
Atomi in moto



1.1 Introduzione

Questo corso biennale di fisica viene presentato partendo dal punto di vista che il lettore intenda diventare un fisico. Ciò, naturalmente, non si verifica necessariamente, ma è quanto ogni professore, di qualsiasi materia, presume! Se il lettore diverrà un fisico, avrà molto da studiare: duecento anni del campo di conoscenza più rapidamente sviluppatosi che esista, tanta conoscenza che in effetti il lettore penserà di non poter apprendere tutta in quattro anni, e in realtà non lo potrà; dovrà seguire anche dei corsi di specializzazione!

Abbastanza sorprendentemente, malgrado la spaventosa massa di lavoro compiuto durante tutto questo tempo, è possibile condensare in gran parte l'enorme quantità dei risultati – cioè trovare *leggi* che riassumono l'intera nostra conoscenza. Ma, anche così, le leggi sono tanto difficili da recepire, che sarebbe sleale nei confronti del lettore iniziare l'indagine di questo arduo argomento senza qualche idea dei rapporti che legano tra loro i vari campi della scienza. Sulla base di queste osservazioni preliminari, i primi tre capitoli tratteranno, dunque, le relazioni tra la fisica e le altre scienze, i rapporti tra una scienza e l'altra e il significato di scienza, in modo da aiutarci a sviluppare una «percezione» dell'argomento.

Potreste chiedervi perché mai non possiamo insegnare la fisica dando semplicemente le leggi fondamentali a pagina uno e mostrando poi come funzionano in tutte le possibili circostanze, come facciamo con la geometria euclidea, dove prima stabiliamo gli assiomi e poi ne traiamo ogni genere di deduzioni. (Quindi, non soddisfatti di apprendere la fisica in quattro anni, volete impararla in quattro minuti?) Non possiamo far questo per due ragioni. Primo, non *conosciamo* ancora tutte le leggi fondamentali: vi è una frontiera di ignoranza che va espandendosi. Secondo, la corretta esposizione delle leggi della fisica implica alcune idee poco familiari, che richiedono cognizioni di alta matematica per la loro descrizione. Quindi è necessaria una considerevole quantità di istruzione preliminare anche solo per imparare cosa significano le *parole*. No, non è possibile procedere in questo modo. Possiamo procedere soltanto punto per punto.

Ciascun punto o parte dell'insieme della natura è sempre solo un'*approssimazione* all'intera verità, ossia a quella che, per quanto ne sappiamo, è l'intera verità. Infatti, tutto ciò che conosciamo è solo un qualche genere di approssimazione, perché *sappiamo di non conoscere ancora tutte le leggi*. Quindi le cose devono essere apprese solo per essere nuovamente disimparate, oppure, cosa più probabile, per essere corrette.

Il principio della scienza, quasi la sua definizione, è il seguente: *La prova di tutta la conoscenza è l'esperimento*. L'esperimento è il *solo giudice* della «verità» scientifica. Ma qual è la sorgente della conoscenza? Da dove vengono le leggi che devono essere provate? L'esperienza stessa aiuta a produrre tali leggi, nel senso che ci fornisce dei suggerimenti. Ma è pure necessaria l'*immaginazione* per creare da questi suggerimenti le grandi generalizzazioni, cioè per indovinare i meravigliosi, semplici, ma molto strani schemi che vi stanno sotto, e poi sperimentare al fine di verificare nuovamente se abbiamo indovinato gli schemi giusti.

Questo processo immaginativo è talmente difficile che nella fisica si attua una divisione del lavoro: vi sono i fisici *teorici*, che immaginano, deducono e cercano di intuire nuove leggi ma non fanno esperimenti, e i fisici *sperimentali*, che fanno esperimenti, immaginano, deducono e cercano di indovinare.

Abbiamo detto che le leggi della natura sono approssimate: che dapprima scopriamo quelle «sbagliate» e poi quelle «giuste». Ora, in che modo può un'esperienza risultare «sbagliata»? Innanzi tutto, in modo assai banale: per esempio, se vi è qualcosa di sbagliato che non avete notato nell'apparecchiatura. Ma cose di questo genere possono essere facilmente localizzate e verificate ripetutamente. Dunque, senza badare a queste cose di minor conto, come *possono* i risultati di un'esperienza essere sbagliati? Solo se sono poco precisi. Per esempio, la massa di un oggetto non sembra cambiare mai: una trottola in moto ha lo stesso peso di una ferma. Così fu inventata una «legge»: la massa è costante e non dipende dalla velocità. Ora si è scoperto che quella «legge» è inesatta. Si è scoperto che la massa aumenta col crescere della velocità, ma aumenti sensibili richiedono velocità vicine a quella della luce. Una legge *corretta* è: se un oggetto si muove con una velocità inferiore a cento miglia al secondo, la massa è costante entro una parte su un milione. In questa forma approssimata la legge è valida. Così, in pratica, si può pensare che la nuova legge non comporti una differenza significativa. Bene, sì e no. Per velocità normali possiamo certamente dimenticarla e usare la semplice legge della massa costante come una buona approssimazione. Ma, in caso di alte velocità, siamo in errore e, più alta è la velocità, maggiore è l'errore.

Infine, cosa più interessante, con la legge approssimata *siamo completamente in errore dal punto di vista filosofico*. Anche se la massa cambia soltanto di pochissimo, l'intera nostra rappresentazione del mondo deve essere modificata. Questo è un fatto caratteristico relativo alla filosofia, ossia alle idee che stanno dietro alle leggi. Anche un effetto molto piccolo richiede talvolta profondi cambiamenti nei nostri concetti.

Ora, che cosa dovremmo insegnare per prima cosa? Dovremmo forse insegnare la legge *corretta* ma poco familiare, con le sue strane e difficili idee concettuali, per esempio la teoria della relatività, lo spazio-tempo a quattro dimensioni e così via? O dovremmo prima insegnare la semplice legge della «massa costante» che è solo approssimativa ma non implica idee così difficili? La prima è più eccitante, più straordinaria e più divertente, ma la seconda è più semplice da afferrare all'inizio, ed è un primo passo verso una comprensione reale dell'altra idea. Questo dilemma si ripresenta continuamente nell'insegnamento della fisica. In tempi diversi lo risolveremo in modi diversi, però a ogni stadio vale la pena di imparare quello che è noto al momento, quale sia il grado della sua precisione, come si inserisca nel resto e come lo si possa cambiare quando ne sapremo di più.

Procediamo ora con lo schema, o quadro generale, della nostra comprensione della scienza al giorno d'oggi (della fisica in particolare, ma anche di altre scienze contigue), di modo che, quando più avanti ci concentreremo su qualche punto specifico, avremo una certa idea dello sfondo, del perché quel particolare punto sia interessante, e come esso si inserisca in una struttura più ampia. Dunque, qual è la nostra visione globale del mondo?

1.2 La materia è composta di atomi

Se per effetto di un qualche cataclisma l'intera conoscenza scientifica dovesse andare distrutta e un'unica frase venisse tramandata alle successive generazioni di esseri viventi, quale affermazione conterebbe l'informazione più ampia nel minor numero di parole? Io credo che sia l'*ipotesi atomica* (o *teoria atomica*, o comunque la si voglia chiamare), secondo cui *tutte le cose sono formate di atomi, piccole particelle che girano in moto perpetuo attraendosi l'un l'altra quando si trovano a breve distanza, ma che si respingono quando vengono pressate l'una contro l'altra*. In quest'unica affermazione, come vedrete, è contenuta un'enorme quantità d'informazione sul mondo, se la si considera con un minimo d'immaginazione e la si medita appena un po'.

Per illustrare la potenza dell'idea atomica, supponiamo di avere una goccia d'acqua delle dimensioni di un quarto di pollice. Anche se la osserviamo molto attentamente, non vediamo altro che acqua: acqua omogenea, continua. Pure ingrandendola con il miglior microscopio ottico che si possa trovare – all'incirca un ingrandimento di duemila volte – allora la goccia d'acqua sarebbe approssimativamente quaranta piedi da un estremo all'altro, cioè sarebbe grande circa quanto una stanza spaziosa, e se la osservassimo piuttosto accuratamente, vedremmo *ancora*

l'acqua relativamente omogenea – ma vedremmo qua e là piccole cose a forma di pallone che nuotano avanti e indietro. Molto interessante. Sono i parameci. A questo punto potreste fermarvi e lasciarvi incuriosire dai parameci, con le loro ciglia vibratili e i corpi che si contorcono, così da non andare oltre, tranne forse che per ingrandire ancora di più i parameci e osservarli internamente. Questo, naturalmente, è un argomento che riguarda la biologia, ma al momento lo sorvoliamo e guardiamo ancora più attentamente l'acqua in se stessa, ingrandendola altre duemila volte.

Ora la goccia d'acqua si estende per circa quindici miglia da un estremo all'altro e, se la osserviamo molto attentamente, notiamo una specie di brulichio, qualcosa che non ha più un'apparenza omogenea e ha, invece, l'aspetto di una folla presente a una partita di calcio vista da molto lontano.

Per vedere a cosa sia dovuto questo brulichio, lo ingrandiremo altre duecentocinquanta volte e avremo davanti agli occhi qualcosa di simile a ciò che è mostrato nella FIGURA 1.1. È una rappresentazione dell'acqua ingrandita un miliardo di volte, ma idealizzata sotto diversi aspetti. In primo luogo, le particelle sono disegnate in maniera semplice, con bordi netti, il che è inesatto. In secondo luogo, per semplicità esse sono abbozzate quasi schematicamente in una sistemazione bidimensionale, mentre naturalmente esse si muovono secondo tre dimensioni. Notate che esistono due specie di «bolle» o cerchi per rappresentare gli atomi di ossigeno (neri) e di idrogeno (grigi), e che ogni ossigeno ha due idrogeni legati a sé. (Ogni gruppetto formato da un ossigeno con i suoi due idrogeni è chiamato molecola.)

La rappresentazione è ulteriormente idealizzata in quanto le vere particelle in natura si agitano e rimbalzano continuamente, girandosi e torcendosi l'una intorno all'altra. Dovete quindi immaginarvi questa come una rappresentazione dinamica piuttosto che statica.

Un'altra cosa che non può essere illustrata in un disegno è il fatto che le particelle sono «appiccicate insieme», che si attraggono l'un l'altra, che questa è tirata da quella ecc. L'intero gruppo è «incollato insieme», per così dire. D'altra parte, le particelle non possono compenetrarsi tra loro. Se tentate di comprimerne due, l'una troppo aderente all'altra, esse si respingono.

Gli atomi hanno un raggio di $1 \text{ o } 2 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$. Alla lunghezza di 10^{-8} cm si dà anche il nome *angstrom* (Å), quindi possiamo dire che gli atomi hanno un raggio di $1 \text{ o } 2 \text{ Å}$. Un'altra maniera per ricordarne la misura è la seguente: se una mela è ingrandita fino ad avere le dimensioni della Terra, gli atomi della mela avranno circa le dimensioni iniziali della mela.

Immaginiamo ora questa grande goccia d'acqua con tutte queste particelle che si agitano insieme e si rincorrono l'un l'altra. L'acqua conserva il suo volume; non si separa, a causa dell'attrazione delle molecole fra di loro. Se la goccia è su un piano inclinato, dove può muoversi da un punto all'altro, l'acqua scorrerà, ma non scomparirà affatto – le parti non si scinderanno – a causa dell'attrazione molecolare. Ora il movimento di agitazione è ciò che noi rappresentiamo come *calore*: quando aumentiamo la temperatura aumentiamo il moto. Se riscaldiamo l'acqua, l'agitazione aumenta, e aumenta il volume fra gli atomi, e se il riscaldamento continua, arriva il momento in cui la forza di attrazione tra le molecole non è sufficiente a tenerle insieme ed esse *si allontanano* separandosi l'una dall'altra. Naturalmente questo è il modo con cui produciamo il vapore ricavandolo dall'acqua: aumentando la temperatura; le particelle si scindono e volano via a causa del moto accresciuto.

Nella FIGURA 1.2 è mostrata una rappresentazione del vapore. Questa rappresentazione del vapore, in un certo senso, è sbagliata: alla normale pressione atmosferica in un'intera stanza possono esservi solo poche molecole, e certo non ve ne sarebbero tre in questa figura. La maggior parte dei riquadri di queste dimensioni non ne conterrebbe nessuna – ma accidentalmente qui ne abbiamo due e mezzo o tre (tanto per non lasciare la figura completamente vuota). Ora nel caso del vapore, noi vediamo le caratteristiche molecole più chiaramente che nel caso dell'acqua. Per semplicità, le molecole sono disegnate in modo che vi sia un angolo di 120° fra gli atomi di idrogeno. In realtà l'angolo misura $105^\circ 3'$, e la distanza fra il centro di un idrogeno e il centro dell'ossigeno è di $0,957 \text{ Å}$, quindi conosciamo molto bene questa molecola.

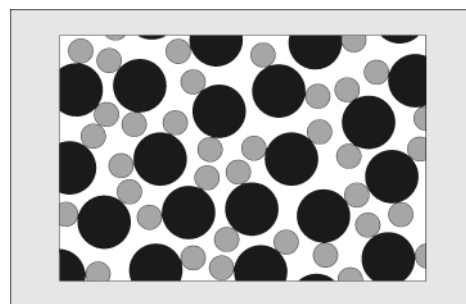


FIGURA 1.1 Acqua ingrandita un miliardo di volte.

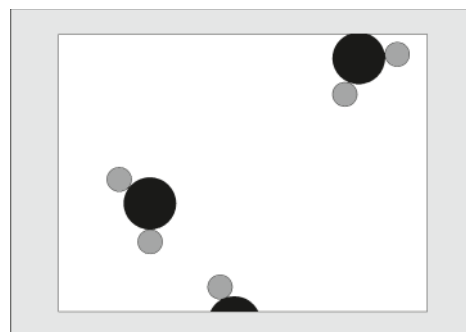


FIGURA 1.2 Vapore ingrandito un miliardo di volte.

Vediamo quali sono alcune delle proprietà del vapore acqueo o di qualunque altro gas. Le molecole, essendo separate l'una dall'altra, rimbalzano contro le pareti. Immaginate una stanza contenente un certo numero di palle da tennis (più o meno un centinaio) che rimbalzano intorno in continuo movimento. Quando esse bombardano la parete, tale bombardamento allontana la parete. (Che noi dovremo naturalmente respingere indietro.) Ciò significa che il gas esercita una forza intermittente che i nostri sensi grossolani (non essendo noi ingranditi un miliardo di volte) avvertono solo come *spinta media*. Se vogliamo confinare un gas dobbiamo applicare una pressione.

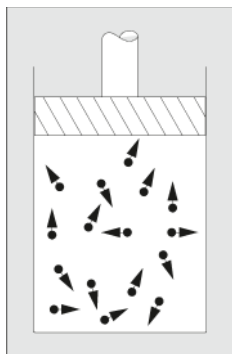


FIGURA 1.3 Gas in un cilindro munito di pistone.

La FIGURA 1.3 mostra un recipiente tipo per contenere i gas (usato in tutti i libri di testo), vale a dire un cilindro all'interno del quale è posto un pistone. Ora, non ha importanza alcuna quali siano le forme delle molecole d'acqua, così, per semplicità, le disegneremo come palle da tennis o puntini. Tali oggetti sono in continuo movimento in tutte le direzioni. Tante molecole vanno a colpire continuamente il pistone e, per impedire che esso venga progressivamente spinto fuori dal cilindro (colpito da questo continuo picchiare), dovremo spingerlo giù con una certa forza, che chiamiamo *pressione* (in realtà, la forza è data dal prodotto della pressione per l'area). Chiaramente la forza è proporzionale all'area, perché se aumentiamo l'area ma manteniamo uguale il numero delle molecole per centimetro cubo, aumentiamo il numero di collisioni con il pistone nelle stesse proporzioni in cui è stata aumentata l'area.

Mettiamo ora in questo recipiente il doppio di molecole, in modo da raddoppiare la densità e lasciarle alla stessa velocità, cioè alla stessa temperatura. Con una buona approssimazione il numero delle collisioni verrà raddoppiato e, poiché ciascuna sarà tanto «energica» quanto quelle di prima, la pressione sarà proporzionale alla densità. Se consideriamo la vera natura delle forze tra gli atomi, ci aspetteremo una leggera diminuzione di pressione a causa delle attrazioni tra gli atomi e un leggero aumento per il volume limitato che essi occupano. Nondimeno, con un'ottima approssimazione, se la densità è sufficientemente bassa cosicché non vi siano molti atomi, *la pressione sarà proporzionale alla densità*.

Possiamo anche vedere qualche altra cosa: se aumentiamo la temperatura senza variare la densità del gas, cioè se aumentiamo la velocità degli atomi, che accadrà alla pressione? Ebbene, gli atomi colpiranno più forte perché si muovono più celermente, e, in aggiunta, essi colpiranno più spesso cosicché la pressione aumenterà. Vedete quanto siano semplici le idee della teoria atomica.

Consideriamo un'altra situazione. Supponiamo che il pistone muova verso l'interno, di modo che gli atomi vengano lentamente compressi in uno spazio più ristretto. Che accade quando un atomo colpisce il pistone in movimento? Evidentemente esso guadagna velocità dalla collisione. Potete provarlo facendo per esempio rimbalzare una pallina da ping pong contro una racchetta che muove in avanti: troverete che essa se ne distacca con velocità maggiore di quella con cui l'ha colpita. (Esempio particolare: se per caso un atomo è fermo e il pistone lo colpisce, esso si muoverà sicuramente.) Dunque gli atomi sono «più caldi» quando si allontanano dal pistone di quanto non lo fossero prima di colpirlo. Quindi tutti gli atomi che sono nel recipiente avranno guadagnato velocità. Ciò significa che, *quando comprimiamo lentamente un gas, la temperatura del gas aumenta*. Dunque, sotto una lenta *compressione* un gas *aumenterà* di temperatura, e sotto una lenta *espansione* *raffredderà*.

Ritorniamo alla nostra goccia d'acqua e vediamo un altro aspetto del suo comportamento. Supponiamo di diminuire la temperatura della goccia d'acqua. Supponiamo che l'agitazione delle molecole e degli atomi nell'acqua sia in continua diminuzione. Sappiamo che tra gli atomi esistono delle forze di attrazione, sicché dopo un po' essi non saranno capaci di agitarsi altrettanto bene. Ciò che accadrà a temperatura molto bassa è indicato nella FIGURA 1.4: le molecole si bloccheranno in una nuova struttura che è quella del *ghiaccio*. Questa particolare rappresentazione schematica del ghiaccio non è corretta, perché è soltanto bidimensionale, ma dal punto di vista qualitativo è giusta. Il fatto interessante è che il materiale presenta una *posizione definita per ogni atomo*, e potete facilmente rendervi conto che se in un qualche modo tenessimo tutti gli atomi a un estremo della goccia secondo un certo ordine, ogni atomo in un determinato posto, allora, es-

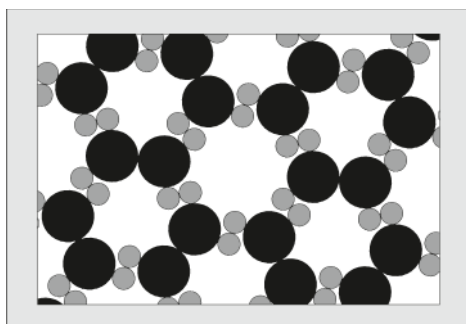


FIGURA 1.4 Ghiaccio ingrandito un miliardo di volte.

sendo rigida la struttura dei collegamenti, l'altro estremo che si trova a distanza di miglia (nella nostra scala ingrandita) occuperà una posizione definita. Così, se teniamo un ago di ghiaccio a un estremo, l'altro estremo resiste a una nostra spinta laterale, a differenza dell'acqua in cui la struttura è spezzata a causa dell'aumento nel moto di agitazione, cosicché gli atomi si muovono tutti in modi diversi. La differenza fra i solidi e i liquidi è dunque che in un solido gli atomi sono disposti secondo qualche tipo di reticolo, chiamato *reticolo cristallino* e, a grande distanza, non hanno una posizione casuale; la posizione degli atomi in una zona del cristallo è determinata da quella di altri che si trovano a distanza di milioni di atomi in un'altra zona del cristallo.

La FIGURA 1.4 è una rappresentazione schematica del ghiaccio e, benché essa mostri diverse caratteristiche proprie del ghiaccio, non è la struttura reale. Una delle caratteristiche esatte è che vi è una parte della simmetria che è esagonale. Potete vedere che, se facciamo ruotare la figura di 60° attorno a un asse, essa ritorna uguale a se stessa: dunque, vi è una simmetria nel ghiaccio che rende conto della struttura a sei lati dei fiocchi di neve.

Un'altra cosa che possiamo vedere dalla FIGURA 1.4 è perché il ghiaccio si restringe quando si scioglie. La particolare struttura cristallina del ghiaccio mostrata contiene molti «buchi», come li contiene la reale struttura del ghiaccio. Quando la struttura si decompone, questi buchi possono essere occupati da molecole. La maggior parte delle sostanze semplici, a eccezione dell'acqua e dei metalli, nel liquefarsi *si dilata*, perché gli atomi sono strettamente stipati nel solido cristallino e sciogliendosi hanno bisogno di più spazio per agitarsi, però una struttura aperta, come nel caso dell'acqua, si contrae.

Ora, benché il ghiaccio abbia una forma cristallina «rigida», la sua temperatura può cambiare: il ghiaccio contiene calore. Se vogliamo, possiamo cambiarne la quantità di calore. Cos'è il calore nel caso del ghiaccio? Gli atomi non stanno fermi. Essi si agitano e vibrano. Così, anche se vi è un ordine definito nel cristallo – una struttura definita – tutti gli atomi vibrano «sul posto»; quando aumentiamo la temperatura essi vibrano con ampiezza sempre maggiore, finché a forza di agitarsi si spostano. Noi chiamiamo ciò *fusion*. Quando abbassiamo la temperatura, la vibrazione diminuisce sempre di più finché, allo zero assoluto, vi è un minimo di vibrazione che gli atomi possono avere, ma *non zero*. Questo minimo di moto che gli atomi possono avere non è sufficiente per fondere una sostanza, con una sola eccezione: l'elio. L'elio diminuisce semplicemente i moti atomici il più possibile, ma anche allo zero assoluto vi è ancora un moto sufficiente a impedirgli di solidificare. L'elio, anche allo zero assoluto, non gela, a meno che la pressione sia resa così forte da schiacciare gli atomi gli uni contro gli altri. Se aumentiamo la pressione *possiamo* farlo solidificare.

1.3 Processi atomici

Questo per quanto riguarda la descrizione di solidi, liquidi e gas dal punto di vista atomico. Comunque l'ipotesi atomica descrive anche dei *processi*, e quindi ci soffermeremo a esaminare un certo numero di processi da un punto di vista atomico. Il primo processo che esamineremo è associato alla superficie dell'acqua. Che accade alla superficie dell'acqua? Renderemo ora la rappresentazione più complicata – e più realistica – immaginando che la superficie si trovi a contatto con l'aria. La FIGURA 1.5 mostra la superficie dell'acqua a contatto con l'aria. Come prima, vediamo le molecole dell'acqua formanti una massa di acqua liquida, ma ora vediamo anche la superficie dell'acqua. Al di sopra della superficie troviamo un certo numero di cose: prima di tutto vi sono delle molecole d'acqua come nel vapore. Questo è il *vapore acqueo*, che si trova sempre al di sopra dell'acqua liquida. (Tra il vapore acqueo e l'acqua esiste un equilibrio che verrà discusso in seguito.) In più troviamo alcune altre molecole: qui due atomi di ossigeno legati insieme fra di loro formano una *molecola di ossigeno*, là due atomi di azoto anch'essi attaccati l'uno all'altro formano una molecola di azoto. L'aria consiste quasi interamente di azoto, ossigeno, un po' di vapore acqueo e quantità minori di anidride

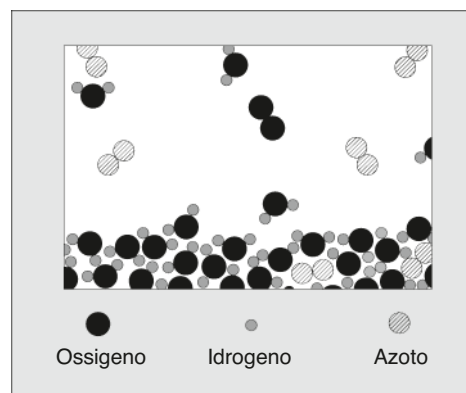


FIGURA 1.5 Acqua che evapora nell'aria.

carbonica, argo e altre sostanze. Dunque, al disopra della superficie dell'acqua vi è l'aria, un gas che contiene una certa quantità di vapore acqueo.

Ora, che accade in questa rappresentazione? Le molecole che si trovano dentro l'acqua si agitano continuamente. Di tanto in tanto, una che si trova alla superficie viene per caso colpita un po' più forte del solito ed è spinta via. È difficile vedere questo fatto nel disegno, perché esso è una rappresentazione *statica*. Ma possiamo immaginare che una molecola vicina alla superficie sia appena stata colpita e stia volando via o che un'altra, dopo essere stata colpita, stia sfuggendo. Così, molecola per molecola, l'acqua scompare: evapora. Ma se *chiudiamo* il recipiente al disopra, dopo un po' troviamo un gran numero di molecole d'acqua tra le molecole d'aria. Di tanto in tanto, una di queste molecole di vapore vola giù fino all'acqua e vi si attacca di nuovo. Così vediamo che ciò che appare come una cosa morta e insignificante – un bicchiere d'acqua con un coperchio rimasto lì forse per vent'anni – in realtà nasconde un interessante fenomeno dinamico che si svolge continuamente. Per i nostri occhi, per la nostra limitata capacità visiva nulla muta, ma se potessimo vederlo ingrandito un miliardo di volte vedremmo che dal suo punto di vista esso muta continuamente: molecole lasciano la superficie, molecole ritornano indietro.

Perché noi non vediamo alcun cambiamento? Perché il numero delle molecole che se ne vanno è esattamente pari a quello delle molecole che ritornano! Alla lunga «non accade nulla». Se poi togliamo il coperchio del recipiente e soffiato via l'aria umida sostituendola con aria secca, il numero delle molecole che se ne vanno sarà esattamente lo stesso di prima perché ciò dipende dall'agitazione dell'acqua, ma il numero delle molecole che tornano indietro è grandemente ridotto perché vi sono molte meno molecole di acqua al disopra dell'acqua stessa. Quindi saranno di più quelle che escono di quelle che entrano, e l'acqua evaporerà. Dunque se desiderate fare evaporare l'acqua accendete il ventilatore!

Eccoci a qualcosa d'altro: quali sono le molecole che se ne vanno? Quando una molecola si allontana, ciò è dovuto a un'accidentale sovraccumulazione di energia, un minimo in più dell'energia solita, che è necessaria per vincere le attrazioni delle molecole vicine. Quindi, dato che quelle che se ne vanno hanno un'energia maggiore della media, quelle che restano hanno un moto medio *minore* di quello che avevano prima. Così, se evapora, il liquido gradatamente *si raffredda*. Naturalmente, quando una molecola di vapore passa dall'aria all'acqua sottostante, all'avvicinarsi della molecola alla superficie si manifesta una grande, improvvisa attrazione. Questa accelera la molecola entrante e si risolve in una generazione di calore. Così quando se ne vanno, le molecole sottraggono calore e quando ritornano lo generano. Naturalmente, quando non vi è evaporazione risultante, l'effetto è nullo: l'acqua non cambia temperatura. Se invece soffiato sull'acqua, si da conservare una continua preponderanza nel numero delle molecole che evaporano, allora l'acqua si raffredda. Dunque, soffiato sul brodo, se volete raffreddarlo!

Naturalmente, dovrete rendervi conto che i processi appena descritti sono più complicati di quanto abbiamo indicato. Non solo l'acqua entra nell'aria, ma, di tanto in tanto, anche una molecola di ossigeno o di azoto si introdurrà e «andrà persa» nella massa delle molecole d'acqua, e viaggerà nell'acqua. Così l'aria si dissolve nell'acqua; molecole di ossigeno e azoto entreranno nell'acqua e l'acqua conterrà aria. Se all'improvviso togliamo l'aria dal recipiente, le molecole d'aria se ne andranno più rapidamente di come vi sono entrate, e nel far ciò produrranno delle bolle. Questo fatto è molto pericoloso per i palombari, come forse sapete.

Ora passiamo a un altro processo. Nella FIGURA 1.6 vediamo, da un punto di vista atomico, un solido che si dissolve nell'acqua. Se mettiamo nell'acqua un cristallo di sale, cosa succederà? Il sale è un solido, un cristallo, una struttura organizzata di «atomi di sale». La FIGURA 1.7 mostra la struttura tridimensionale del sale comune, il cloruro di sodio. A rigor di termini, il cristallo non è composto da atomi, ma da ciò che chiamiamo *ioni*. Uno ione è un atomo che ha alcuni elettroni in più oppure ha perduto alcuni elettroni. In un cristallo di sale troviamo ioni di cloro (atomi di cloro con un elettrone in più) e ioni di sodio (atomi di sodio con un elettrone in meno). Nel sale solido tutti gli ioni stanno attaccati gli uni agli altri per attrazione elettrica, ma quando li mettiamo nell'acqua, a causa dell'attrazione sugli ioni da parte dell'ossigeno negativo e dell'idrogeno positivo, avviene che

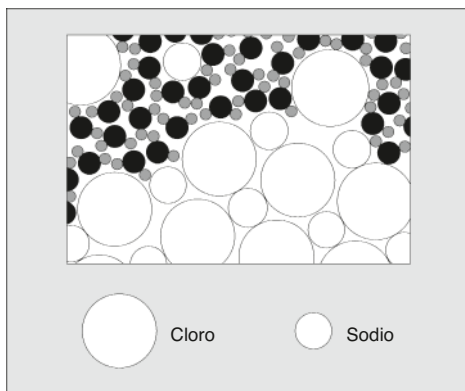


FIGURA 1.6 Sale che si scioglie nell'acqua.

alcuni ioni si liberano. Nella FIGURA 1.6 vediamo uno ione di cloro che si libera e altri atomi fluttuanti nell'acqua sotto forma di ioni. Questa rappresentazione è stata fatta con una certa cura. Notate, per esempio, che gli estremi di idrogeno delle molecole d'acqua si trovano più facilmente vicini allo ione cloro, mentre vicino allo ione sodio è più probabile trovare l'estremo di ossigeno, perché il sodio è positivo e l'estremo di ossigeno dell'acqua è negativo ed essi si attraggono elettricamente. Da questa figura, possiamo dire se il sale si stia *sciogliendo* nell'acqua o stia *crystallizzando* dall'acqua? Naturalmente *non possiamo* dirlo perché, mentre alcuni atomi stanno lasciando il cristallo altri lo raggiungono. Il processo è un processo *dinamico*, proprio come nel caso dell'evaporazione, e dipende dal fatto che la quantità di sale presente nell'acqua sia maggiore o minore di quella necessaria per l'equilibrio. Per equilibrio intendiamo quella situazione in cui la quantità di atomi che se ne vanno è esattamente pari a quella degli atomi che tornano indietro. Se non vi è quasi sale nell'acqua, sono più numerosi gli atomi che se ne vanno di quelli che ritornano, e il sale si scioglie. Se, d'altro canto, vi sono troppi «atomi di sale», ne tornano in numero maggiore di quanti ne partano e il sale cristallizza.

Incidentalmente, accenniamo al fatto che il concetto di *molecola* di una sostanza è solo approssimativo ed esiste solo per una certa classe di sostanze. Nel caso dell'acqua è chiaro che i tre atomi sono in realtà attaccati insieme. Ciò non è altrettanto chiaro nel caso del cloruro di sodio allo stato solido. Vi è soltanto una disposizione degli ioni di sodio e di cloro in una struttura cubica. Non vi è alcun modo naturale di raggrupparli come «molecole di sale».

Ritornando alla nostra discussione sulla soluzione e la precipitazione, se aumentiamo la temperatura della soluzione di sale, la quantità di atomi che vengono sottratti aumenta, come del resto aumenta la quantità di atomi che ritornano indietro. In generale, riesce molto difficile prevedere come andrà a finire, se si scioglierà una maggiore o minore quantità del solido. La maggior parte delle sostanze si scioglie di più all'aumentare della temperatura, ma alcune sostanze si sciolgono meno.

1.4 Reazioni chimiche

In tutti i processi fin qui descritti, gli atomi e gli ioni non hanno cambiato compagno, ma naturalmente vi sono circostanze in cui gli atomi variano le combinazioni, formando nuove molecole. Ciò è illustrato nella FIGURA 1.8. Un processo in cui avviene la risistemazione dei compagni atomici è ciò che chiamiamo *reazione chimica*. Gli altri processi fin qui descritti sono denominati processi fisici, ma non vi è differenza netta fra i due. (La natura non si occupa di come definiamo un processo, essa si interessa unicamente di continuare a crearlo.) Questa figura si suppone rappresenti del carbonio che brucia nell'ossigeno. Nel caso dell'ossigeno, *due* atomi di ossigeno si attaccano l'uno all'altro molto strettamente. (Perché non si attaccano *tre* o anche *quattro* atomi? Questa è una delle caratteristiche del tutto peculiari di tali processi atomici. Gli atomi sono molto speciali: a essi piacciono certi particolari compagni, certe particolari direzioni, e così via. È compito della fisica analizzare perché ognuno di loro vuole quello che vuole. A ogni modo, due atomi di ossigeno formano, saturati e felici, una molecola.)

Si suppone che gli atomi di carbonio si trovino in un cristallo solido, che potrebbe essere grafite o diamante⁽¹⁾. Ora, una delle molecole di ossigeno

Cristallo	●	○	a (Å)
Salgemma	Na	Cl	5,64
Silvina	K	Cl	6,28
	Ag	Cl	5,54
	Mg	O	4,20
Galena	Pb	S	5,97
	Pb	Se	6,14
	Pb	Te	6,34

Distanza tra due ioni contigui: $d = a/2$

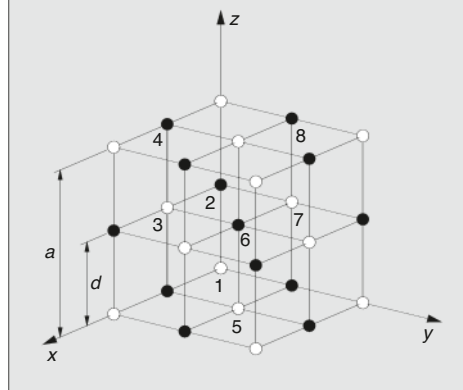


FIGURA 1.7 Struttura cristallina di alcuni sali.

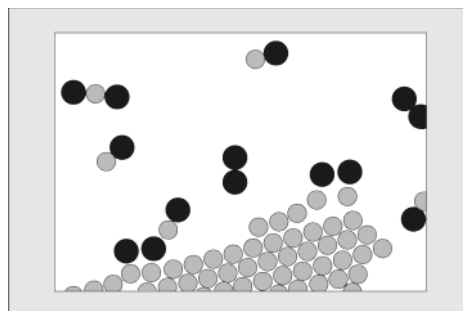


FIGURA 1.8 Carbonio che brucia in ossigeno.

⁽¹⁾ Si può bruciare un diamante nell'aria.

può, per esempio, passare al carbonio, e ciascun atomo può raccogliere un atomo di carbonio e volare via in una nuova combinazione – «carbonio-ossigeno» – che è una molecola di quel gas chiamato ossido di carbonio. Gli si dà il nome chimico CO. È molto semplice: le lettere «CO» sono praticamente una rappresentazione di quella molecola. Ma il carbonio attrae l'ossigeno molto più di quanto l'ossigeno attragga l'ossigeno o il carbonio attragga il carbonio. Quindi, in questo processo, l'ossigeno può entrare con una piccola energia, ma l'ossigeno e il carbonio si investiranno l'un l'altro con un tremendo sovvertimento, e ogni cosa vicina a essi raccoglierà energia. Una gran quantità di energia di moto, energia cinetica, viene così generata. Ciò, naturalmente, significa *bruciare*; noi otteniamo *calore* dalla combinazione di ossigeno e carbonio. Il calore si presenta, di solito, sotto forma di moto molecolare del gas caldo, ma in certe circostanze può essere così intenso da generare *luce*. È così che si ottengono le *fiamme*.

Per di più, l'ossido di carbonio non è del tutto soddisfatto. È possibile per lui legarsi a un altro ossigeno, cosicché possiamo avere una reazione molto più complicata in cui l'ossigeno sta combinandosi con il carbonio, mentre, al tempo stesso, accade una collisione con una molecola di ossido di carbonio. Un atomo di ossigeno si potrebbe unire al CO e formare infine una molecola composta da un carbonio e da due ossigeni, che viene indicata con CO_2 e chiamata diossido di carbonio (o anidride carbonica). Se bruciamo il carbonio con pochissimo ossigeno in una reazione molto rapida (per esempio, nel motore di un'automobile, dove l'esplosione è tanto veloce da non avere il tempo di produrre CO_2) si forma una notevole quantità di ossido di carbonio. In riordinamenti del genere si sprigiona una gran quantità di energia, che dà origine a esplosioni, fiamme ecc., a secondo delle reazioni. I chimici hanno studiato questi assestamenti degli atomi e hanno trovato che ogni sostanza è una *sistemazione di atomi*.

Per illustrare questo concetto consideriamo un altro esempio. Se entriamo in un campo di violette, sappiamo che cos'è «quel profumo». È un qualche genere di *molecola*, o sistemazione di atomi, che si è fatta strada dentro i nostri nasi. Prima di tutto, *come* ha fatto a entrare? Ciò è piuttosto semplice. Se il profumo corrisponde a un qualche tipo di molecola che si trova nell'aria agitandosi all'intorno e sbattuta in ogni dove, può essere penetrato *accidentalmente* nei nostri nasi. Certo non ha un desiderio particolare di entrare nel nostro naso. È semplicemente una povera parte indifesa di una folla tumultuante di molecole, e, nei suoi vagabondaggi senza meta, a questo particolare pezzetto di materia capita di trovarsi nel naso.

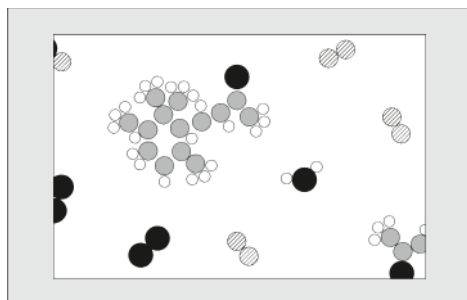


FIGURA 1.9 Profumo di violette.

Ora, i chimici possono prendere speciali molecole, quali il profumo delle violette, analizzarle e dirci l'*esatta disposizione* degli atomi nello spazio. Sappiamo che la molecola del diossido di carbonio è diritta e simmetrica: $\text{O}-\text{C}-\text{O}$. (Ciò può anche venire determinato facilmente con metodi fisici.) Però, anche per le strutture di atomi assai più complicate che esistono nella chimica, si possono scoprire gli ordinamenti degli atomi con un lungo e notevole processo di lavoro di ricerca. La FIGURA 1.9 è una rappresentazione dell'aria in prossimità di una violetta; nell'aria troviamo di nuovo azoto, ossigeno e vapore acqueo. (Perché vi è del vapore acqueo? Perché la violetta è *umida*. Tutte le piante traspirano.) Comunque vediamo anche un «mostro» formato di atomi di carbonio, di idrogeno e di ossigeno, che hanno scelto una certa struttura particolare in cui sono organizzati. È un ordinamento molto più complicato di quello del diossido di carbonio, anzi è una struttura enormemente complicata. Sfortunatamente non siamo in grado di raffigurare tutto ciò che è realmente conosciuto su questa struttura dal punto di vista chimico, perché l'esatta struttura di tutti gli atomi è conosciuta in realtà in tre dimensioni, mentre la nostra figura ha solo due dimensioni. I sei carboni che formano l'anello non formano un anello piatto, ma una specie di anello «ondulato». Tutti gli angoli e le distanze sono noti. Dunque, una *formula* chimica è semplicemente una rappresentazione di una tale molecola. Quando un chimico scrive una cosa di questo tipo sulla lavagna, egli tenta di «disegnare», per così dire, in due dimensioni. Per esempio, noi vediamo un «anello» di carboni e una «catena» di carboni che pendono all'estremità di esso, con un ossigeno che è il secondo a partire dall'estremo, tre idrogeni legati a quel carbonio, due carboni e tre idrogeni attaccati qui ecc.

Come fa il chimico a determinare una struttura come questa? Egli mescola insieme bottiglie piene di roba, e, se risulta rosso questo gli dice che si tratta di un idrogeno e due carboni legati in

questo punto; se risulta blu, invece, non è così, non lo è affatto. Questo è uno dei campi di indagine più fantastici che siano mai stati esplorati: la chimica organica. Per scoprire l'ordinamento degli atomi in queste strutture terribilmente complicate, il chimico osserva che cosa succede quando mescola due sostanze diverse. I fisici non hanno mai creduto davvero che i chimici in realtà sapessero di che stavano parlando quando descrivevano l'ordine degli atomi. Da circa vent'anni, però, è divenuto possibile, in certi casi, osservare tali molecole (non complicate come questa, ma alcune contenenti parti di essa) per mezzo di un metodo fisico ed è stato possibile localizzare ciascun atomo non guardando i colori ma *misurando dove si trova*. E... guarda un po'! I chimici sono quasi sempre nel giusto.

Risulta infatti che nel profumo delle violette vi sono tre molecole leggermente diverse, le quali differiscono solo nella disposizione degli atomi di idrogeno.

Un problema della chimica è quello di dare un nome alle sostanze in modo che sappiamo di che si tratta. Trovate un nome per questa struttura! (FIGURA 1.10) Il nome non deve soltanto definire la struttura, ma deve anche dire che qui vi è un atomo di ossigeno, lì un idrogeno – esattamente ciò che ogni atomo è e dove si trova. Così possiamo ben comprendere come i nomi chimici debbano essere complessi per poter essere completi. Il nome di questa sostanza nella forma più completa è 4-(2, 2, 3, 6 tetrametile-5-cicloesane)-3-butene-2-one, e ciò dà un'idea della sua struttura. Possiamo renderci conto delle difficoltà che si presentano ai chimici e anche della ragione di tali lunghi nomi. Non è che essi desiderino essere incomprensibili, ma hanno un problema estremamente difficile nel tentare di descrivere le molecole a parole!

Come *facciamo a sapere* che esistono gli atomi? Per mezzo di uno dei trucchi precedentemente menzionati: facciamo l'*ipotesi* che esistano gli atomi, e uno dopo l'altro i risultati seguono secondo il modo previsto, come dovrebbero se le cose *sono* fatte di atomi. Vi è una prova ancora più diretta, e ne è un buon esempio quanto segue: gli atomi sono così piccoli che non potete vederli con un microscopio ottico – anzi nemmeno con un microscopio *elettronico*. (Con un microscopio ottico potete vedere solo cose che sono molto più grandi.) Ora, se gli atomi sono sempre in moto, diciamo nell'acqua, e noi introduciamo nell'acqua una grossa palla di qualche genere, una palla molto più grossa degli atomi, essa si agiterà all'intorno – molto similmente a quanto avviene in una partita di palla a spinta⁽²⁾, dove una palla di grandi dimensioni è spinta qua e là da un gran numero di persone. Le persone spingono in varie direzioni e la palla si muove nel campo in modo irregolare. Così, nella stessa maniera, la «grande palla» si muoverà, a causa della disuguaglianza degli urti da un lato all'altro, da un istante a quello successivo. Pertanto, se osserviamo delle particelle minuscole (i colloidali), che sono nell'acqua, attraverso un eccellente microscopio, vedremo un continuo zig-zagare delle particelle, che rappresenta il risultato del bombardamento degli atomi. Questo è chiamato *moto browniano*.

Possiamo vedere un'altra prova dell'esistenza degli atomi nella struttura dei cristalli. In molti casi le strutture dedotte da analisi fatte con i raggi X concordano nelle loro «strutture» spaziali con le forme realmente mostrate dai cristalli presenti in natura. Gli angoli tra le varie «facce» di un cristallo concordano, entro secondi di arco, con angoli dedotti dall'ipotesi che un cristallo è formato da molti «strati» di atomi.

Ogni cosa è costituita di atomi. Questa è l'ipotesi chiave. L'ipotesi più importante di tutta la biologia, per esempio, è che *tutto ciò che gli animali fanno, lo fanno gli atomi*. In altre parole, *non vi è nulla che gli esseri viventi facciano che non possa essere inteso partendo dal punto di vista che essi sono composti di atomi, i quali agiscono secondo le leggi della fisica*. Ciò non era noto fin dall'inizio: occorre un certo lavoro sperimentale e teorico per suggerire questa ipotesi, ma ora essa è accettata ed è la teoria più utile che vi possa essere per promuovere nuove idee nel campo biologico.

Se un pezzo di acciaio o un pezzo di sale, formati da atomi l'uno vicino all'altro, possono avere proprietà così interessanti; se l'acqua – che non è composta da altro che questi piccoli corpuscoli,

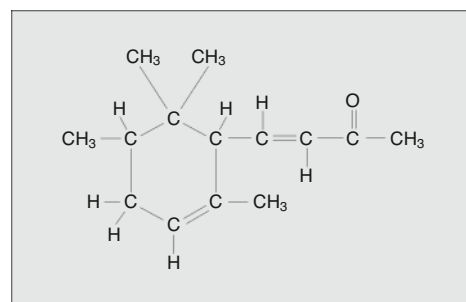


FIGURA 1.10 La sostanza rappresentata è l' α -irone.

⁽²⁾ Gioco anglosassone che consiste nello spingere un pallone, di circa 2 metri di diametro, nella porta avversaria. (N.d.T.)

per miglia e miglia della stessa sostanza sulla terra – può formare onde e schiuma, creare rumore di scroscio e disegnare strane forme mentre scorre sul cemento; se tutto ciò, la vita di un corso d'acqua, può essere nient'altro che un mucchio di atomi, *quante altre cose sono possibili?* Se invece di disporre gli atomi in un qualche disegno definito e sempre nuovamente ripetuto più e più volte, o anche formare piccoli cumuli di complessità come il profumo delle violette, creiamo una disposizione *sempre diversa* da posto a posto, con differenti tipi di atomi disposti in molti modi, che cambia continuamente e non si ripete, non è forse probabile che essa si comporti tanto più meravigliosamente? È possibile che l'«oggetto» che va avanti e indietro davanti a voi e che vi parla sia un gran mucchio di questi atomi disposti in una struttura assai complessa, tale che la pura e semplice complessità di essa sconcerti l'immaginazione per ciò che può fare? Quando diciamo che siamo un ammasso di atomi non intendiamo dire che siamo *semplicemente* un ammasso di atomi, perché un ammasso di atomi non ripetitivo potrebbe benissimo riflettere la vostra immagine nello specchio.

Fondamenti della fisica

2.1 Introduzione

In questo capitolo esamineremo le idee essenziali che possediamo riguardo alla fisica, cioè alla natura delle cose come le vediamo al momento attuale. Non tratteremo la storia di come ci sia noto che tutte queste idee sono vere; imparerete questi particolari a tempo debito.

Le cose che ci interessano nella scienza appaiono in miriadi di forme e con gran numero di attributi. Per esempio, se siamo sulla spiaggia e guardiamo il mare, vediamo l'acqua, le onde che si frangono, la schiuma, il moto agitato dell'acqua, ne udiamo il suono, sentiamo l'aria e i venti, vediamo le nuvole, il sole e il cielo blu, la luce; vi è la sabbia e vi sono rocce di varia durezza e stabilità, colore e struttura. Vi sono animali e alghe marine, fame e malattie, e lo spettatore sulla spiaggia; vi può essere perfino felicità e pensiero. Qualsiasi altro luogo della natura presenta una varietà simile di cose e influenze. Le cose sono sempre così complicate in qualsiasi luogo. La curiosità pretende che poniamo delle domande, che tentiamo di collegare le cose tra loro e di comprendere questa moltitudine di aspetti, forse risultante dall'azione di un numero relativamente piccolo di cose e forze elementari agenti in una infinita varietà di combinazioni.

Per esempio: la sabbia è qualcosa di diverso dalle rocce? Vale a dire, non è forse la sabbia nient'altro che un gran numero di pietre minutissime? La luna è una grande roccia? Se comprendessimo le rocce, comprenderemmo anche la sabbia e la luna? Il vento è una perturbazione dell'aria analoga al moto agitato dell'acqua del mare? Quali caratteristiche hanno in comune i diversi moti? Cosa hanno in comune le differenti specie di suoni? Quanti colori diversi esistono? E così via. In questo modo cerchiamo, gradualmente, di analizzare tutte le cose, di mettere in relazione tra di loro cose che a prima vista appaiono distinte, con la speranza di riuscire a *ridurre* il numero delle cose *diverse*, e, di conseguenza, comprenderle meglio.

Alcune centinaia di anni or sono, si scoprì un metodo per trovare risposte parziali a tali interrogativi. *Osservazione, ragionamento ed esperimento* costituiscono quello che chiamiamo *metodo scientifico*. Dovremo limitarci alla pura e semplice descrizione della nostra sostanziale visione di ciò che talvolta prende il nome di *fisica fondamentale*, ossia delle idee fondamentali che sono sorte dall'applicazione del metodo scientifico.

Che cosa intendiamo per «comprendere» qualche cosa? Possiamo immaginare che questo complicato apparato di cose in movimento che costituisce «il mondo» sia qualcosa di simile a una gran partita a scacchi giocata dagli dei, e che noi siamo spettatori della partita. Noi non sappiamo quali siano le regole del gioco. Tutto ciò che ci è consentito è di *osservare* lo svolgersi del gioco. Naturalmente se osserviamo abbastanza a lungo possiamo, alla fine, afferrare alcune delle regole. *Le regole del gioco* sono ciò che intendiamo per *fisica fondamentale*. Anche se conoscessimo tutte le regole, potremmo ugualmente non essere in grado di comprendere perché durante la partita venga fatta una certa mossa, semplicemente per il fatto che è troppo complicata, e le nostre menti sono limitate. Se giocate a scacchi, sapete che è facile apprendere tutte le regole, e tuttavia è spesso assai difficile scegliere la mossa migliore o capire perché un giocatore faccia una certa mossa. Così è in natura, solo che lo è molto di più; ma può darsi che alla fine riusciamo a scoprire tutte le regole. In realtà, ora non le conosciamo tutte. (Ogni tanto avviene qualcosa di simile a un arrocco, che ancora non comprendiamo.) A parte il fatto che non conosciamo tutte le regole, ciò che in realtà possiamo spiegare con quelle regole è molto limitato, perché la maggior parte delle

situazioni sono talmente complicate che non ci è possibile seguire le fasi della partita usando le regole, né tanto meno dire che cosa succederà. Dobbiamo, quindi, limitarci alla più fondamentale questione delle regole del gioco. Se conosciamo le regole, riteniamo di «comprendere» il mondo.

Come possiamo dire se le regole che «assumiamo» sono veramente giuste, dal momento che non riusciamo ad analizzare completamente la partita? Vi sono, grosso modo, tre modi per decidere. Primo, possono presentarsi delle situazioni in cui la natura è ordinata, oppure siamo noi a ordinarla, in modo che sia semplice, e quindi sia formata di così poche parti da consentirci di predire esattamente ciò che accadrà, e in tal modo di controllare come funzionano le nostre regole. (In un angolo della scacchiera può darsi vi siano solo pochi pezzi in azione, e questa situazione la possiamo analizzare esattamente.)

Una seconda via per controllare le regole è di far uso di regole meno specifiche, derivate da esse. Per esempio, la regola che determina la mossa di un alfiere sulla scacchiera è che esso si muove soltanto in diagonale. Si può dedurre, non importa quante mosse possono essere fatte, che un certo alfiere si troverà sempre su un quadrato rosso. Così, senza essere in grado di seguire i particolari, possiamo sempre verificare la nostra idea relativa alla mossa dell'alfiere cercando di scoprire se si trova sempre su un quadrato rosso. Naturalmente vi si troverà per un bel pezzo, finché, all'improvviso, scopriremo che si trova su un quadrato *nero* (ciò che è accaduto naturalmente è che nel frattempo è stato mangiato, un'altra pedina ha attraversato la scacchiera per andare a regina e si è trasformata in un alfiere su quadrato nero). Così avviene in fisica. Per un lungo periodo possiamo avere una regola che funziona benissimo in maniera completa, anche se non riusciamo a seguirne i particolari, e poi, a un certo punto, possiamo scoprire una *nuova regola*. Dal punto di vista della fisica fondamentale, i fenomeni più interessanti si verificano naturalmente nelle situazioni *nuove*, nei punti in cui le regole non funzionano – non dove le regole *funzionano*! Questo è il modo di scoprire nuove regole.

La terza maniera per dire se le nostre idee sono giuste è relativamente grezza, ma è probabilmente la più efficace di tutte. Nel senso che vale per grossolane *approssimazioni*. Anche se non siamo in grado di dire perché Alekhine muova *questo particolare pezzo*, forse possiamo *approssimativamente* comprendere che egli sta raccogliendo i suoi pezzi intorno al re per proteggerlo, più o meno, dato che quella è la cosa sensata da farsi in tali circostanze. Nello stesso modo, possiamo spesso comprendere la natura, più o meno, pur non essendo in grado di vedere che cosa stia facendo *ogni piccolo pezzo*, in rapporto alla nostra comprensione del gioco.

Dapprincipio i fenomeni della natura sono stati grossolanamente suddivisi in classi, quali calore, elettricità, meccanica, magnetismo, proprietà delle sostanze, fenomeni chimici, luce o ottica, raggi X, fisica nucleare, gravitazione, fenomeni concernenti i mesoni ecc. Però, lo scopo è vedere l'intera natura nei diversi aspetti di *un unico complesso* di fenomeni. Questo è il problema della fisica teorica fondamentale dei nostri giorni: *scoprire le leggi che stanno dietro all'esperienza; amalgamare queste classi*. Dal punto di vista storico siamo sempre stati in grado di amalgamarle; ma col passare del tempo si scoprono cose nuove. Eravamo in una situazione di perfetta fusione dei fenomeni, quando, all'improvviso vennero scoperti i raggi X. Incorporammo qualcosa di più e furono scoperti i mesoni. Quindi a ogni stadio della partita, il gioco appare sempre piuttosto confuso. Si è raggiunto un alto grado di fusione, ma rimangono molti fili e capi sospesi, in tutte le direzioni. Questa è, oggi, la situazione che cercheremo di descrivere.

Alcuni esempi storici di amalgamazione sono i seguenti. Considerate anzitutto il *calore* e la *meccanica*. Quando gli atomi sono in moto, quanto maggiore è il moto, tanto più calore contiene il sistema, quindi *il calore e tutti gli effetti della temperatura possono essere rappresentati dalle leggi della meccanica*. Un'altra straordinaria amalgamazione si ebbe con la scoperta della relazione tra elettricità, magnetismo e luce, che risultarono essere aspetti diversi della medesima cosa, che oggi chiamiamo *campo elettromagnetico*. Un'altra amalgamazione è rappresentata dall'unificazione dei fenomeni chimici, le proprietà delle diverse sostanze e il comportamento delle particelle atomiche, unificazione che si attua nella *meccanica quantistica della chimica*.

La domanda che ci si pone, naturalmente, è la seguente: è possibile amalgamare *tutto* e scoprire semplicemente che questo mondo rappresenta i diversi aspetti di *un'unica* cosa? Nessuno lo sa. Tutto ciò che sappiamo è che, nel procedere, possiamo amalgamare pezzi, ma troviamo anche che alcuni pezzi non si incastrano, continuando a cercare di comporre il rompicapo. Non si sa ovviamente se vi è un numero finito di pezzi e anche se l'incastro abbia un contorno. Non lo si

saprà mai fino a che il quadro non sarà completo, se mai lo sarà. Ciò che desideriamo fare qui è di vedere fino a che punto questo processo di amalgamazione è andato avanti, e qual è la situazione nel momento attuale per quanto riguarda la comprensione dei fenomeni fondamentali mediante il minor numero di principi. In parole povere, *di che sono composte le cose e quanti elementi vi sono?*

2.2 La fisica prima del 1920

È un po' difficile cominciare subito con il modo di vedere attuale, sicché prima analizzeremo come erano viste le cose intorno al 1920, poi estrarremo alcuni concetti da quella descrizione. Prima del 1920, la rappresentazione del nostro mondo era di questo tipo: la «scena» su cui l'universo è posto è lo *spazio* tridimensionale della geometria, come è descritto da Euclide, e le cose cambiano in un mezzo chiamato *tempo*. Gli elementi sulla scena sono le *particelle*, per esempio gli atomi, che hanno alcune *proprietà*. Primo, la proprietà d'inerzia: se una particella è in moto, essa continua ad andare nella stessa direzione a meno che delle *forze* non agiscano su di essa. Il secondo elemento è rappresentato dalle *forze*, che allora si pensava fossero di due tipologie: la prima era una forza d'interazione enormemente complicata che manteneva i vari atomi in differenti combinazioni, determinando se il sale si sarebbe sciolto più o meno velocemente con l'aumento di temperatura. L'altra forza nota era un'interazione a lunga distanza – una forma di attrazione piana e dolce – che variava inversamente al quadrato della distanza ed era chiamata *gravitazione*. Questa legge era conosciuta ed era molto semplice. *Perché* le cose rimangono in moto quando si muovono o perché esiste una legge gravitazionale, naturalmente, non era noto.

Ciò di cui ci occupiamo qui è di dare una descrizione della natura. Dunque, da questo punto di vista, un gas e, a dire il vero, *tutta* la materia, non è altro che una miriade di particelle in moto. Così molte delle cose che vedevamo stando sulla riva del mare possono essere immediatamente collegate. Primo, la pressione: essa deriva dalla collisione degli atomi con le pareti o qualche altra cosa; la velocità degli atomi, se essi in media si muovono tutti in una stessa direzione, costituisce il vento; i moti *casuali* interni formano il *calore*. Vi sono onde di densità eccedente dove si sono raccolte troppe particelle, e così, spostandosi rapidamente, esse spingono lontano gruppi di particelle, e via di seguito. Quest'onda di densità eccedente è il *suono*. È un successo straordinario essere in grado di comprendere tanto. Alcune di queste cose sono state descritte nel precedente capitolo.

Quali *tipi* di particelle esistono? A quell'epoca si riteneva ve ne fossero 92: in definitiva erano state scoperte 92 diverse specie di atomi. Essi avevano nomi differenti, legati alle loro proprietà chimiche.

La parte successiva del problema fu la seguente: *quali sono le forze a breve distanza?* Perché il carbonio attrae un ossigeno o forse due ma non tre? Qual è il meccanismo di interazione fra gli atomi? È la gravitazione? La risposta è no. La gravità è assolutamente troppo debole. Ma immaginatevi una forza analoga alla gravità, che varia inversamente al quadrato della distanza, ma enormemente più forte e con la seguente differenza. Nella gravità ogni cosa attrae ogni altra cosa, ma ora immaginatevi che vi siano *due generi* di «cose», e che questa nuova forza (che è ovviamente la forza elettrica) abbia la proprietà che gli uguali *si respingono* e che i contrari *si attraggono*. La «cosa» che porta questa forte interazione è chiamata *carica*.

Dunque qual è la situazione? Supponiamo di avere due opposti che si attraggono l'un l'altro, un «più» e un «meno», e che essi siano strettamente legati insieme. Supponiamo di avere un'altra carica a una certa distanza. Sentirebbe essa una qualche attrazione? Non ne sentirebbe *praticamente nessuna*, perché se le prime due sono di grandezza uguale, l'attrazione per l'una e la repulsione per l'altra si equilibrano. Di conseguenza a una qualsiasi distanza apprezzabile si manifesta una forza piccolissima. D'altra parte se *ci avviciniamo molto* con la carica isolata, si manifesta *attrazione*, perché la repulsione delle cariche uguali e l'attrazione delle opposte tende ad avvicinare maggiormente le cariche opposte e ad allontanare maggiormente quelle uguali. Quindi la repulsione sarà *minore* dell'attrazione. Questo è il motivo per cui gli atomi, i quali sono composti di cariche elettriche positive e negative, sentono pochissima forza quando sono

separati da una distanza apprezzabile (a parte la gravità). Quando si avvicinano, essi possono «vedersi intimamente» l'un l'altro e modificare la loro distribuzione di cariche, col risultato di avere un'interazione molto forte. La base ultima di un'interazione fra gli atomi è *elettrica*. Dal momento che questa forza è tanto grande, tutti i «più» e i «meno» normalmente si riuniranno in una combinazione più stretta possibile. Tutte le cose, anche noi stessi, sono fatte di minutissime parti di segno «più» e di segno «meno», che interagiscono assai fortemente e sono tutte perfettamente equilibrate. Ogni tanto, accidentalmente, è possibile raschiare via alcuni «meno» o alcuni «più» (di solito è più facile togliere i «meno»), e in tali circostanze troviamo che la forza elettrica *non è più equilibrata* e quindi ci è possibile vedere gli effetti delle attrazioni elettriche.

Per dare un'idea di quanto l'elettricità sia più forte della gravitazione, consideriamo due grani di sabbia di un millimetro di diametro, posti a una distanza di trenta metri. Se la forza tra di loro non fosse equilibrata, se ogni cosa attraesse ogni altra cosa e non vi fosse repulsione fra le cariche uguali, cosicché non vi sarebbero effetti di annullamento, che forza avremmo? Tra i due vi sarebbe una forza di *tre milioni di tonnellate!* Vedete che è sufficiente un *piccolissimo* eccesso o difetto nel numero delle cariche negative o positive per produrre effetti elettrici apprezzabili. Questa è, ovviamente, la ragione per cui non potete vedere la differenza tra una cosa elettricamente carica e una scarica: le particelle interessate sono così poche che esse praticamente non apportano nessuna differenza al peso o alla misura di un oggetto.

Mediante questa rappresentazione gli atomi furono più facilmente comprensibili. Si pensò che essi avessero un «nucleo» al centro, di carica elettrica positiva e di grande massa e che il nucleo fosse circondato da un certo numero di «elettroni» molto leggeri e di carica negativa. Ora procederemo un po' nel nostro racconto col far notare che nel nucleo stesso furono trovate due specie di particelle, protoni e neutroni, quasi dello stesso peso e assai pesanti. I protoni hanno carica elettrica, mentre i neutroni sono neutri. Se abbiamo un atomo con sei protoni nel nucleo, e questo è circondato da sei elettroni (le particelle negative nel mondo comune della materia sono tutti elettroni ed essi sono molto leggeri, se paragonati ai protoni e ai neutroni che formano i nuclei), questo atomo sarebbe il numero sei nella tavola chimica, ed è chiamato carbonio. L'atomo numero otto è chiamato ossigeno ecc., perché le proprietà chimiche dipendono dagli elettroni che sono all'*esterno*, e in effetti solo da *quanti* elettroni vi sono. Così le proprietà *chimiche* di una sostanza dipendono solo da un numero, il numero degli elettroni.

L'intera lista degli elementi chimici in realtà potrebbe essere chiamata 1, 2, 3, 4, 5 ecc. Invece di dire «carbonio», potremmo dire «elemento sei», intendendo sei elettroni, ma, naturalmente, quando gli elementi furono scoperti, non si sapeva che essi potevano essere numerati in questo modo e, in secondo luogo, ciò renderebbe tutto piuttosto complicato. È meglio avere a disposizione nomi e simboli per questi elementi, piuttosto che chiamarli ognuno con un numero.

Riguardo alla forza elettrica venne scoperto dell'altro. L'interpretazione naturale dell'interazione elettrica è semplicemente che due oggetti si attraggono l'un l'altro: «più» contro «meno». Però si scoprì che questa era un'idea inadeguata a rappresentare la situazione. Una rappresentazione più adeguata consiste nel dire che l'esistenza della carica positiva distorce, in un certo senso, o crea una «condizione» nello spazio, cosicché quando introduciamo la carica negativa, essa sente una forza. Tale potenzialità di produrre una forza si chiama *campo elettrico*. Quando introduciamo un elettrone in un campo elettrico, diciamo che esso viene «tirato». Dunque, abbiamo due regole: (a) la carica crea un campo e (b) le cariche nei campi subiscono forze e si muovono.

La ragione di ciò diventerà chiara quando discuteremo i seguenti fenomeni: se carichiamo elettricamente un corpo, diciamo un pettine, e poniamo poi un pezzo di carta carico a una certa distanza e muoviamo il pettine avanti e indietro, la carta risponde puntando sempre in direzione del pettine. Se lo agiamo più in fretta, si scopre che la carta rimane un po' indietro, cioè *vi è un ritardo* nell'azione. (Al primo stadio, quando spostiamo il pettine abbastanza lentamente, troviamo una complicazione, che è il *magnetismo*. Le influenze magnetiche hanno a che fare con *cariche in moto relativo*, così le forze magnetiche e quelle elettriche possono in realtà essere attribuite a un unico campo, come due aspetti diversi della stessa, identica cosa. Un campo elettrico variabile non può esistere senza magnetismo.) Se spostiamo la carta carica ancora più lontano, il ritardo è maggiore.

Allora si osserva una cosa interessante. Benché le forze tra due oggetti carichi presentino un'intensità inversa al *quadrato* della distanza, si trova che, quando agiamo una carica, l'influenza

si estende *molto più lontano* di quanto non immagineremmo a prima vista. Vale a dire che l'effetto diminuisce più lentamente dell'inverso del quadrato.

Vi è un'analogia: se ci troviamo in uno specchio d'acqua e in prossimità galleggia un sughero, noi possiamo spostarlo «direttamente» spingendo l'acqua con un altro sughero. Se guardaste soltanto i due *sugheri*, vedreste unicamente che l'uno si muove immediatamente in risposta al moto dell'altro: tra essi si attua un qualche genere di «interazione». Naturalmente ciò che in realtà noi facciamo è di turbare l'acqua; l'acqua disturba poi l'altro sughero. Potremmo creare una «legge» per cui, se si sospinge un poco l'acqua, un oggetto vicino, nell'acqua, dovrebbe muoversi. Se fosse più lontano, naturalmente il secondo sughero si muoverebbe appena, perché noi muoviamo l'acqua *localmente*. D'altra parte, se agiamo il sughero interviene un nuovo fenomeno per cui il movimento dell'acqua sposta l'acqua in quel punto ecc., e le *onde* si allontanano, cosicché, con l'oscillazione, si manifesta un'influenza *molto più lontana*, un'influenza oscillatoria, che non può essere compresa con l'interazione diretta. Quindi l'idea dell'interazione diretta deve essere sostituita da quella dell'esistenza dell'acqua, o nel caso elettrico, da quello che chiamiamo campo elettromagnetico.

Il campo elettromagnetico può trasportare delle onde; alcune di esse sono *luce*, altre sono usate nelle *trasmissioni radio*, ma il loro nome generale è *onde elettromagnetiche*. Queste onde oscillatorie possono avere varie *frequenze* (TABELLA 2.1). L'unica cosa veramente diversa da un'onda all'altra è la *frequenza di oscillazione*. Se agiamo una carica avanti e indietro sempre più rapidamente, e ne osserviamo gli effetti, otteniamo un'intera serie di diversi tipi di effetti, che vengono tutti unificati specificando soltanto un numero, il numero delle oscillazioni al secondo.

La comune «presa» di corrente elettrica nei circuiti che si trovano nelle pareti di un fabbricato ha una frequenza di circa 100 cicli al secondo. Se aumentiamo la frequenza fino a 500 o 1000 kilocicli al secondo (1 kilociclo = 1000 cicli) – noi siamo «nell'aria»⁽¹⁾ – questo è l'intervallo di frequenza che viene usato per le trasmissioni radio. (Naturalmente ciò non ha niente a che fare con l'*aria*! Possiamo avere le trasmissioni radio anche in mancanza d'aria.) Se aumentiamo ancora la frequenza entriamo nell'intervallo che viene usato per le trasmissioni FM e per la TV. Andando ancora oltre incontriamo certe onde corte usate per esempio nel *radar*. Salendo ancora con le frequenze non abbiamo bisogno di uno strumento per «vedere» il fenomeno, possiamo vederlo con gli occhi. Nell'intervallo di frequenza che va da $5 \cdot 10^{14}$ a 10^{15} cicli al secondo i nostri occhi vedrebbero l'oscillazione del pettine carico, se potessimo farlo vibrare così in fretta, come luce rossa, azzurra o violetta a seconda della frequenza. Le frequenze al di sotto di questo intervallo sono dette *infrarosse* e quelle al di sopra *ultraviolette*.

Il fatto che ci sia dato di vedere in un particolare intervallo di frequenza, dal punto di vista del fisico non rende quella parte dello spettro elettromagnetico più singolare delle altre, ma dal punto di vista umano, com'è naturale, essa è più interessante.

A frequenze ancora più alte abbiamo i raggi X, i quali non sono altro che luce di altissima frequenza. Ancora più in alto abbiamo i raggi gamma. Questi due termini, raggi X e raggi gamma, sono usati quasi come sinonimi. Di solito i raggi elettromagnetici provenienti dai nuclei sono detti raggi gamma, mentre quelli ad alta energia prodotti dagli atomi sono chiamati raggi X, ma a parità di frequenza essi sono fisicamente indistinguibili, indipendentemente dalla loro sorgente. A frequenze ancora più elevate, per esempio a 10^{24} cicli al secondo, troviamo che ci è possibile produrre tali onde artificialmente, per esempio mediante il sincrotrone che c'è qui al Caltech.

TABELLA 2.1 Lo spettro elettromagnetico.

Frequenza (oscillazioni/s)	Nome	Comportamento approssimativo
10^2	Perturbazione elettrica	Campo
$5 \cdot 10^5 - 10^6$	Trasmissione radio	Onde
10^8	FM-TV	
10^{10}	Radar	
$5 \cdot 10^{14} - 10^{15}$	Luce	
10^{18}	Raggi X	Particelle
10^{21}	Raggi γ nucleari	
10^{24}	Raggi γ «artificiali»	
10^{27}	Raggi γ nei raggi cosmici	

⁽¹⁾ L'espressione «on the air» (letteralmente «nell'aria») usata dall'autore, nell'ambito delle comunicazioni radio-televisive, significa «in onda». A ciò è dovuto il gioco di parole intraducibile, giustificato dall'inciso successivo. (N.d.T.)

Possiamo trovare onde elettromagnetiche di frequenza straordinariamente alta – con oscillazioni fino a mille volte più rapide di quelle del sincrotrone – nelle onde che si trovano nei *raggi cosmici*. Queste onde non possono essere da noi controllate.

2.3 Fisica quantistica

Avendo descritto il concetto di campo elettromagnetico e avendo visto che tale campo può trasportare delle onde, scopriamo subito che queste onde in realtà si comportano in una maniera strana che sembra discostarsi dal comportamento delle onde. A frequenze più alte esse si comportano assai similmente a *particelle*! È la *meccanica quantistica*, scoperta poco dopo il 1920, che spiega questo strano comportamento. Negli anni precedenti il 1920 la rappresentazione dello spazio come tridimensionale, e del tempo come cosa a sé, fu trasformata da Einstein, prima in una combinazione che definiamo spazio-tempo e poi in uno spazio-tempo *curvo* per rappresentare la gravitazione. Così la «scena» si è trasformata nello spazio-tempo e la gravitazione è presumibilmente una modifica dello spazio-tempo. Poi si scoprì che anche le regole del moto delle particelle erano inesatte. Le regole meccaniche dell'«inerzia» e della «forza», cioè le leggi di Newton, sono *sbagliate* nel mondo degli atomi. Anzi, si scoprì che i fenomeni su piccola scala si comportano in maniera *del tutto diversa* dai fenomeni su grande scala. È questo che rende la fisica difficile – e molto interessante. È difficile perché il modo in cui le cose si comportano su piccola scala è assai «innaturale»; noi non ne abbiamo un'esperienza diretta. Qui le cose si comportano diversamente da tutto ciò che conosciamo, cosicché è impossibile descrivere tale comportamento per vie che non siano quelle analitiche. È difficile e richiede grande immaginazione.

La meccanica quantistica ha diversi aspetti. In primo luogo, l'idea che una particella abbia una posizione e una velocità definite non è più ammessa: è sbagliata. Per dare un esempio di quanto sia errata la fisica classica, vi è, nella meccanica quantistica, una regola che afferma che non è possibile sapere contemporaneamente dove si trova un certo oggetto e a che velocità si sta muovendo. L'incertezza circa la quantità di moto e quella sulla posizione sono complementari, e il prodotto delle due è costante. Possiamo scrivere la legge così: $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$, ma ci spiegheremo con maggior precisione più avanti.

Questa regola è la spiegazione di un paradosso assai oscuro: se gli atomi sono composti di cariche «più» e di cariche «meno», perché le cariche negative non si pongono semplicemente sulle cariche positive (esse si attraggono fra loro) e non vengono a contatto in modo da annullarle completamente? *Perché gli atomi sono così grandi?* Perché il nucleo si trova al centro ed è circondato dagli elettroni? Dapprima si pensò che ciò avvenisse perché il nucleo era molto grande; invece no, il nucleo è *piccolissimo*. Un atomo ha un diametro di circa 10^{-8} cm. Il nucleo ha un diametro di circa 10^{-13} cm. Se avessimo un atomo e desiderassimo vederne il nucleo, dovremmo ingrandirlo fino a che l'intero atomo non avesse le dimensioni di una stanza spaziosa, e anche allora il nucleo sarebbe una semplice macchiolina appena visibile a occhio nudo; tuttavia quasi *tutto il peso* dell'atomo si trova in quel *nucleo* infinitesimale. Cosa trattiene gli elettroni dal cadere nel nucleo? Questo principio: se essi si trovassero nel nucleo, ne conosceremmo la posizione esattamente, e il principio di indeterminazione richiederebbe allora che essi possedessero una quantità di moto molto *grande* (ma indeterminata), cioè una grandissima *energia cinetica*. Con questa energia essi si staccerebbero dal nucleo. Gli elettroni arrivano a un compromesso: lasciano essi stessi un piccolo spazio per tale indeterminazione e poi oscillano con un movimento minimo secondo tale regola. (Ricorderete che quando un cristallo è raffreddato fino allo zero assoluto, gli atomi non cessano di muoversi, ma continuano ad agitarsi. Perché? Se essi smettessero di muoversi, noi sapremmo dove si trovano e che sono in quiete, e ciò è contro il principio di indeterminazione. In realtà noi non possiamo sapere dove essi si trovano né a che velocità si muovono, quindi devono essere in movimento continuo!)

Un'altra trasformazione interessantissima nelle idee e nella filosofia della scienza dovuta alla meccanica quantistica è la seguente: non è possibile prevedere *esattamente* che cosa accadrà in qualsiasi circostanza. Per esempio, è possibile predisporre un atomo a emettere luce, e siamo in grado di misurare quando ha emesso luce raccogliendo un fotone, particella che presto descrive-

remo. Tuttavia non possiamo predire *quando* emergerà la luce o, nel caso di molti atomi, quale di essi la emergerà. Si potrebbe supporre che ciò sia dovuto ad alcuni «meccanismi» interni che non abbiamo osservato sufficientemente. No, non vi *sono* meccanismi interni; la natura, come noi oggi siamo in grado di capirla, si comporta in modo tale che è *fondamentalmente impossibile* fare una previsione precisa di *ciò che esattamente accadrà* in un dato esperimento. Questa è una cosa sconcertante; infatti i filosofi avevano affermato in precedenza che uno dei requisiti fondamentali della scienza è quello per cui, ogniqualvolta vengono ricreate le stesse condizioni, deve verificarsi la stessa cosa. Questo semplicemente *non è vero*; *non è* una condizione fondamentale della scienza. La realtà è che non sempre accade la stessa cosa e che noi possiamo soltanto trovare statisticamente una media di quanto accade. Nondimeno, la scienza non è completamente crollata.

I filosofi, incidentalmente, dicono un mucchio di cose su ciò che è *assolutamente necessario* per la scienza, e questo è sempre, per quanto si può vedere, piuttosto ingenuo e verosimilmente sbagliato. Per esempio, un qualche filosofo ha affermato che è fondamentale, per il lavoro scientifico, che se un esperimento è compiuto a Stoccolma, diciamo, e poi lo stesso esperimento è fatto per esempio a Quito, debbono essere ottenuti gli *stessi risultati*. Questo è del tutto falso. Non è necessario che la *scienza* faccia questo; può essere un *risultato dell'esperienza* ma non è necessario che lo sia. Per esempio, se uno degli esperimenti è di guardare il cielo e assistere all'aurora boreale a Stoccolma, non la vedrete certamente a Quito; quello è un fenomeno particolare. «Ma», direte voi, «questo è qualcosa che ha a che fare con l'esterno; è possibile rinchiudersi in una scatola a Stoccolma, tirare giù il coperchio e ottenere qualche differenza?». Sicuramente. Se prendiamo un pendolo su un giunto cardanico, lo tiriamo su e poi lo lasciamo andare, il pendolo oscillerà quasi su un piano, ma non esattamente. Il piano continua lentamente a cambiare a Stoccolma, ma non a Quito. Eppure le persiane sono chiuse. Il fatto che ciò sia accaduto non provoca la rovina della scienza.

Qual è l'ipotesi fondamentale della scienza, la sua filosofia fondamentale? Lo abbiamo dichiarato nel primo capitolo: *la prova unica della validità di un qualsiasi concetto è l'esperimento*. Se risulta che la maggior parte degli esperimenti funzionano allo stesso modo sia a Quito sia a Stoccolma, allora quella «maggior parte di esperimenti» verrà usata per formulare una qualche legge generale, e gli esperimenti che non riescono uguali diremo che sono stati il risultato delle condizioni ambientali della zona di Stoccolma. Inventeremo una qualche maniera di riassumere i risultati dell'esperimento, e non abbiamo bisogno di essere informati prima del tempo su quale sarà il modo di riassumere. Se ci dicono che lo stesso esperimento produrrà sempre il medesimo risultato, va tutto bene, ma se quando lo cerchiamo, il risultato *non è quello*, *non è quello* e basta. Noi dobbiamo soltanto prendere ciò che vediamo, e quindi formulare tutti gli altri nostri concetti in funzione della nostra reale esperienza.

Per tornare di nuovo alla meccanica quantistica e alla fisica fondamentale, non possiamo naturalmente entrare ora nei dettagli sui principi della meccanica quantistica, perché essi sono piuttosto difficili da comprendere. Supporremo che essi esistano e procederemo a descrivere quali ne sono alcune delle conseguenze. Una delle conseguenze è che cose che eravamo abituati a considerare come onde si comportano anche come particelle e le particelle come onde; in realtà ogni cosa si comporta alla stessa maniera. Non vi è distinzione fra un'onda e una particella. Dunque la meccanica quantistica *unifica* in un tutto l'idea del campo e delle sue onde, e quella delle particelle. Ora, è vero che quando la frequenza è bassa, l'aspetto di campo del fenomeno è più evidente, o più utile come descrizione approssimativa in termini di esperienza quotidiana. Ma man mano che la frequenza aumenta, gli aspetti particellari del fenomeno diventano più evidenti con l'apparato con cui di solito facciamo le misure. Infatti, benché abbiamo ricordato parecchie frequenze, nessun fenomeno che coinvolga direttamente una frequenza è stato ancora scoperto al di sopra di circa 10^{12} cicli al secondo. Noi *deduciamo* soltanto le frequenze più alte dall'energia delle particelle, per mezzo di una regola che suppone valido il concetto onda-particella della meccanica quantistica.

Così abbiamo una nuova visione dell'interazione elettromagnetica. Abbiamo un nuovo genere di *particella* da aggiungere all'elettrone, al protone e al neutrone. Tale nuova particella è chiamata *fotone*. La nuova visione dell'interazione fra elettroni e fotoni, che è la teoria elettromagnetica corretta secondo la meccanica quantistica, è detta *elettrodinamica quantistica*. Questa teoria fondamentale dell'interazione di luce e materia, ovvero campo elettrico e cariche, è il nostro

massimo successo nella fisica, fino a oggi. In quest'unica teoria abbiamo le regole fondamentali per spiegare tutti i normali fenomeni a eccezione della gravitazione e dei processi nucleari. Per esempio, dall'elettrodinamica quantistica vengono tutte le leggi elettriche, meccaniche e chimiche note: le leggi sulla collisione delle palle da biliardo, i moti dei fili nei campi magnetici, il calore specifico dell'ossido di carbonio, il colore delle insegne al neon, la densità del sale e le reazioni di idrogeno e ossigeno per produrre l'acqua sono tutte conseguenze di quest'unica legge. Tutti questi particolari possono venire elaborati se la situazione è abbastanza semplice da permetterci di fare un'approssimazione, il che non succede quasi mai, ma spesso riusciamo a capire più o meno ciò che accade. Oggi come oggi non si trovano eccezioni alle leggi dell'elettrodinamica quantistica al di fuori del nucleo, e là non sappiamo se vi sia un'eccezione, perché semplicemente ignoriamo cosa accade nel nucleo.

In linea di principio, dunque, l'elettrodinamica quantistica è la teoria dell'intera chimica, e della vita, se la vita in definitiva si riduce a chimica e quindi a fisica, dato che la chimica già vi è ridotta (essendo ormai nota quella parte della fisica connessa alla chimica). Inoltre, la stessa elettrodinamica quantistica, questa cosa fantastica, predice un gran numero di novità. In primo luogo, esprime le proprietà dei fotoni ad altissima energia, dei raggi gamma ecc. Essa ha predetto un altro fatto assai notevole: oltre all'elettrone dovrebbe esistere un'altra particella, della stessa massa ma di carica opposta, chiamata *positrone*, e queste due particelle unendosi potrebbero annichilirsi l'un l'altra con emissione di luce o di raggi gamma. (Dopo tutto, luce e raggi gamma sono la medesima cosa, infatti essi rappresentano punti diversi di una scala di frequenza.) La generalizzazione del fatto che per ogni particella esiste un'antiparticella risulta vera. Nel caso degli elettroni, l'antiparticella ha un altro nome (è chiamata infatti positrone), ma per la maggior parte delle altre particelle, la si denomina antiquesto o antiquello, come antiprotone o antineutrone. Nell'elettrodinamica quantistica sono introdotti soltanto *due numeri*, e la maggior parte degli altri numeri del mondo fisico si suppone che ne derivino. I due numeri introdotti sono la massa e la carica dell'elettrone. In realtà ciò non è del tutto vero, perché abbiamo a disposizione per la chimica tutto un insieme di numeri che ci dicono quanto pesano i nuclei. Questo ci introduce nella parte successiva.

2.4 Nuclei e particelle

Di che cosa sono composti i nuclei e come sono tenuti insieme? Si è scoperto che i nuclei sono tenuti insieme da forze enormi. Quando esse vengono liberate, l'energia che si sprigiona è enorme, se paragonata all'energia chimica: ha la stessa proporzione dell'esplosione di una bomba atomica in rapporto a un'esplosione di TNT, perché, ovviamente, la bomba atomica ha a che fare con trasformazioni interne al nucleo, mentre l'esplosione di TNT ha a che fare con trasformazioni degli elettroni all'esterno degli atomi. La questione che si presenta è la seguente: quali sono le forze che tengono uniti i protoni e i neutroni nel nucleo? Proprio come l'interazione elettrica può essere associata a una particella, un fotone, Yukawa lanciò l'idea che le forze fra neutroni e protoni abbiano anch'esse un campo di qualche genere, e che quando questo campo si agita, si comporti come una particella. Quindi potevano esistere nel mondo altre particelle, oltre i protoni e i neutroni, ed egli fu in grado di dedurre le proprietà di tali particelle dalle caratteristiche già note delle forze nucleari. Per esempio, predisse che avrebbero avuto una massa 200 o 300 volte quella di un elettrone; e, guarda caso, nei raggi cosmici si scoprì una particella proprio con questa massa! Ma più tardi risultò non essere la particella cercata. Essa venne denominata mesone μ o muone.

Comunque, poco più tardi, nel 1947 o 1948, si scoprì un'altra particella, il mesone π , o pione, che soddisfaceva il criterio di Yukawa. Oltre il protone e il neutrone, dunque, per ottenere delle forze nucleari dobbiamo aggiungere il pione. Ora voi direte: «Fantastico! Con questa teoria noi facciamo della nucleodinamica quantistica usando i pioni proprio come voleva Yukawa. Vediamo se funziona e tutto sarà spiegato.» Sfortunatamente risulta che i calcoli relativi a questa teoria sono talmente difficili che nessuno è mai stato in grado di calcolare quali siano le conseguenze della teoria, o di verificarla sperimentalmente, per quanto gli esperimenti siano andati avanti per

quasi vent'anni! Sicché siamo rimasti bloccati con una teoria, e non sappiamo se sia giusta o sbagliata, ma sappiamo che è *un po'* sbagliata o almeno incompleta.

Mentre stavamo gingillandoci con la teoria, cercando di calcolare le conseguenze della teoria stessa, gli sperimentali hanno scoperto alcune cose. Per esempio, essi avevano già scoperto questo mesone μ o muone, mentre noi non sappiamo ancora dove va messo. Inoltre nei raggi cosmici fu trovato un gran numero di altre particelle «in sovrappiù». Il risultato è che oggi abbiamo circa trenta particelle ed è molto difficile capire le relazioni di tutte queste particelle e che cosa la natura richieda da loro, o quali siano i rapporti fra l'una e l'altra. Oggi non comprendiamo queste varie particelle come aspetti diversi della stessa cosa, e il fatto che abbiamo tante particelle non collegate è la dimostrazione che abbiamo molte informazioni slegate senza una teoria valida.

Dopo i grandi successi dell'elettrodinamica quantistica, vi è un certo numero di cognizioni di fisica nucleare che è allo stato di conoscenza grezza, qualcosa che è per metà esperienza e per metà teoria, che presuppone un tipo di forza tra neutroni e protoni e che sta a osservare quello che accadrà, ma che non può in pratica comprendere l'origine della forza. A parte ciò, abbiamo fatto pochissimi progressi.

Abbiamo raccolto un numero enorme di elementi chimici. Nel caso della chimica comparve all'improvviso fra questi elementi una relazione inaspettata, che è contenuta nella tavola periodica di Mendeleev. Per esempio il sodio e il potassio hanno circa le stesse proprietà chimiche e si trovano nella stessa colonna della tavola di Mendeleev.

Abbiamo cercato di costruire, per le nuove particelle, una tavola simile a quella di Mendeleev. Una tavola simile è stata elaborata separatamente da Gell-Mann negli Stati Uniti e da Nishijima in Giappone. La base della loro classificazione è un nuovo numero, come la carica elettrica, che può essere assegnato a ciascuna particella, chiamato «stranezza», S . Questo numero si conserva, come la carica elettrica, in reazioni che hanno luogo tramite forze nucleari.

Nella TABELLA 2.2 sono elencate tutte le particelle. Non possiamo discuterle molto in questo momento, ma la tabella vi mostrerà almeno quante cose non sappiamo. Sotto ciascuna particella è indicata la massa in una unità di misura chiamata MeV: 1 MeV è pari a $1,783 \cdot 10^{-27}$ grammi. Il motivo per cui fu scelta questa unità è storico e per il momento non ci occuperemo di ciò. Le particelle di massa più elevata sono poste più in alto nella tabella; vediamo che un neutrone e un protone hanno quasi la stessa massa. Nelle colonne abbiamo sistemato le particelle con uguale carica elettrica; nella colonna centrale sono elencate le particelle neutre, nella colonna a destra ci sono quelle che hanno carica positiva, mentre a sinistra ci sono quelle con carica negativa. Le particelle sono indicate con una linea continua e le «risonanze» con una linea tratteggiata.

Dalla tabella sono state omesse parecchie particelle, tra le quali le importanti particelle di massa zero e carica zero, il fotone e il gravitone, i quali non entrano nello schema di classificazione barione-mesone-leptone, e pure alcune delle risonanze più recenti (K^* , φ , η). Le antiparticelle dei mesoni sono elencate nella tabella, ma quelle dei leptoni e dei barioni dovrebbero essere elencate in un'altra tabella che avrebbe esatta-

TABELLA 2.2 Particelle elementari.

Massa (MeV)	Carica			Stranezza e raggruppamento
	-e	0	+e	
1400	$\underline{Y_1^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-}$	$\underline{Y_1^0 \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0}$	$\underline{Y_1^+ \rightarrow \Lambda^0 + \pi^+}$ 1395	$S = -2$
1300	$\underline{\Xi^-}$ 1319	$\underline{\Xi^0}$ 1311		$S = -2$
1200	$\underline{\Sigma^-}$ 1196	$\underline{\Sigma^0}$ 1191	$\underline{\Sigma^+}$ 1189	$S = -1$
1100		$\underline{\Lambda^0}$ 1115		$S = -1$
1000		\underline{n} 939	\underline{p} 938	$S = 0$
800		$\underline{\omega^0 \rightarrow \pi + \pi + \pi}$		$S = 0$
700	$\underline{\varrho^- \rightarrow \pi + \pi}$	$\underline{\varrho^0 \rightarrow \pi + \pi}$	$\underline{\varrho^+ \rightarrow \pi + \pi}$	$S = 0$
500	$\underline{K^-}$ 494	$\underline{K^0 K^0}$ 498	$\underline{K^+}$ 494	$S = \pm 1$
100	$\underline{\pi^-}$ 139,6	$\underline{\pi^0}$ 135,0	$\underline{\pi^+}$ 139,6	$S = 0$
	$\underline{\mu^-}$ 105,6			LEPTONI
0	$\underline{e^-}$ 0,51	$\underline{\nu^0}$ 0		

mente lo stesso aspetto di questa, riflessa rispetto alla colonna di carica zero. Anche se tutte le particelle, a eccezione di elettrone, neutrino, fotone, gravitone e protone, sono instabili, i prodotti di decadimento sono stati indicati solo per le risonanze. Le assegnazioni di stranezza non si possono applicare ai leptoni, dal momento che essi non interagiscono fortemente con i nuclei.

Tutte le particelle che si trovano insieme ai neutroni e ai protoni sono dette *barioni*, e sono le seguenti: vi è una «lambda», con una massa di 1115 MeV, e altre tre, chiamate «sigma», positiva, neutra e negativa, con masse quasi identiche. Vi sono gruppi o multipletti con quasi la stessa massa entro l'uno o il due per cento. Ciascuna particella di un multipletto ha la medesima stranezza. Il primo multipletto è il doppietto protone-neutrone, poi vi è un singoletto (la lambda), quindi il tripletto sigma e infine il doppietto «xi». Recentemente, nel 1961, sono state scoperte altre particelle. Ma *sono* poi particelle? Esse vivono per un tempo così breve, disintegrandosi quasi istantaneamente, appena formate, che non sappiamo se debbano essere considerate come nuove particelle oppure come un qualche genere di interazione di «risonanza» di una certa energia definita fra i prodotti Λ e π in cui esse si disintegrano.

Le altre particelle interessate nell'interazione nucleare, in aggiunta ai barioni, sono chiamate *mesoni*. Prima ci sono i pioni, che si presentano in tre varietà, positiva, negativa e neutra; essi formano un altro multipletto. Abbiamo anche scoperto nuove particelle chiamate mesoni K, i quali si presentano come un doppietto K^+ e K^0 . Inoltre ogni particella ha la propria antiparticella, a meno che una particella *non sia anche l'antiparticella di se stessa*. Per esempio, π^- e π^+ sono antiparticelle, ma π^0 è antiparticella di se stessa. K^- e K^+ sono antiparticelle e anche K^0 e \bar{K}^0 . Inoltre nel 1961 abbiamo trovato anche altri mesoni, o *probabili* mesoni, che si disintegrano quasi all'istante. Una cosa chiamata ω che decade in tre pioni, ha massa 780 in questa scala, e, seppure un po' meno sicuro, un oggetto che si disintegra in due pioni. Queste particelle chiamate mesoni e barioni, e le antiparticelle dei mesoni, sono nella tabella, ma le antiparticelle dei barioni vanno poste in un'altra tabella «riflessa» rispetto alla colonna di carica zero.

Proprio come la tavola di Mendeleev era ottima a eccezione del fatto che vi era un certo numero di elementi, appartenenti alle terre rare, che ne restavano fuori, così abbiamo un certo numero di cose che rimangono fuori da questa tavola: particelle che non interagiscono fortemente nei nuclei, non hanno a che fare con un'interazione nucleare e non hanno una forte interazione (intendo il tipo di interazione forte dell'energia nucleare). Esse sono denominate *leptoni* e sono le seguenti: vi è l'elettrone che ha, in questa scala, una massa piccolissima, soltanto 0,510 MeV. Poi vi è il mesone μ , il muone, che ha una massa molto maggiore, 206 volte quella di un elettrone. Per quanto se ne può dire, a giudicare dagli esperimenti fatti finora, la differenza tra l'elettrone e il muone non consiste in altro che nella massa. Tutto funziona esattamente alla stessa maniera nel muone e nell'elettrone, eccetto che l'uno è più pesante dell'altro. Perché ce n'è uno più pesante? A che scopo? Non lo sappiamo. Inoltre esiste un leptone neutro, chiamato neutrino, che ha massa zero. In effetti, ora si sa che esistono *due* diverse specie di neutrini, uno legato agli elettroni e l'altro ai muoni.

Infine abbiamo altre due particelle che non interagiscono fortemente con quelle nucleari: una è il fotone e forse, se anche il campo gravitazionale ha un analogo nella meccanica quantistica (una teoria quantistica della gravitazione non è stata ancora elaborata), ci sarà anche una particella, il gravitone, che avrà massa zero.

Cos'è questa «massa zero»? Le masse qui indicate sono quelle delle particelle *a riposo*. Il fatto che una particella abbia massa zero significa, in un certo senso, che non può *essere a riposo*. Un fotone non è mai a riposo, ma si muove sempre a 300 000 km/s. Comprenderemo meglio cosa significa massa quando parleremo della teoria della relatività, il che avverrà a tempo debito.

Ci troviamo, dunque, di fronte a un gran numero di particelle, le quali, nel loro insieme, appaiono come componenti fondamentali della materia. Fortunatamente queste particelle non sono *tutte* diverse nelle loro mutue *interazioni*. Infatti fra le particelle pare vi siano appena *quattro tipi* d'interazione, che in ordine di forza decrescente sono la forza nucleare, le interazioni elettriche, l'interazione del decadimento beta e la gravità. Il fotone si accoppia a tutte le particelle cariche e la forza dell'interazione è misurata da un certo numero, che è 1/137. La legge particolareggiata di questo accoppiamento è conosciuta, essa è l'elettrodinamica quantistica. La gravità è accoppiata a ogni tipo di *energia*, ma il suo accoppiamento è estremamente debole, molto più debole di quello dell'elettricità. Anche questa legge è nota. Poi vi sono i cosiddetti decadimenti deboli –

TABELLA 2.3 Interazioni elementari.

Accoppiamento	Forza ^(*)	Legge
Fotone con particelle cariche	$\sim 10^{-2}$	Legge nota
Gravità con ogni tipo di energia	$\sim 10^{-40}$	Legge nota
Decadimenti deboli	$\sim 10^{-5}$	Legge parzialmente nota
Mesoni con barioni	~ 1	Legge sconosciuta (alcune regole note)

(*) La «forza» è una misura adimensionale della costante di accoppiamento relativa a ciascuna interazione (\sim significa «dell'ordine di»).

decadimento beta, per esempio, il quale fa sì che il neutrone si disintegri, relativamente adagio, in protone, elettrone e neutrino. Questa legge è solo parzialmente nota. La cosiddetta interazione forte, interazione mesone-barione, ha una forza pari a 1 in questa scala e la legge è del tutto sconosciuta, benché vi sia un certo numero di regole note, come quella per cui, in qualsiasi reazione, il numero dei barioni non cambia (TABELLA 2.3).

Questa è pertanto la sconcertante condizione della fisica di oggi. Per riassumerla, direi questo: all'esterno del nucleo, sembra che conosciamo tutto; internamente a esso, è valida la meccanica quantistica – non si sono trovate violazioni ai principi della meccanica quantistica. Diremmo che la scena su cui poniamo tutta la nostra conoscenza è quella dello spazio-tempo relativistico; la gravità è implicata nello spazio-tempo. Noi non sappiamo come ebbe inizio l'universo, e non abbiamo mai fatto esperimenti che verifichino esattamente i nostri concetti di spazio e tempo, al di sotto di una certa distanza minima, sicché *sappiamo* soltanto che i nostri concetti funzionano al di sopra di quella distanza. Dovremmo anche aggiungere che le regole del gioco sono i principi della meccanica quantistica, e che quei principi si applicano, per quanto ne possiamo dire, sia alle nuove particelle sia alle vecchie. L'origine delle forze nei nuclei ci porta a nuove particelle, ma sfortunatamente esse appaiono in gran profusione e ci manca una totale comprensione dei loro rapporti, benché sappiamo già che vi sono fra loro alcuni rapporti assai sorprendenti. Sembra che, poco per volta e brancolando, ci avviamo verso la comprensione del mondo delle particelle subatomiche, ma in realtà non sappiamo quanta strada avremo ancora da percorrere prima di raggiungere la meta.