Maxwell era stato molto lucido nella sua conclusione dell'articolo "Etere" scritto per la nona edizione dell'*Encyclopaedia Britannica* nel 1879: "L'intera questione dello stato del mezzo luminifero [l'etere] in prossimità della terra, e il suo legame con la materia ordinaria, sono tuttora ben lontani dall'essere chiariti".

La visione elettromagnetica del mondo

Verso la fine degli anni ottanta dell'Ottocento, il programma di spiegazione "dinamica", che assumeva come costituente base della realtà

fisica un substrato di particelle materiali in movimento, cominciò ad essere messo in difficoltà. Si fece strada una tendenza che si proponeva di descrivere le leggi della meccanica, le proprietà e il comportamento della materia in termini di elettromagnetismo, vale a dire facendo delle equazioni di Maxwell lo strumento fondamentale di spiegazione dell'universo. Il principale responsabile di questo progetto era Hendrik Antoon Lorentz, il grande fisico olandese, che sviluppò a poco a poco una teoria in cui l'elettrone, l'unità elementare di carica elettrica, veniva considerato un mattone elementare della materia. L'approccio radicale adottato da H. A. Lorentz proponeva una fisica universale fondata puramente su concetti elettromagnetici, in cui le leggi stesse della meccanica dovevano ricondursi a quelle più fondamentali dell'elettricità e del magnetismo. In questo quadro teorico l'universo intero veniva ricondotto a due elementi fondamentali, l'elettrone e l'etere, ossia enti strutturalmente non meccanici, la cui compresenza metteva in particolare risalto la dualità tra proprietà corpuscolari e proprietà ondulatorie che ora costituiva uno dei presupposti fondamentali della medesima teoria.

La "materia" di Lorentz era ora costituita interamente di elettroni, in modo tale che i suoi fondamentali attributi – la massa, l'elasticità, la durezza e la duttilità – dipendevano dal modo in cui le cariche elementari interagivano l'una con l'altra. Le proprietà elettriche, magnetiche, termiche della materia venivano spiegate attraverso l'interazione degli elettroni fra di loro e con un etere stazionario, la cui relazione con la materia veniva a sua volta rappresentata come una interazione tra elettroni e campo elettromagnetico. Lorentz era convinto che perfino la forza di gravitazione avrebbe finito col trovare una spiegazione nell'ambito di questa teoria.

La "teoria dell'elettrone" di Lorentz costituiva la premessa di un programma di ricerca che rappresentava l'estremo tentativo di superare la forma classica del dualismo onda-corpuscolo e, insieme, la vecchia contrapposizione tra teoria meccanica e teoria elettromagnetica, ma era una teoria destinata ad assumere un ruolo transitorio, pur costituendo il coronamento di un secolo di indagini, un punto d'arrivo su cui impostare con ottimismo la costruzione di una nuova sintesi stabile e feconda. Come dirà lo stesso Einstein in una allocuzione sulla tomba di Lorentz nel 1928, quest'ultimo era riuscito a "Privare l'etere delle sue qualità meccaniche e la materia delle sue qualità elettromagnetiche". L'etere occupa tutto lo spazio, compreso quello dove si trovano le particelle; continuo e

discontinuo coesistono, ma a prezzo di una contraddizione che si rivela a livello matematico: combinare equazioni alle derivate parziali, come le equazioni del campo di Maxwell, e equazioni differenziali, come le equazioni del moto di un punto materiale. Inoltre, la teoria di Lorentz non soddisfaceva al principio di relatività che Galilei aveva installato nel cuore della fisica secoli prima.

D'altra parte la sua straordinaria potenza esplicativa, la semplicità e coerenza dalla rappresentazione delle interazioni elementari che essa offriva e la sua capacità di unificare settori dell'esperienza fino allora considerati distinti, dava un impulso senza precedenti alla ricerca sperimentale e costringeva la ricerca teorica ad affrontare problemi interpretativi sempre più profondi e generali. Nel 1897 il fisico olandese Pieter Zeeman aveva scoperto che certe linee spettrali sembravano suddividersi in presenza di un campo magnetico. Lorentz riuscì a spiegare il fenomeno e prevede inoltre che la riga originale si sarebbe suddivisa in tre secondo una ben precisa separazione tra le nuove linee spettrali. La teoria di Lorentz aveva un altro forte punto a suo favore nel fornire una spiegazione agli esperimenti effettuati da Albert Abraham Michelson e Edward W. Morley negli anni ottanta dell'Ottocento, che avevano definitivamente messo in luce serie difficoltà nella spiegazione della relazione tra etere e materia.

Il moto della terra attraverso l'etere

A partire dagli anni venti dell'Ottocento, il complesso delle riflessioni sulla natura dell'etere e delle sue relazioni con la materia si era sviluppato parallelamente a una serie di esperienze di ottica che avevano in particolare l'obiettivo di valutare la velocità e la direzione del moto della terra nello spazio attraverso l'etere. L'idea di fondo di queste esperienze consisteva nel far passare simultaneamente un raggio di luce attraverso dei mezzi trasparenti e in direzioni differenti, confrontando il comportamento di tali raggi. Per esempio, una delle esperienze classiche, fatta dallo scienziato francese Hippolyte Fizeau aveva per oggetto il confronto tra velocità della luce nell'acqua e nell'aria. Quanto all'etere si riteneva che potesse interagire con la materia in movimento in tre modi diversi. Il moto della materia poteva essere trasmesso integralmente all'etere (ipotesi di trascinamento totale): in questo caso la velocità relativa tra materia ed etere doveva essere nulla. La seconda possibilità era quella di assenza totale di resistenza: in questo caso la velocità

relativa tra etere e materia doveva essere uguale alla velocità assoluta dello spostamento della materia. L'etere doveva rimanere immobile. La terza possibilità era quella di trascinamento parziale: soltanto una parte del moto della materia veniva comunicato all'etere. Purtroppo le varie esperienze davano dei risultati contraddittori. La più celebre di queste, eseguita da Michelson e Morley, permetteva di confrontare la velocità di due fasci luminosi che percorrevano due tragitti perpendicolari l'uno all'altro. L'apparato, fermamente fissato a terra, poteva essere ruotato su se stesso, di conseguenza ci si attendeva di trovare, in corrispondenza di ciascuna rotazione, un effetto massimo corrispondente alla situazione in cui uno dei due fasci si trovava ad essere orientato parallelamente alla direzione del movimento assoluto della terra nell'etere, mentre l'altro risultava essere perfettamente perpendicolare. La sensibilità dell'apparato era duecento volte superiore allo scarto previsto tra le due direzioni, ma nonostante ciò non individuò alcuna differenza di velocità della luce fra le due direzioni. Questo esperimento fu cruciale nella storia della scienza: il suo risultato negativo scombussolò i fisici del mondo intero. Eseguito per la prima volta nel 1881, fu ripetuto nel 1897 con un apparato ancora più perfezionato. In seguito altri esperimenti del genere sono stati ripetuti utilizzando vari tipi di radiazione, come ad esempio il laser, ma ogni volta, indipendentemente dalla sensibilità dello strumento, il risultato è sempre stato negativo. L'esperienza di Michelson e Morley sembrava dimostrare *a priori* che l'etere era totalmente trascinato dalla materia, mettendo completamente in crisi Lorentz il quale aveva dimostrato come tutte le altre esperienze risultavano compatibili con l'ipotesi di trascinamento parziale. Tra il 1895 e il 1904 vennero fatti degli enormi sforzi per trovare una soluzione del dilemma. Lorentz e il fisico irlandese Francis George Fitzgerald avanzarono indipendentemente la stessa proposta: questa implicava che l'apparato si contraeva nella direzione del moto tanto da rendere uguali i tempi di percorrenza dei due fasci di luce. Entrambi arrivarono ad affermare che i risultati di Michelson e Morley non erano altro che una dimostrazione di questo fenomeno. Inutile dire che il loro ragionamento si mordeva la coda: faceva appello alla loro ipotesi di contrazione per spiegare il risultato negativo dell'esperimento, poi utilizzava questo risultato negativo come prova della contrazione. L'accettazione stessa di tale inconsistenza logica testimonia chiaramente l'entità della crisi attraversata all'epoca dai fisici che tentavano di comprendere i risultati più disparati degli esperimenti volti a mettere in

evidenza il "vento d'etere". Sia Lorentz che Fitzgerald ritenevano reale l'effetto di contrazione, pur dandone spiegazioni diverse. Nonostante l'ipotesi della contrazione fosse in grado di spiegare i risultati sperimentali sull'interazione etere-materia, un certo numero di teorici – tra i quali Henri Poincaré – la giudicavano un po' troppo costruita su misura. Al Congresso di Saint-Louis, Poincaré ribadì la sua fiducia nel principio di relatività "... secondo il quale le leggi dei fenomeni fisici devono essere le stesse sia per un osservatore fermo sia per un osservatore in moto traslatorio uniforme; così che non abbiamo e non siamo in grado di avere in alcun modo la possibilità di distinguere se siamo effettivamente trascinati in tale moto". Questo principio era già contenuto nel famoso passo di Galilei ("Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo " □ giornata seconda): "Riserratevi con qualche amico nella maggiore stanza che sia sotto coverta di alcun gran navilio, e quivi fate d'aver mosche, farfalle e simili animaletti volanti; siavi anco un gran vaso d'acqua, e dentrovi de' pescetti; sospendasi anco in alto qualche secchiello, che a goccia a goccia vadia versando dell'acqua in un altro vaso di angusta bocca, che sia posto a basso: e stando ferma la nave osservate diligentemente come quelli animaletti volanti con pari velocità vanno verso tutte le parti della stanza; i pesci si vedranno andar notando indifferentemente per tutti i versi; le stille cadenti entreranno tutte nel vaso sottoposto... Osservate che avrete diligentemente tutte queste cose, benché niun dubbio ci sia che mentre il vassello sta fermo non debbano succeder così, fate muover la nave con quanta si voglia velocità; ché (pur che il moto sia uniforme e non fluttuante in qua e in là) voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti, né da alcuno di quelli potrete comprender se la nave cammina...".

Nel suo discorso, che secondo alcuni storici anticipava la sostanza della relatività einsteiniana, Poincaré aveva ribadito che "tutti i tentativi di misurare la velocità della terra in relazione all'etere hanno fornito risultati negativi" e aveva commentato che "questa volta la fisica sperimentale era stata più fedele al principio della fisica matematica; i teorici, per creare un accordo con la loro visione generale, non lo avrebbero risparmiato, ma l'esperimento lo ha testardamente confermato... Michelson ha spinto la precisione ai limiti estremi, non ne è venuto fuori nulla". Per quanto riguardava i fenomeni conosciuti, egli era convinto che un principio di relatività fosse in atto tanto da obbligare le leggi conosciute della fisica ad adottare la stessa forma in sistemi che si spostavano uniformemente uno

rispetto all'altro, come la terra e l'etere. Per quattro anni Lorentz si era dedicato allo studio di questi problemi, quando finalmente, qualche mese prima del congresso di Saint-Louis, aveva proposto una soluzione che secondo lui rispondeva al quesito posto da Poincaré. La sua analisi iniziava con il fornire una serie di equazioni che sostituivano quelle tradizionali (le cosiddette equazioni di trasformazione di Galilei le quali mettevano in relazione le coordinate spaziali e temporali corrispondenti a sistemi dotati di moto uniforme l'uno rispetto all'altro). Le equazioni analoghe formulata da Lorentz funzionavano perfettamente: le leggi della fisica assumevano la stessa forma nei differenti sistemi e inoltre quando venivano applicate a misure di lunghezza in sistemi in moto relativo uniforme saltava fuori la contrazione di Lorentz-Fitzgerald. L'applicazione delle "equazioni di trasformazione di Lorentz" prevedeva ugualmente che la massa di una particella carica in moto dovesse aumentare in funzione della velocità relativa tra le particelle, un'ipotesi in accordo, entro i limiti normali di incertezza, con le osservazioni recenti. Tuttavia, una delle conseguenze di queste equazioni turbava notevolmente Lorentz. La loro applicazione a coordinate temporali prevedeva che il ritmo degli orologi nel sistema in moto apparente dovesse decrescere in funzione della velocità. Secondo Lorentz l'effetto non poteva essere reale: si trattava semplicemente di un "artificio di calcolo", di una "astrazione", che egli denominò "tempo locale". In questo modo Lorentz non si preoccupò più delle caratteristiche fisiche dell'etere, che per lui non diventava altro che il sistema di riferimento dello spazio assoluto newtoniano. L'etere si riduceva alle equazioni che lo descrivevano.

Nella sua relazione al congresso di Saint-Louis, Poincaré aveva richiamato l'attenzione di tutta la comunità dei fisici sull'importanza delle "trasformazioni di Lorentz", inoltre aveva affermato che, secondo la sua opinione, i fenomeni elettrici erano il risultato di spostamenti degli elettroni nell'etere che riempiva lo spazio. E aveva quindi avanzato l'ipotesi che, se la teoria di Lorentz era fondata, allora ci si doveva aspettare la nascita di una "nuova meccanica", la quale doveva implicare che nessun trasporto di materia o di energia potesse superare la velocità della luce.

Le discussioni del congresso si basavano in gran parte su questi sviluppi recenti, e tuttavia nessuno, in un modo o nell'altro, per un motivo o per un altro, mise in discussione l'esistenza dell'etere. Il direttore della prestigiosa rivista "Physical Review" arrivò ad affermare che l'etere

rappresentava una "necessità intellettuale". L'etere insomma era diventato una questione che monopolizzava l'attenzione di coloro che erano alla ricerca di una spiegazione della materia. Nel complesso le proposte di Lorentz non ebbero un effetto particolare, molti ritenevano che ulteriori esperimenti sarebbero stati necessari prima di poter arrivare ad una conclusione riguardo il moto relativo della materia nell'etere.

Paul Langevin, nella sua relazione "The relations of physics of electrons to other branches of science", ribadiva che "La straordinaria fertilità dimostrata dalla nuova idea, basata sulla prova sperimentale della struttura corpuscolare discontinua delle cariche elettriche, appare come la più straordinaria caratteristica dei recenti progressi nel campo dell'elettricità. Le conseguenze si estendono a tutte le parti della vecchia fisica, specialmente all'elettromagnetismo, all'ottica, al calore radiante; esse gettano una nuova luce perfino sulle idee fondamentali della meccanica newtoniana e hanno riportato in auge le vecchie idee atomistiche facendo sì che esse fossero elevate dal rango di ipotesi a quello dei principi". Nel ribadire che la nozione di elettrone era diventata il solido fondamento della teoria e dell'esperimento, Langevin sottolineava quanto fosse giustificata l'"attuale tendenza a conferire alle idee elettromagnetiche un posto preponderante", la cui solidità scaturisce da una "doppia base": dalla "esatta conoscenza dell'etere elettromagnetico che dobbiamo a Faraday, Maxwell e Hertz e dall'altra parte dall'evidenza sperimentale fornita dalle recenti indagini sulla struttura granulare dell'elettricità".

Perfino Rutherford era interessato a ricondurre il fenomeno della radioattività nell'ambito dell'interpretazione elettromagnetica e favorevole all'idea che la massa della particella beta, ovvero dell'elettrone, fosse interamente di origine elettromagnetica e destinata ad aumentare man mano che la velocità si avvicinava al suo limite massimo, la velocità della luce. Nel presentare a Saint-Louis le più recenti conoscenze sperimentali e teoriche riguardanti la radioattività – dalla natura delle radiazioni alfa beta e gamma, fino all'energia in gioco in questi processi – Rutherford mise in evidenza che la teoria della disintegrazione radioattiva da lui formulata insieme a Frederick Soddy, che implicava problemi di conservazione dell'energia, risultava in armonia con "la moderna visione della costituzione elettronica della materia".

"Sebbene ancora molto recenti – continuava Langevin – le concezioni di cui ho cercato di fornire un'idea complessiva stanno per penetrare nel

cuore stesso dell'intera fisica dove agiranno come un germe fertile nel cristallizzare intorno ad esse, attraverso un ordine nuovo, dei fatti molto lontani l'uno dall'altro. Quest'idea ha avuto uno sviluppo immenso negli anni recenti e sta mandando in pezzi la struttura della vecchia fisica, sovvertendo l'ordine stabilito di idee e leggi per ramificarsi di nuovo in una organizzazione che si prevede semplice, armoniosa e fruttuosa". Con queste conclusioni trionfistiche Langevin decretava la morte del programma di spiegazione meccanica del mondo.

La crisi del meccanicismo e le nubi di Lord Kelvin

Il fallimento dei tentativi volti a spiegare il meccanismo del moto della terra attraverso l'etere e le difficoltà concettuali associate al programma tradizionale di spiegazione meccanica attraverso la costruzione di modelli si erano entrambi drammaticamente imposti all'attenzione dei fisici di fine Ottocento. Già Maxwell nel suo *Trattato* aveva sottolineato che tali modelli non erano in grado di fornire una spiegazione unica dei fenomeni e aveva attirato l'attenzione sui rischi di confondere rappresentazione e realtà. Nonostante rimanesse legato all'obiettivo di formulare una teoria meccanica "completa" del campo elettromagnetico, alla fine aveva fatto ricorso alla formulazione analitica della dinamica, piuttosto che a specifici modelli meccanici come aveva fatto negli stadi iniziali delle sue ricerche. La propagazione delle forze magnetiche ed elettriche era stata spiegata attraverso una analogia meccanica, una illustrazione euristica del tutto "provvisoria e temporanea": nel campo, rappresentato come un fluido incompressibile, vortici rotanti la cui configurazione geometrica doveva corrispondere alle linee di forza, erano separati da strati di particelle sferiche (identificate con l'elettricità), che fungevano da ingranaggi per mettere in moto il flusso di corrente. La correlazione tra modello meccanico e elettromagnetico aveva fornito a Maxwell una rappresentazione dei fenomeni di induzione, che una volta costruita la teoria lui stesso aveva abbandonato a favore di un formalismo analitico astratto. Il declino della visione meccanica del mondo si accompagnava ai dibattiti sui fondamenti della fisica e perfino alle critiche di carattere filosofico. Nella sua analisi della storia della meccanica pubblicata agli inizi del Novecento Ernst Mach aveva dimostrato che le leggi della meccanica non possono avere uno status privilegiato nella fisica. Mach estendeva la sua critica alla filosofia meccanicistica attaccando l'atomismo, ontologia della visione meccanica del mondo, ed enfatizzava il carattere ipotetico

della teoria sostenendo che gli atomi non erano altro che simboli della rappresentazione dei fenomeni, non particelle reali.

Nel 1900, quando gli sviluppi delle teorie dell'etere e del campo minacciavano ormai seriamente l'egemonia della visione meccanica del mondo, Lord Kelvin pronunciò alla Royal Institution una famosa allocuzione dedicata alle "Nubi del diciannovesimo secolo sulla teoria del calore e della luce". Mentre Ostwald poneva violentemente l'accento sulla constatazione che lo sviluppo delle scienze fisiche aveva portato a una crisi e, per uscire da essa, riteneva necessario enunciare un vero e proprio verdetto filosofico sulla scomparsa della materia e sostenere che l'energia deve essere posta alla base di ogni spiegazione del mondo fisico, per Kelvin invece, lo sviluppo delle scienze fisiche aveva portato a difficoltà gravissime e a veri e propri fallimenti, per uscire dai quali egli asseriva la necessità di una riformulazione dei problemi irrisolti, con nuovi concetti fisico-matematici. Le *nubi* di cui parlava Kelvin erano due nodi teorici fondamentali. Il primo nodo riguardava una domanda che aveva radici nelle teorie ondulatorie affermatesi all'inizio del secolo: "Come potrebbe la terra muoversi attraverso un solido elastico quale essenzialmente è l'etere luminifero?". Kelvin si riferiva appunto al groviglio di difficoltà sorte in rapporto anche all'esperimento di Michelson e Morley e al brillante suggerimento di Fitzgerald e Lorentz sulla contrazione. La seconda nube riguardava invece alcuni aspetti importanti del lavoro di Maxwell e Boltzmann sui quali esistevano dei dati sperimentali divergenti rispetto alla teoria, relativi al delicato problema dei calori specifici e agli spettri molecolari dei gas. La formulazione di modelli della struttura molecolare della materia si trovava a dover affrontare delle restrizioni imposte da differenti fenomeni che risultavano in contraddizione tra di loro. Maxwell aveva derivato dalla sua teoria cinetica dei gas il risultato matematico che l'energia cinetica in un gas di molecole è distribuita "equamente" tra i moti interni delle molecole. Il cosiddetto "teorema di equipartizione" sulla distribuzione dell'energia risultava in conflitto sia con le determinazioni sperimentali delle proprietà termiche (calori specifici) dei gas, sia con l'evidenza spettroscopica, da cui si deduceva che le linee spettrali erano il risultato di vibrazioni interne molecolari piuttosto complesse, del tutto in contraddizione con le restrizioni imposte dal teorema di equipartizione dell'energia, che implicava una restrizione nella struttura meccanica delle molecole.

Nella seconda metà del secolo le ricerche nel campo della spettroscopia avevano messo in luce che ciascun elemento chimico è in grado sia di assorbire che di emettere luce di ben precise lunghezze d'onda caratteristiche dell'elemento stesso. Questo suggeriva che le linee scure dello spettro solare non erano che il risultato dell'assorbimento selettivo della luce da parte degli elementi chimici contenuti nell'atmosfera solare. La spettroscopia divenne interessante per i chimici a cui forniva un preciso metodo di analisi, oltre a provocare speculazioni sulla natura degli elementi stessi. L'indagine sugli spettri di stelle lontane rivelò la prevalenza di gas leggeri nelle stelle più calde, mentre le più fredde contenevano una maggiore proporzione di metalli pesanti. Questa analisi consentiva la formulazione di ipotesi sull'evoluzione degli elementi chimici a partire da sostanze più semplici e come risultato di fenomeni di raffreddamento e condensazione di elementi più leggeri nelle stelle. Il puzzle che nasceva dalle osservazioni astrofisiche si accompagnava a una seconda questione, apparentemente del tutto innocente, che riguardava la quantità di energia richiesta per innalzare la temperatura di un corpo, ovvero il suo calore specifico. Il problema era che si richiedeva molta meno energia di quanto previsto. Quasi cent'anni prima Pierre-Louis Dulong e Alexis-Thérèse Petit avevano osservato che indipendentemente dal materiale di cui è costituito un solido il calore specifico per molecola è circa lo stesso. A questa legge Boltzmann aveva dato una formulazione apparentemente solida, applicando la meccanica statistica agli atomi di un solido era riuscito a calcolare il calore specifico per atomo in preciso accordo con le osservazioni di Dulong e Petit. Verso la fine del secolo, tuttavia, non soltanto alcuni materiali come il diamante mostravano di avere un calore specifico troppo piccolo, ma l'avvento delle tecniche di criogenia aveva messo in evidenza che i calori specifici a temperature molto basse dipendevano fortemente dalla temperatura, in contrasto con la teoria di Boltzmann. La descrizione del comportamento degli atomi in un solido e la derivazione matematica di Boltzmann sembravano dover essere seriamente messe in discussione. Qualcuno pensava che in realtà gli esperimenti e la teoria fossero corretti e che la crisi potesse essere risolta adottando un punto di vista del tutto nuovo.

Planck e la radiazione di corpo nero, il continuo messo in discussione

Nessuna relazione al Congresso di Saint-Louis aveva per oggetto il recentissimo lavoro di Max Planck, che partendo da problematiche completamente diverse aveva in realtà rimesso completamente in discussione il concetto di continuo creando i presupposti per un profondo sovvertimento nell'universo della fisica classica. Di lì a poco sarà proprio Einstein a coglierne l'essenza "rivoluzionaria".

Fin dal 1860 i fisici si erano sforzati in ogni modo alla ricerca di una formula in grado di descrivere in modo soddisfacente la natura della radiazione emessa da corpi ideali, i cosiddetti "corpi neri". Tale radiazione è assimilabile alla radiazione elettromagnetica emessa da un corpo incandescente o da un forellino praticato in una cavità (per esempio un forno) dalle pareti perfettamente riflettenti contenente radiazione elettromagnetica ad alta temperatura. Il problema era stato sollevato da Gustav Kirchhoff che ne aveva sottolineato il carattere universale: la legge doveva dipendere solo dalla frequenza e dalla temperatura della radiazione e non dalla natura del corpo emittente purché il suo potere assorbente fosse il 100%. Gli scienziati dell'epoca erano anche interessati a fissare delle misure standard per l'emergente industria elettrica in Germania e a questo scopo avevano misurato il modo in cui l'energia elettromagnetica totale di un corpo nero si distribuiva tra le diverse lunghezze d'onda. Infatti i motivi che spingevano i fisici a interrogarsi sulle relazioni tra la luce emessa da un corpo e la sua temperatura, erano anche di natura pratica. La formula cercata descriveva la peggiore sorgente luminosa possibile che poteva servire da campione per tarare le nuove lampade elettriche a filamento incandescente in base al loro rendimento. Esistevano delle formule che correlavano la luce emessa da un corpo (l'insieme delle frequenze) alla sua temperatura. Le stelle stesse potevano essere classificate in base a questo criterio, ma le formule esistenti funzionavano soltanto in particolari zone dello spettro: fino al 1900 nessuno era stato capace di fornire una precisa formula matematica per la distribuzione di energia per tutte le temperature e le frequenze così come era stata sperimentalmente osservata. Perfino Lorentz era stato costretto ad ammettere che la sua teoria dell'elettrone non era in grado di dar conto del modo in cui l'energia della radiazione di corpo nero si distribuisce tra le varie lunghezze d'onda osservate sperimentalmente.

Fin dal 1896 l'attenzione di Max Planck, che vedeva nelle proprietà della radiazione del corpo nero un nodo teorico di grandissima rilevanza, fu attratta da questo problema che esercitava un fascino speciale su di lui, a

causa del suo carattere universale: "Questa distribuzione "normale" dell'energia spettrale rappresentava qualcosa di assoluto; e poiché io avevo sempre considerato la ricerca di qualcosa di assoluto come lo scopo più elevato di tutte le attività scientifiche, mi misi attivamente al lavoro". Planck fece sempre uno sforzo nella direzione di una "ricerca dell'assoluto" nelle leggi di natura: "Il nostro punto di partenza è sempre il relativo. Tutte le nostre misure sono relative. I materiali di cui sono fatti gli strumenti con i quali lavoriamo sono condizionati dal luogo da cui vengono, la loro fabbricazione lo è dall'abilità del tecnico che li ha progettati, il loro uso dagli scopi particolari che lo sperimentatore si propone di ottenere attraverso di essi. A partire da tutti questi dati, si tratta di scoprire l'Assoluto, il Generale, l'Invariante che vi si nasconde".

Inizialmente Planck, che si era laureato con una tesi sul secondo principio della termodinamica, aveva sperato di derivare la formula basandosi sulla teoria di Maxwell, facendo delle assunzioni naturali riguardo l'energia e soprattutto fornendo una interpretazione puramente termodinamica dei processi radiativi. Ma questa linea risultò fallimentare e Planck fu costretto a raccogliere le osservazioni di Boltzmann, che gli aveva fatto notare come le equazioni del campo elettromagnetico, come quelle della meccanica, sono simmetriche rispetto all'inversione del tempo e in quanto tali non possono da sole essere alla base della descrizione di processi irreversibili. Planck si trovò costretto ad adottare l'interpretazione statistica dell'entropia formulata da Boltzmann e il 14 dicembre del 1900 fu in grado di annunciare dei risultati sensazionali di fronte all'uditorio della Società tedesca di fisica a Berlino: a distanza di 40 anni dalla sfida lanciata da Kirchhoff era riuscito a fornire una giustificazione teorica alla formula da lui stesso proposta due mesi prima per descrivere la distribuzione di energia radiante emessa da un corpo nero per tutte le temperature e lunghezze d'onda. Per arrivare a questa deduzione Planck non soltanto aveva dovuto seguire la via proposta da Boltzmann, ma si era trovato nella necessità di postulare che gli oscillatori microscopici potevano scambiare l'energia soltanto sotto forma di quanti ($\varepsilon = nh\nu$), o multipli di una quantità elementare, quella che oggi chiamiamo h , la cosiddetta costante di Planck.

Rivoluzionario suo malgrado, Planck era stato costretto ad allontanarsi dalle categorie di pensiero tradizionali. Nella fisica classica l'energia è una grandezza che può variare in modo continuo e che può quindi essere fornita a un oscillatore in qualsiasi ammontare, in maniera continua, in

accordo con i principi della teoria elettromagnetica. In sostanza il procedimento di Planck consisteva nel sostituire una rampa con una scala a pioli posti a intervalli uguali, in modo che lo scambio di energia tra materia e radiazione di corpo nero non avvenisse in maniera continua, in accordo con i principi della teoria elettromagnetica. Introducendo anche per l'energia una struttura granulare simile a quella già ammessa per la materia o per l'elettricità, risultava che questa doveva essere assorbita o emessa soltanto in certe unità discrete, rappresentate dalla distanza costante da un piolo della scala a quello successivo. Ogni oscillatore doveva sempre trovarsi su un piolo o su un altro e, se saliva o scendeva lungo la scala energetica, doveva farlo saltando dall'uno all'altro. Planck inoltre affermò che la distanza tra i pioli della scala energetica, i "livelli" di energia, non era sempre la stessa per tutti gli oscillatori, ma doveva comunque essere proporzionale alla loro frequenza. Il fatto che egli avesse discretizzato l'energia totale introducendo la grandezza $\epsilon = h\nu$ non rappresentava un procedimento insolito, ma soltanto un trucco matematico: "Si trattava di un'ipotesi puramente formale della quale, in verità, non mi preoccupai molto, l'importante era solo questo, che dovevo in tutti i modi, e a ogni costo, ottenere un risultato positivo". Infatti questa procedura veniva utilizzata abitualmente per semplificare i calcoli, salvo poi far tendere a zero la discretizzazione per tornare al continuo. Ma alla fine Planck si trovò invece di fronte ad una incredibile realtà: tutto funzionava soltanto mantenendo l'assunzione che la conversione di calore in luce poteva avvenire solo secondo determinate quantità, "pacchetti" di energia, multipli interi di una unità minima di scambio, proporzionale alla frequenza della luce prodotta attraverso una costante, h , che Planck affermò essere una costante universale e che chiamò "quanto elementare di azione", a causa delle unità con le quali si misura (un'energia per un tempo) e che la storia ha battezzato come "costante di Planck".

Le implicazioni di questi sorprendenti risultati, che si sarebbero rivelate fondamentali per la fisica del Novecento, sul momento non erano apparse tali nemmeno allo stesso Planck. Se il quanto elementare d'azione fosse stata una grandezza fittizia, tutta la legge dell'irraggiamento sarebbe stata illusoria in linea di principio, non rappresentando altro che un gioco di formule senza contenuto. Se invece la deduzione della legge poggiava su un reale contenuto fisico, allora il quanto d'azione "doveva avere un significato fondamentale che annunciava qualcosa di assolutamente nuovo, fino ad allora insospettato, che sembrava destinato a rivoluzionare

il nostro pensiero fisico basato sulla nozione di continuità, propria di tutte le relazioni causali fin da quando Leibniz e Newton avevano fondato il calcolo infinitesimale". "La natura non fa salti" era una massima che la fisica moderna aveva ereditato senza incertezze dalla Scolastica: come può un corpo, secondo il modo di pensare ricavato dall'esperienza macroscopica millenaria, passare dalla velocità di 20 km/h a quella di 30 Km/h senza poter viaggiare, almeno per un istante, alle velocità intermedie, a esempio 25 km/h? D'altra parte l'ipotesi sconcertante della "quantizzazione" dell'energia, che risolveva il problema della distribuzione spettrale della radiazione emessa da un corpo nero, non era affatto chiara a prima vista. Occorsero quasi dieci anni di dibattito teorico perché la comunità scientifica si rendesse conto che il concetto stesso di processo fisico doveva subire una trasformazione radicale, e non poteva più essere coerentemente inserito nell'immagine classica della realtà fisica. Per molto tempo lo stesso Planck, convinto che l'energia della radiazione dovesse avere un carattere continuo, sperò che la discontinuità potesse essere attribuita all'interazione tra materia e radiazione, si sforzò di spiegare e riconciliare con le conoscenze esistenti la costante h : "Il ruolo che questa nuova costante rivestiva nel corso regolare dei processi fisici restava ancora una questione del tutto oscura. Immediatamente io cercai dunque di inquadrare in un modo o nell'altro, il 'quanto elementare di azione' nell'ambito della teoria classica. Ma la costante si rivelò scomoda e recalcitrante ad ogni mio tentativo... Il fallimento di tutti i miei tentativi per superare l'ostacolo rese evidente il ruolo fondamentale che il quanto elementare di azione assume nella fisica atomica, e che la sua apparizione apriva un'era nuova nel campo delle scienze della natura. Poiché essa annunciava l'avvento di qualcosa del tutto inatteso e destinato a rivoluzionare le fondamenta stesse del pensiero fisico, che dopo la scoperta del calcolo infinitesimale si basavano sull'idea che tutte le relazioni causali sono continue".

Come scrisse Einstein molto più tardi: "La sua scoperta [...] pose alla scienza un nuovo problema: quello di trovare una nuova base concettuale a tutta la fisica". Tuttavia, la teoria di Planck, aveva un carattere ibrido: da una parte era legata alla teoria del campo elettromagnetico, una teoria del continuo, e dall'altro utilizzava argomenti della teoria molecolare del calore, un approccio tipicamente discreto. La dottrina atomistica, fino allora centrata sull'ipotesi della limitata divisibilità della materia, doveva fare un passo ulteriore ed estendersi anche alla concezione dei processi

fisici elementari, in particolare ai processi che implicavano la generazione e la trasformazione della luce. Anche questi risultarono avere una struttura "atomica", ossia implicano "transizioni" intere, finite, discontinue. Nel 1905, in un lavoro che all'epoca lui stesso considerò "rivoluzionario", Einstein farà l'ipotesi che "quando un raggio luminoso uscente da un punto si propaga, l'energia non si distribuisce in modo continuo in uno spazio via via più grande; essa consiste invece di un numero finito di quanti di energia, localizzati in punti dello spazio, i quali si muovono senza dividersi e possono essere assorbiti e generati solo nella loro interezza". Einstein aveva scoperto un oggetto, la luce, che sfuggiva alla dicotomia continuo/discontinuo, rendendo d'un sol colpo compatibili fra loro le teorie della luce e della materia. Essa apparve troppo radicale anche allo stesso Planck, che per lungo tempo fece ogni sforzo per riconciliare l'ipotesi quantica con la fisica classica. I "fotoni", come più tardi furono denominati i quanti di luce di Einstein, che risultavano efficaci per spiegare processi come l'effetto fotoelettrico, l'emissione di elettroni da parte di metalli colpiti da radiazione luminosa di una ben precisa frequenza, saranno lungamente osteggiati dai fisici, troppo abituati alla natura ondulatoria della radiazione elettromagnetica, finché non sarà dimostrato da Arthur Compton (1923) in modo inequivocabile che nell'interazione con gli elettroni essi si comportano proprio come dei corpuscoli, obbedendo fedelmente alle leggi della conservazione dell'energia e della quantità di moto. Riapparivano gli antichi fantasmi; la teoria dei quanti aveva risuscitato i corpuscoli, sotto forma di fotoni, e il duplice aspetto, ondulatorio e corpuscolare della radiazione da Compton in poi, non potrà più essere ignorato. Ma era soltanto l'inizio delle scoperte stupefacenti che di lì a poco avrebbero delineato un finale sorprendente a questo antico dilemma estendendo l'incredibile dualismo onda-corpuscolo anche alla materia ponderabile, suscitando accesi dibattiti tanto scientifici quanto filosofico-metodologici. In effetti i lavori di Planck e successivamente quelli di Einstein, che non rimettevano esplicitamente in discussione la natura ondulatoria della luce, ma le sovrapponevano una nuova dimensione corpuscolare in termini di pacchetti di energia come concetto "complementare", ebbero l'effetto di scatenare una crisi senza precedenti, dalla quale emergerà una nuova fisica, la meccanica quantistica.

La fisica dei principi

Ma nel 1904, nel corso del congresso di Saint-Louis, stavano appena iniziando quelli che qualcuno ha chiamato "gli incubi di un fisico classico". La fiducia in una scienza che progredisce in modo ordinato verso leggi dal carattere assoluto era definitivamente incrinata. Il discorso nel quale Poincaré cercava di valutare la fisica contemporanea ricollocandola in un contesto storico, evidenziava che nuove sfide mettevano in crisi la "fisica dei principi". La fisica stava entrando in una nuova fase di profonda trasformazione: perfino la seconda legge della termodinamica, una gloria del XIX secolo, appariva ora assumere il carattere di un "imperfetto" teorema statistico, riguardante i moti molecolari. Il "principio di Lavoisier", il sacro principio di conservazione della massa, come "massa puramente meccanica" sembrava essere messo in dubbio. Alcuni fisici proponevano che la massa dovesse avere un'origine "esclusivamente elettrodinamica" e per di più molti affermavano che la massa, di qualsiasi origine essa fosse, sembrava variare con la velocità, come appariva da osservazioni relative agli elettroni che nel corso dei processi radioattivi venivano emessi a velocità prossime a quelle della luce. Forse la meccanica statistica, suggeriva Poincaré, stava per svilupparsi in una direzione che avrebbe avuto la funzione di modello per tutta la fisica. Anche il principio di conservazione dell'energia cadeva "in discredito" di fronte alla enorme quantità di energia che sembrava immagazzinata all'interno dell'atomo, come aveva dimostrato l'esperimento di Pierre Curie.

Lo spirito del congresso di Saint-Louis del 1904, rifletteva bene i problemi nei quali si dibattevano i fisici da mezzo secolo e testimoniava anche la diversità dei punti di vista che caratterizzavano l'inizio del XX secolo: una grande sintesi era attesa e si presumeva che sarebbe stata formulata a partire da etere ed elettroni. Paul Langevin era convinto che la "concezione elettronica della materia" sarebbe stata alla base di una completa inversione del pensiero scientifico tradizionale. Nel paragonare la sintesi scientifica promessa dalla fisica dell'elettrone a una "Nuova America", Langevin respingeva la rappresentazione meccanica dei concetti elettromagnetici a favore di una "rappresentazione elettromagnetica dei principi e delle idee della meccanica ordinaria". Langevin considerava la visione elettromagnetica qualcosa che andava ben oltre una semplice possibilità teorica ed affermava che la rivoluzione elettromagnetica era ormai in atto. Oppure, come pronosticava Poincaré, stava per emergere "una meccanica del tutto nuova, della quale riusciamo a cogliere soltanto

alcuni indizi, in cui l'inerzia aumenta con la velocità, e la velocità della luce diventa un limite che non può essere superato". Nel discutere l'esperimento di Michelson e Morley e il principio di relatività, che fra tutti sembrava il più saldo, Poincaré si era avvicinato in modo significativo ai temi che sarebbero stati oggetto della critica radicale di Einstein. Forse, egli diceva, "La meccanica ordinaria, più semplice, costituirebbe una prima approssimazione, poiché resterebbe valida per velocità non troppo grandi, così che ritroveremmo ancora la vecchia dinamica all'interno della nuova. Non dovremmo rimproverarci di aver creduto nei principi... il modo più sicuro dovrebbe ancora essere in pratica quello di agire come se continuassimo a crederci... Decidere di escluderli del tutto sarebbe come privarsi di un'arma preziosa. In conclusione mi affretto ad affermare che non è ancora il momento, niente prova che i principi non usciranno fuori dalla lotta vittoriosi e intatti".

Soltanto un anno dopo, *l'annus mirabilis* di Einstein inaugurerà una stagione radicalmente nuova per la fisica: i principi costituiranno una vera e propria guida per la formulazione di nuove teorie. Nel sottolineare che "... i fenomeni elettrodinamici, al pari di quelli meccanici, non possiedono proprietà corrispondenti all'idea di quiete assoluta", Einstein si porrà nella linea inaugurata da Galilei e proseguita con Newton: "... per tutti i sistemi di coordinate per i quali valgono le equazioni della meccanica varranno anche le stesse leggi elettrodinamiche e ottiche. Eleveremo questa congettura (il contenuto della quale verà detto, in quanto segue, "principio di relatività") al rango di postulato; supporremo inoltre – un postulato, questo, solo apparentemente incompatibile col precedente – che la luce, nello spazio vuoto, si propaghi sempre con una velocità determinata, c , che non dipende dallo stato di moto del corpo che la emette. Questi due postulati bastano per giungere a una teoria elettrodinamica dei corpi in movimento, semplice e coerente, fondata sulla teoria di Maxwell per i corpi stazionari. L'introduzione di un "etere luminifero" si manifesterà superflua...". Il prezzo da pagare era che al concetto di simultaneità di due eventi non si poteva più "attribuire alcun significato *assoluto*, e che eventi giudicati simultanei in un certo sistema di coordinate, in un altro sistema che sia in moto rispetto ad esso non sono più da considerare tali". Partendo dai due postulati Einstein riuscì a ottenere come conseguenza le stesse equazioni di trasformazione delle coordinate spaziali e temporali nel passaggio da un sistema di riferimento inerziale a un altro che Lorentz aveva derivato *ad hoc* per giustificare i

fenomeni osservati e necessarie per generalizzare le trasformazioni di Galilei a sistemi di riferimento in moto relativo uniforme a velocità prossime a quella della luce. La teoria di Einstein sarà ribattezzata teoria della relatività, ma il suo concetto fondante è l'*invarianza*: invarianza della velocità della luce e invarianza delle equazioni della meccanica e dell'elettromagnetismo.

Questa posizione sarà radicalizzata da Einstein alla ricerca di una "estensione del postulato di relatività a sistemi di coordinate in moto non uniforme l'uno relativamente all'altro". Se la teoria speciale della relatività – "un gioco da ragazzi", come lui stesso scriverà ad Arnold Sommerfeld nel 1912 – aveva profonde radici nella fisica classica, la relatività generale ("Le leggi della fisica debbono essere di natura tale che le si possa applicare a sistemi di riferimento comunque in moto") sarà il risultato di un salto in un mondo completamente nuovo per la fisica, e avverrà dopo sette anni di strenuo lavoro in cui Einstein sarà obbligato ad utilizzare strumenti che perfino i matematici dell'epoca consideravano qualcosa di "esotico", pure curiosità formali. La teoria generale della relatività fu una creazione individuale, solitaria, una geniale intuizione, poggiata però su solide basi matematiche in primo luogo sulla geometria non euclidea, elaborata nel secolo XIX da Riemann, ma anche sulla utilizzazione di uno strumento matematico di difficile accesso, il calcolo differenziale assoluto, che, sorto con le ricerche di Gauss, Riemann e Christoffel, in quel periodo era stato sistematicamente sviluppato da due grandi matematici italiani, Gregorio Ricci-Curbastro e Tullio Levi-Civita.

Le equazioni di Einstein stabilivano con esattezza come lo spazio-tempo prodotto dalle masse che vi si trovano viene curvato a causa della presenza di tale materia. Egli era stato quindi in grado di calcolare quale avrebbe dovuto essere la curvatura dei raggi emessi da una certa stella, situata in un certo preciso momento dietro il sole, quasi ai margini del disco solare, prevedendo che la stella sarebbe stata visibile in un luogo diverso da quello che si attendeva. Il 29 maggio del 1919, nel corso di una eclissi solare, la previsione fu puntualmente confermata. Avutane notizia per mezzo di un telegramma inviatogli da Lorentz, sembra che Einstein abbia commentato: "In caso contrario mi sarebbe dispiaciuto per il buon Dio, perché la teoria è corretta".

Era iniziata la carriera ufficiale della "relatività", mentre Einstein d'un sol colpo elevato al rango di Newton, era destinato a divenire uno dei miti del

XX secolo e oltre, sinonimo di genio, icona di saggezza, creatività e immaginazione.