

LA FISICA TRA OTTOCENTO E NOVECENTO

di Lorenzo Mazzone

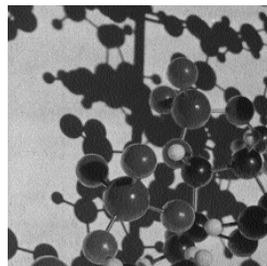
Il contenuto di una lezione tenuta a un corso di aggiornamento a carattere interdisciplinare, per insegnanti di Scuola Superiore, svoltosi nella Repubblica di San Marino nel mese di settembre 1997. Il percorso storico e concettuale della lezione può avere una traduzione didattica come introduzione alle tematiche della fisica moderna.

Nella seconda metà dell'Ottocento lo statuto delle scienze fisiche sembrava così consolidato, da ritenere «dettagli» i problemi ancora aperti. Ma, nel periodo a cavallo fra i due secoli, avviene un profondo sconvolgimento, come testimoniano due brevi citazioni di Planck e Einstein, risalenti ai primi anni del Novecento.

«CHI CONTEMPLI DALL'ALTO E DA UNA CERTA DISTANZA LO STATO ATTUALE DELLE TEORIE FISICHE NON PUÒ SOTTRARSI ALL'IMPRESSIONE CHE I NUMEROSI NUOVI REPERTI SPERIMENTALI, IN PARTE DEL TUTTO IMPREVISTI, ABBIANO PORTATO LO SCOMPIGLIO NEL CAMPO DELL'INDAGINE TEORICA, CHE SEMBRA ORMAI COSTRETTA A CAMMINARE A TASTONI, MENTRE NEL PERIODO PRECEDENTE, CHE BEN A RAGIONE FU DETTO CLASSICO, PROCEDeva CON TANTA TRANQUILLA E ILLUMINATA SICUREZZA. VENGONO DOVUNQUE ATTACCATE DELLE VECCHIE IDEE CHE PAREVANO AVER SALDISSIME RADICI, VENGONO ROVESCIAI DEI PRINCIPI GIÀ RICONOSCIUTI DA TUTTI COME VERI, ED AL LORO POSTO SI METTONO DELLE NUOVE IPOTESI SPES- SO TANTO ARDITE CHE NON PAIONO ADATTE AD ACCRESCERE LA FIDUCIA IN UN PROGRESSO CONTINUO E CONSAPEVOLE DELLA SCIENZA. LA FISICA TEORICA ODIERNA PUÒ FAR L'IMPRESSIONE DI UN VECCHIO E VENERABILE EDIFICIO CHE VA IN SFACOLO, DI CUI UN PEZZO DOPO L'ALTRO SI STACCA E CADE, MENTRE GLI STESSI MURI MAESTRI MINACCIA- NO DI VACILLARE .»¹

«E ORA BASTA, NEWTON, PERDONAMI; TU HAI TROVATO LA SOLA VIA CHE, AI TUOI TEMPI, FOSSE POSSIBILE PER UN UOMO DI ALTISSIMO INTELLETTO E POTERE CREATIVO. I CONCETTI CHE TU HAI CREATO GUIDANO ANCOR OGGI IL NOSTRO PENSIERO NEL CAMPO DELLA FISICA, ANCHE SE ORA NOI SAPPIAMO CHE DEVONO ESSERE SOSTITUITI CON ALTRI ASSAI PIÙ DISCOSTI DALLA SFERA DELL'ESPERIENZA IMMEDIATA, SE SI VORRÀ RAGGIUNGERE UNA CONOSCENZA PIÙ PROFONDA DEI RAPPORTI FRA LE COSE.»²

Questa situazione di profonda crisi che porta alla revisione dei concetti della fisica, può essere meglio compresa se, sia pur brevemente, richiamiamo il processo storico che l'ha preceduta.



¹M. Planck, *Nuovi orizzonti della fisica*, 1913, in: *La conoscenza del mondo fisico*, Boringhieri, Torino 1964, pp. 66 - 67.
²A. Einstein, *Autobiografia scientifica*, Boringhieri, Torino 1979, p. 24.

Situazione iniziale: trionfo del meccanicismo

La fisica nasce essenzialmente nel Seicento con lo studio del problema del moto. Con la critica della fisica aristotelica, e l'introduzione del metodo sperimentale, dovute a Galileo, e con l'affermarsi delle leggi della meccanica, enunciate da Newton, la fisica arriva al suo primo grande risultato: la descrizione adeguata del moto dei pianeti con l'introduzione di una forza fondamentale della natura, l'interazione gravitazionale.

Già a partire dalla fine del Settecento la meccanica estende il suo campo dal macroscopico al microscopico (teoria cinetica dei gas, termodinamica, interpretazione dei fenomeni elettrici con la forza di Coulomb), provocando il lento tramonto delle teorie fluidiche.

Si afferma l'idea che ogni fenomeno fisico sia interpretabile in termini di particelle che interagiscono tramite forze, secondo le leggi della meccanica newtoniana.

«LO STATO ATTUALE DEL SISTEMA DELLA NATURA CONSEGUE EVIDENTEMENTE DA QUELLO CHE ERA ALL' Istante PRECEDENTE E SE NOI IMMAGINASSIMO UN'INTELLIGENZA CHE A UN Istante DATO COMPRENDESSE TUTTE LE RELAZIONI FRA LE ENTITÀ DI QUESTO UNIVERSO, ESSA POTREBBE CONOSCERE LE RISPETTIVE POSIZIONI, I MOTI E LE DISPOSIZIONI GENERALI DI TUTTE QUELLE ENTITÀ DI QUALUNQUE Istante DEL PASSATO O DEL FUTURO.»³



Pierre Simon de Laplace
(1749-1827)

Il Settecento vede sempre più affermarsi l'interpretazione dei fenomeni naturali con le leggi della meccanica, che si avvia ad estendere il suo dominio su fenomeni fisici, come il calore, prima studiati in base ad altre ipotesi, in generale di natura fluidica.

Il successo della teoria cinetica dei gas, dovuta a Clausius, pone le premesse per un'estensione della meccanica al mondo microscopico. Questo processo si fonda sulla convinzione che le proprietà macroscopiche dei corpi, espresse da parametri sperimentali, possano essere riconducibili al moto e alle interazioni dinamiche dei loro costituenti elementari.

Inoltre, il fatto che le leggi della dinamica siano deterministiche, cioè che, note le condizioni iniziali, sia possibile prevedere in modo univoco l'evoluzione del sistema, accresce la fiducia nel potere conoscitivo della scienza meccanica fino a portare, nelle estrapolazioni filosofiche di fine Settecento, a concepire tutto l'universo come una grande macchina di cui è possibile scoprire l'esatto funzionamento.

Proprio da questa situazione iniziamo l'analisi dei punti problematici che, lungo il corso dell'Ottocento, porteranno la fisica classica alla sua crisi definitiva, come pretesa di una descrizione adeguata di tutta la realtà.

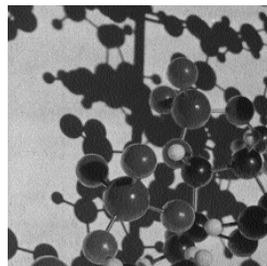
Punti di «crisi» nel primo Ottocento

Il primo problema riguarda l'interpretazione dei fenomeni luminosi. Nel Settecento il modello prevalente è quello corpuscolare di Newton, ma le evidenze sperimentali del primo Ottocento mostrano, fuor da ogni possibile dubbio, che la luce è un'onda. La natura ondulatoria della luce non costituisce, di per sé, un grave problema: le onde non sono altro che l'applicazione della meccanica a fenomeni che avvengono in corpi estesi in cui sono presenti delle forze interne di tipo elastico, o che si possono trattare come tali. Il vero problema sorge dal fatto che la luce si propaga nello spazio cosmico, cioè in uno spazio apparentemente vuoto di materia.

Per salvare la concezione meccanicistica, bisogna supporre che lo spazio sia riempito di un mezzo materiale, l'«etere», che renda possibile la propagazione di un'onda. Un'ipotesi scientifica richiede una prova sperimentale! Lungo l'Ottocento si susseguono le ipotesi sulla natura e le caratteristiche di questo mezzo, al fine di ideare un esperimento per rivelarne l'esistenza. Questa ricerca approderà, con l'opera di Einstein, a una delle svolte fondamentali del primo Novecento.

Per i fenomeni elettrici e magnetici invece rimane aperta la domanda se esistano interazioni fra cariche elettriche e poli magnetici: la risposta sarà positiva con l'esperienza di Oersted, che però darà il via alla crisi del meccanicismo.

L'esperienza di Oersted evidenzia un'influenza delle correnti sugli aghi magnetici. Il risultato dell'esperienza non è interpretabile con l'introduzione di una forza fra il filo e il magnete. Dopo oltre un decennio di tentativi interpretativi, grazie soprattutto all'opera di Faraday, si afferma il concetto di campo. Con la formalizzazione matematica costituita dalle equazioni di Maxwell, il campo, prima strumento per una rappresentazione matematico-fisica, diviene un vero e proprio ente fisico.



³P.S. Laplace, 1776, in: G. Casati (a cura di), *Il Caos, le leggi del disordine*, Le Scienze, Milano 1991.

NATURA ONDULATORIA DELLA LUCE

Contrapposta alla teoria corpuscolare di Newton. La natura della luce è problematica, perché non facilmente riducibile al concetto di onda meccanica che richiede un mezzo per propagarsi, mentre la luce viaggia nel vuoto.

ESPERIMENTO DI OERSTED

segna l'inizio dello studio dei fenomeni elettromagnetici che, nonostante tutti i tentativi (fra i quali rilevante quello di Ampère) non risultano interpretabili con la meccanica newtoniana, ma richiedono un nuovo concetto, quello di campo, estraneo alla meccanica.



Michael Faraday
(1791-1867)

«NELL'ESPERIMENTO DI FARADAY OCCORRE UN CIRCUITO CHIUSO PER VERIFICARE L'ESISTENZA DEL CAMPO ELETTRICO, COSÌ COME OCCORRE UN POLO O UN AGO MAGNETICO NELL'ESPERIMENTO DI OERSTED PER ACCERTARE L'ESISTENZA DI UN CAMPO MAGNETICO. MA LA NUOVA IDEA TEORICA DI MAXWELL VA OLTRE QUESTI DATI SPERIMENTALI. NELLA TEORIA DI MAXWELL IL CAMPO ELETTRICO E MAGNETICO, ALTRIMENTI DETTO IL CAMPO ELETTROMAGNETICO, È QUALCOSA DI REALE. IL CAMPO ELETTRICO È GENERATO DA UN CAMPO MAGNETICO VARIANTE, INDIPENDENTEMENTE DALLA PRESENZA DI UN FILO PER ACCERTARNE L'ESISTENZA, COSÌ COME UN CAMPO MAGNETICO È GENERATO DA UN CAMPO ELETTRICO VARIANTE, ANCHE SE MANCA LA PRESENZA DI UN POLO MAGNETICO PER CONSTATARLO. LE EQUAZIONI DI MAXWELL [...] SONO LEGGI VALIDE NELL' INTERO SPAZIO E NON SOLTANTO NEI PUNTI IN CUI MATERIA E O CARICHE ELETTRICHE SONO PRESENTI, COM' È IL CASO PER LE LEGGI MECCANICHE [...]. PER IL FISICO MODERNO, IL CAMPO ELETTROMAGNETICO È ALTRETTANTO REALE QUANTO LA SEDIA SU CUI EGLI SIEDE.»⁴

Le equazioni di Maxwell permettono inoltre di prevedere l'esistenza di onde elettromagnetiche, che, nel vuoto, hanno esattamente la velocità della luce: si chiarisce quindi la natura della luce come onda elettromagnetica!

Fine Ottocento: convivenza di due teorie

ELETTROMAGNETISMO

Sintesi nelle equazioni di Maxwell, dove il concetto dominante è quello di campo, che descrivono i fenomeni elettromagnetici, nonché la propagazione delle onde elettromagnetiche, a cui appartiene anche la luce.

MECCANICA NEWTONIANA

Integrata dal concetto di conservazione dell'energia, che descrive il comportamento dei corpi materiali.

Il collegamento tra le due teorie è costituito dalla forza elettromagnetica, espressa in termini di campo agente sulle cariche elettriche:

$$\vec{F} = q (\vec{E} \wedge \vec{B})$$

Alla fine dell'Ottocento il quadro scientifico è profondamente modificato dall'esistenza di un concetto, quello di campo, non riducibile alle leggi della meccanica.

I due insiemi di leggi, quelle dell'elettromagnetismo e quelle della meccanica, partecipano di alcuni postulati fondamentali quali il determinismo delle leggi fisiche e l'esistenza di uno spazio-tempo assoluto, e si spartiscono, per così dire, i campi dell'indagine che,

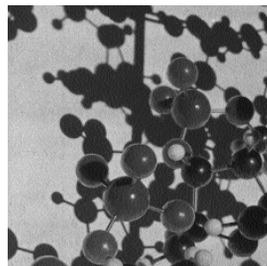
nella seconda metà dell'Ottocento sembra rivolta a fenomeni che avvengono nel microscopico: tutto ciò che si identifica come «radiazione» sarà descritto dall'elettromagnetismo; tutto ciò che si identifica come «particella» sarà descrivibile con le leggi della meccanica. Tuttavia nuove evidenze sperimentali e l'aggravarsi di problemi teorici e interpretativi di nuovi fenomeni complicano rapidamente anche questo quadro di riferimento.

La crisi di fine Ottocento

Una serie di dati sperimentali di difficile interpretazione e di problemi teorici insolubili nell'ambito delle teorie classiche innescano una profonda revisione dei concetti fisici. L'esito di questo processo di riflessione è la nascita, indipendente, di due teorizzazioni, la relatività e la meccanica quantistica.

La relatività nasce come risposta a due problemi: la natura contraddittoria dell'etere e l'incompatibilità fra leggi dell'elettromagnetismo e principio di relatività nella forma in cui è espresso dalle trasformazioni di Galileo. Essa costituisce un ripensamento della struttura dello spazio-tempo, così come concepito nella meccanica newtoniana, e non costituisce in questo senso uno stravolgimento del quadro classico, anche se le sue conseguenze, dal punto di vista delle previsioni e dell'immagine dell'Universo, sono in qualche caso sconvolgenti.

La meccanica quantistica nasce come affronto problematico del-



*A. Einstein, L. Infeld, *L'evoluzione della fisica*, Boringhieri, Torino 1983, pp. 155 - 161.

NUOVE EVIDENZE SPERIMENTALI

- scoperta delle emissioni radioattive
- scoperta degli elettroni
- spettro del corpo nero
- legge delle righe spettrali dell'atomo di idrogeno
- effetto fotoelettrico
- scoperta del nucleo atomico

PROBLEMI TEORICI

- non invarianza delle leggi dell'elettromagnetismo rispetto alle trasformazioni di Galileo, e problema dell'etere come riferimento assoluto
- impossibilità di trovare una spiegazione teorica dello spettro del corpo nero
- impossibilità di dare una spiegazione degli spettri discreti (di emissione e di assorbimento) degli atomi
- instabilità intrinseca del modello atomico planetario e sua incapacità di rendere conto dei dati sperimentali.
- interpretazione dell'effetto fotoelettrico, che mostra una «frequenza di soglia» contraddittoria con le leggi dell'elettromagnetismo

l'interazione radiazione-materia e ha come esito un quadro teorico completamente diverso da quello classico per quello che riguarda la materia a livello atomico e subatomico, in cui il concetto di particella non ha più niente a che vedere con quello classico di punto materiale e dove il determinismo delle leggi fisiche viene in parte messo in crisi, soprattutto per quello che riguarda il comportamento di una singola particella.

La teoria della relatività

RELATIVITÀ RISTRETTA

IPOTESI

- il principio galileiano di relatività vale per tutti i fenomeni fisici
- la velocità della luce nel vuoto è la stessa in tutti i sistemi di riferimento

CONSEGUENZE

- trasformazioni di Lorentz invece di quelle di Galileo
- le misure dei tempi e delle lunghezze dipendono dal sistema di riferimento
- la velocità della luce è una velocità limite nell'universo
- la massa inerziale non è costante ma dipende dalla velocità
- la massa e l'energia totale di un corpo sono legate dalla legge $E = mc^2$

RELATIVITÀ GENERALE

IPOTESI

- principio di equivalenza: massa inerziale e massa gravitazionale «devono» coincidere

CONSEGUENZE

- ogni sistema è «localmente» inerziale: le leggi fisiche possono essere enunciate in qualsiasi sistema di riferimento
- lo spazio-tempo in presenza di massa non è euclideo: l'universo è curvo (e non è statico: deve espandersi o contrarsi)

Nella fisica classica, e anche nel contesto epistemologico e filosofico che l'accompagna, permane la concezione dell'esistenza di uno spazio vuoto assoluto euclideo, e di un tempo che scorre in modo anch'esso assoluto.

Tali concetti sono considerati in qualche modo di per sé evidenti già da Newton «Non definisco tempo, spazio luogo e moto, in quanto notissimi a tutti.»⁵ Kant identifica spazio e tempo assoluti come categorie «a priori», quindi non deducibili dall'esperienza, ma necessarie per organizzare ogni esperienza sensibile.

I sistemi di riferimento validi sono quelli in moto «oggettivamente» rettilineo uniforme rispetto allo spazio assoluto (e quindi l'uno rispetto all'altro).

Le leggi di trasformazione delle coordinate, stabilite da Galileo, assicurano che in tutti questi sistemi l'accelerazione di un corpo ha sempre lo stesso valore, e quindi la validità della legge fondamentale della dinamica, espressa in termini di forza e accelerazione, è indipendente dal sistema di riferimento prescelto. In tali trasformazioni l'ipotesi implicita di uno spazio e di un tempo assoluti si traduce nell'assunzione che i valori degli intervalli temporali e quello delle lunghezze siano gli stessi in tutti i sistemi di riferimento.

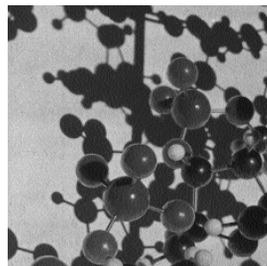
La rivoluzione einsteiniana è totale. La sua preoccupazione, nella teoria della relatività, è paradossalmente la ricerca di un assoluto, la validità delle leggi fisiche indipendentemente dal sistema di riferimento.

Per far questo è necessario supporre che la velocità della luce sia la stessa in tutti i sistemi di riferimento. Ciò porta a nuove leggi di trasformazione delle coordinate da un sistema all'altro (trasformazioni di Lorentz) in cui il tempo non è più indipendente dallo spazio e dal moto. Con queste ipotesi non è più necessario supporre l'esistenza dell'etere, e le leggi dell'elettromagnetismo sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento. Non esiste più quindi uno spazio assoluto, e anche lo scorrere del tempo dipende in qualche modo dal sistema di riferimento: la lunghezza di un segmento e la durata di un intervallo temporale dipendono dal sistema di riferimento prescelto.

Non è possibile entrare nello specifico della teoria in questa sede, però vogliamo fare alcune osservazioni:

- a) la teoria di Einstein mostra che i concetti fisici non sono degli assoluti, ma soggetti ad una evoluzione, contrariamente a quanto pensava Kant;
- b) la teoria della relatività si salda con quella classica, perché le sue equazioni coincidono con quelle classiche per velocità molto inferiori a quelle della luce;
- c) la teoria della relatività non afferma che «tutto è relativo», ma fonda in modo nuovo e più corretto il principio di causalità. Ad esempio, la relatività del valore dei tempi non distrugge mai l'ordine degli eventi, quando questi possano essere fisicamente collegati da una qualsiasi azione (il prima e il dopo sono in questo caso concetti assoluti!);
- d) la teoria della relatività ristabilisce il principio di relatività galileiano, estendendolo dalla meccanica a tutti i fenomeni fisici;
- e) l'estensione delle leggi della relatività a uno spazio in cui è presente materia trasforma lo studio di una forza gravitazionale che agisce su corpi che si muovono in uno spazio euclideo nello studio di uno spazio curvo non euclideo: in qualche modo la fisica delle forze gravitazionali viene ridotta a pura geometria!

Si potrebbe pensare alla relatività come a un'astrazione che riguarda un ristretto numero di pensatori, ma la cui importanza sperimentale e pratica è trascurabile, dato che essa diverge dai risultati della meccanica classica solo per velocità vicine a quella della luce, o per interazioni gravitazionali a livello cosmologico. Sono scale di grandezze



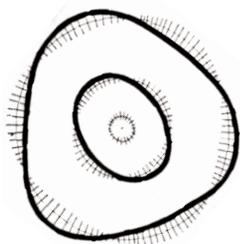
I. Newton, *Principia*,
cit. in: M. Jammer, *Storia del
concetto di spazio*, Feltrinelli,
Milano 1963.

molto lontane dall'esperienza quotidiana!

Tuttavia non è così, almeno a livello della fisica del Novecento. Essa si è dedicata allo studio delle particelle elementari, dove velocità relativistiche (cioè dell'ordine di grandezza di quella della luce) sono consuete: solo applicando formule relativistiche è possibile studiare il loro comportamento. Di più, la conversione di massa in energia diventa per le forze nucleari un evento misurabile e rilevante, dando fra l'altro origine ai fenomeni di fissione e fusione nucleare, che tanta importanza, nel male e nel bene, stanno avendo sulla nostra stessa società.

Se poi analizziamo le conseguenze della relatività generale, constatiamo che essa è lo strumento adeguato per la descrizione della struttura dell'Universo, che ha contribuito alla «rivoluzione cosmologica», che ha prodotto il nuovo modello di Universo, quello del «big bang», chiudendo in qualche modo una crisi nella concezione del cosmo che si era aperta con la rivoluzione copernicana.

In conclusione la svolta costituita dalla relatività consiste essenzialmente in una concezione molto più raffinata della struttura dello spazio-tempo che, paradossalmente, garantisce una condizione molto più generale di validità delle leggi fisiche, e che ricrea una nuova forma di simmetria dell'Universo nelle sue applicazioni alla cosmologia.



Onde di De Broglie adattate alle orbite quantiche nel modello atomico di Bohr

La meccanica quantistica

SVILUPPO DELLA MECCANICA QUANTISTICA

IPOTESI AD HOC DEI QUANTI

- permette di dare una corretta descrizione dello spettro di corpo nero
- spiega il comportamento dell'effetto fotoelettrico
- fornisce un modello stabile dell'atomo di idrogeno (atomo di Bohr), che permette di prevedere la legge delle righe spettrali

DUALISMO ONDA CORPUSCOLO, espresso dal principio di corrispondenza di De Broglie:

- anche le particelle (protoni, elettroni) possono comportarsi come onde (per esempio dando luogo a una figura di diffrazione)
- una particella in uno stato legato si comporta come un'onda stazionaria

FORMALISMO DELLA MECCANICA QUANTISTICA, basato sul concetto di funzione d'onda; si esprime in equazioni (equazione di Schrödinger) e in principi (principio di indeterminazione di Heisenberg) che creano una situazione del tutto nuova nel mondo subatomico. In particolare:

- sparisce il concetto classico di particella, che ha una posizione e velocità ben definite
- sono previsti (e si verificano sperimentalmente) fenomeni (come l'effetto tunnel) impensabili nella fisica classica, resi possibili dalla non conservazione dell'energia per brevi periodi, secondo la legge stabilita dal principio di indeterminazione
- le leggi che regolano il comportamento delle particelle subatomiche sono probabilistiche e non strettamente deterministiche

La maggior parte dei nuovi dati sperimentali riguarda l'emissione o l'assorbimento di radiazione elettromagnetica da parte della materia. Il fatto che non si riesca a spiegarli ponendo in relazione l'elettromagnetismo (per la descrizione della radiazione) con la meccanica (per il moto delle particelle) porta a una situazione di non ritorno; si è incontrato un limite ultimo della meccanica classica che, applicata ai fenomeni microscopici di interazione radiazione-materia, porta a previsioni in contrasto con i dati sperimentali o addirittura catastrofiche, come la previsione che tutta la materia è instabile!

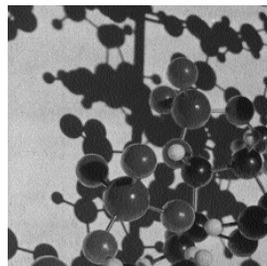
Analizziamo proprio il problema in cui ciò avviene in modo più evidente. I dati sperimentali mostrano che l'atomo è composto di elettroni (Thomson, 1897) e di un nucleo (Rutherford, 1913) in cui risiede la quasi totalità della massa dell'atomo. Di qui vien quasi naturale un modello planetario dell'atomo. Tale modello riesce anche a prevedere la corretta energia di ionizzazione dell'idrogeno, ma il suo successo termina qui: l'elettrone ruota con una frequenza così elevata che per le leggi dell'elettromagnetismo dovrebbe emettere in continuazione radiazioni ad alta frequenza, perdendo energia e cadendo sul nucleo in un frazione di secondo. Ma la materia comune non collassa affatto, anzi è perfettamente stabile!

La soluzione del problema avviene per gradi, prima con nuove ipotesi *ad hoc*, poi con una teorizzazione sempre più raffinata. In particolare, la conclusione che le leggi di comportamento delle particelle elementari sono intrinsecamente probabilistiche costituisce un punto determinante nella svolta epistemologica del novecento.

Anche nella meccanica classica, ed esattamente nella meccanica statistica, sono previste situazioni in cui, nello studio di sistemi a molte particelle, le previsioni sono solo statistiche, in generale rivolte a proprietà medie del sistema. Ciò è però dovuto a una scelta: quella di non studiare il moto dei singoli componenti del sistema, che fra l'altro non interessa, in quanto i parametri significativi del sistema sono definiti solo dalle proprietà medie. Un esempio classico è quello delle leggi dei gas e, più in generale, di quelle della termodinamica. Un gas perfetto è descritto da tre parametri: pressione, volume e temperatura. La legge di stato che li collega può essere dedotta dalle proprietà medie del moto delle particelle del gas, il cui comportamento singolo non interessa al fine del comportamento macroscopico del sistema.

Nulla escluderebbe, in linea di principio, lo studio di un comportamento «esatto» del gas, anche se richiederebbe metodi di osservazione e di calcolo molto complicati.

Le particelle della meccanica quantistica sono qualcosa di più complesso, che non può essere descritto con le leggi della meccanica classica. Infatti ogni particella, a seconda delle situazioni sperimentali, può essere descritta, in casi limite, come una particella della meccanica classica oppure come un'onda: questa doppia natura



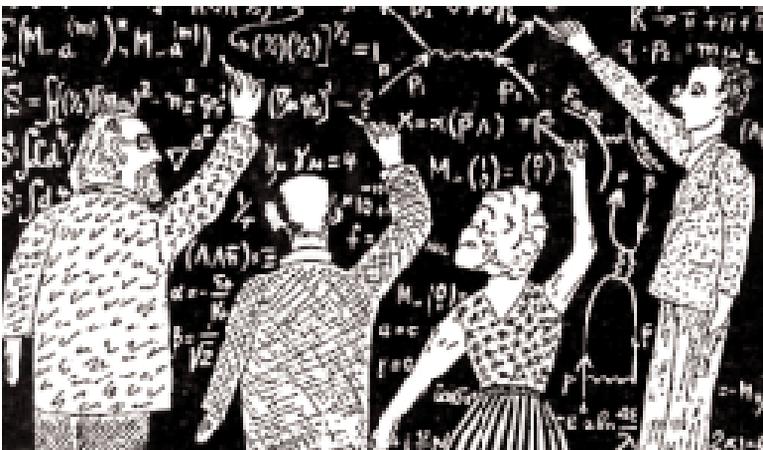
comporta una serie complicazioni nel suo studio. In particolare non può essere contemporaneamente misurata con estrema precisione la sua posizione e la sua velocità: il prodotto dell'errore delle due misure non può essere, neppure teoricamente, inferiore alla costante h di Planck divisa per 2π .

Questa indeterminazione, enunciata da Heisenberg nel famoso principio, taglia alla radice la possibilità di un rigoroso determinismo laplaciano nella descrizione del comportamento delle particelle elementari. Queste due affermazioni, che riassumiamo come: impossibilità di una descrizione «oggettiva» delle particelle elementari, perché la modalità descrittiva dipende non solo dalle particelle, ma dal particolare apparato sperimentale usato per studiarle e impossibilità di osservare contemporaneamente con precisione i parametri caratteristici, costituiscono, in quella che è stata chiamata «interpretazione di Copenaghen» (città di Bohr) della meccanica quantistica, uno *status* «definitivo» della fisica delle particelle elementari, cioè non modificabile da nuove scoperte o teorizzazioni.

L'impossibilità di una descrizione pienamente deterministica del mondo subatomico ha posto non pochi problemi di natura epistemologica. Una completa generalizzazione e una estrapolazione filosofica dell'interpretazione di Copenaghen possono portare alla negazione di una realtà oggettiva e a un fondamentale relativismo. Una posizione corretta può essere quella di non cedere a eccessive generalizzazioni, ma di ricercare i motivi strettamente fisici di questa situazione.

Uno dei motivi va ricercato nel fatto che, a livello delle particelle elementari, non è possibile una separazione completa fra osservatore e osservato: la descrizione è in qualche modo soggettiva,

non nel senso in cui intendiamo questa parola nelle relazioni umane: vuol dire che il soggetto è determinante nell'evoluzione dell'oggetto, «perturba» inevitabilmente il comportamento dell'oggetto nell'atto stesso dell'osservazione, determinandone alcuni parametri, ma rendendone per ciò stesso indeterminati altri. Ad esempio, se si misura la posizione, si introduce per ciò stesso una indeterminazione nella velo-

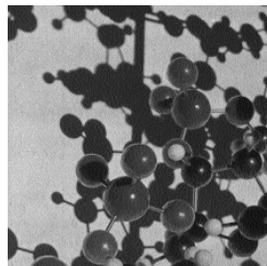


Gli scienziati dell'Istituto di Fisica Teorica di Copenaghen in un disegno di George Gamow

cità, e perciò non si sa più con esattezza dove sarà la particella in un istante successivo.

D'altronde per «vedere» un oggetto sempre più piccolo occorrono lunghezze d'onda sempre più piccole, quindi frequenze sempre maggiori, e quindi energie maggiori: l'energia di interazione è quindi notevole e perturba l'oggetto osservato. Per oggetti macroscopici questo ragionamento non vale: la luce che illumina un oggetto provoca su di esso un effetto dinamico (pur avendo tale luce una energia cinetica e una quantità di moto) assolutamente trascurabile. In altri termini una descrizione «oggettiva», cioè che non perturbi il fenomeno, è possibile solo a livello macroscopico: questo è un limite intrinseco al fatto che anche noi siamo «oggetti macroscopici». Come Heisenberg afferma:

«L'INTERPRETAZIONE DI COPENAGHEN DELLA TEORIA DEI QUANTA PARTE DA UN PARADOSSO. QUALSIASI ESPERIMENTO FISICO, SIA CHE SI RIFERISCA AI FENOMENI DELLA VITA QUOTIDIANA O AD EVENTI ATOMICI DEVE ESSERE DESCRITTO NEI TERMINI DELLA FISICA CLASSICA. I CONCETTI DELLA FISICA CLASSICA FORMANO IL LINGUAGGIO PER MEZZO DEL QUALE DESCRIVIAMO LA PREPARAZIONE DEI NOSTRI ESPERIMENTI E NE ESPRIMIAMO I RISULTATI. NON POSSIAMO, NÉ DOBBIAMO SOSTITUIRE QUESTI CONCETTI CON ALTRI. TUTTAVIA L'APPLICAZIONE DI QUESTI CONCETTI RISULTA LIMITATA DALLE RELAZIONI DI INDETERMINAZIONE [...] ESSI NON SI ACCORDANO PERFETTAMENTE CON LA NATURA. [...] LA TENSIONE FRA QUESTI DUE PUNTI DI PARTENZA [LA NECESSITÀ DI USARE I CONCETTI DELLA FISICA CLASSICA, E LA CONSAPEVOLEZZA DELLA LORO INCOMPLETA APPLICABILITÀ AL MODO MICROSCOPICO] È LA RADICE DEL CARATTERE STATISTICO DELLA TEORIA DEI QUANTA. [...] DOBBIAMO PERCIÒ METTERCI IN TESTA, COME HA DETTO VON WEIZSACKER, CHE 'LA NATURA È PRIMA DELL'UOMO, MA L'UOMO È PRIMA DELLA SCIENZA NATURALE' LA PRIMA PARTE DELL'AFORISMA GIUSTIFICA LA FISICA CLASSICA, CON IL SUO IDEALE DI COMPLETA OGGETTIVITÀ. LA SECONDA PARTE CI DICE PERCHÉ NON POSSIAMO SFUGGIRE AL PARADOSSO DELLA TEORIA DEI QUANTA, CIÒÈ ALLA NECESSITÀ DI SERVIRCI DI CONCETTI CLASSICI E NOI DOBBIAMO RICORDARE CHE CIÒ CHE OSSERVIAMO NON È LA NATURA IN SE STESSA, MA LA NATURA ESPOSTA AI NOSTRI METODI DI INDAGINE.»⁶ ▽



⁶W. Heisenberg, *Fisica e filosofia*, Il Saggiatore, Milano 1961, p. 62.

INDICAZIONI BIBLIOGRAFICHE

- A. Einstein, *La relatività, esposizione divulgativa*, Boringhieri, Torino, 1960.
 M. Jammer, *Storia del concetto di spazio*, Feltrinelli, Milano, 1963.
 E. Mach, *La meccanica nel suo sviluppo storico-critico*, Boringhieri, Torino 1977.
 T.F. Arecchi, I. Arecchi, *I simboli e la realtà*, Jaca Book, Milano 1990.