

***i*blu** pagine di scienza

Silvia Arroyo Camejo

Il bizzarro mondo dei quanti

 Springer

Tradotto dall'edizione originale tedesca:
Skurrile Quantenwelt di Silvia Arroyo Camejo
Copyright © Springer-Verlag Heidelberg 2006
Springer is part of Springer Science + Business Media.
Tutti i diritti riservati

Traduzione a cura di Stefano Ruggerini

Springer-Verlag fa parte di Springer Science+Business Media
springer.com
Versione in lingua italiana: © Springer-Verlag Italia, Milano 2008

ISBN 978-88-470-0643-0
e-ISBN 978-88-470-0644-7

Quest'opera è protetta dalla legge sul diritto d'autore. Tutti i diritti, in particolare quelli relativi alla traduzione, alla ristampa, all'uso di figure e tabelle, alla citazione orale, alla trasmissione radiofonica o televisiva, alla riproduzione su microfilm o in database, alla diversa riproduzione in qualsiasi altra forma (stampa o elettronica) rimangono riservati anche nel caso di utilizzo parziale. Una riproduzione di quest'opera, oppure di parte di questa, è anche nel caso specifico solo ammessa nei limiti stabiliti dalla legge sul diritto d'autore, ed è soggetta all'autorizzazione dell'Editore. La violazione delle norme comporta le sanzioni previste dalla legge.

Collana ideata e curata da: Marina Forlizzi

Redazione: Barbara Amorese
Impaginazione: le-tex publishing services, Leipzig
Copertina: progetto grafico di Simona Colombo, Milano;
ideazione grafica di Massimiliano Caleffi, Milano;
elaborazione dell'immagine di Geraldine D'Alessandris, Milano
Immagine di copertina: © ColorBlind Images/Corbis
Stampa: Grafiche Porpora, Segrate, Milano

Stampato in Italia

Springer-Verlag Italia S.r.l., via Decembrio 28, I-20137 Milano

Sulla nascita di questo libro

Spesso mi è stato chiesto che diavolo mi ha preso per mettermi a scrivere un saggio sulla fisica quantistica all'età di 17 anni.

Ebbene, nel rispondere a questa domanda, vorrei per prima cosa chiarire quali motivi *non* mi hanno spinto a scrivere questo libro. Non ho mai desiderato farlo, per esempio, per realizzare un guadagno economico grazie alle vendite sul mercato dei libri. Nel concepire il presente scritto, il denaro non è mai intervenuto. Forse stato questo il caso, non avrei certamente scelto un tema che, nella memoria della maggior parte delle persone, evoca il brutto e sbiadito ricordo di una delle materie di scuola meno amate. Ripetutamente ho dovuto constatare – all'inizio con stupore – quanto fossi sola nella mia implacabile sete di conoscenze e nell'interesse enorme che nutro nei confronti dei processi stupefacenti che avvengono in natura e quanto, ogni volta che ne parlavo, andassi incontro regolarmente a incomprensioni e scuotimenti di testa.

Allo stesso modo, non è stato il desiderio del riconoscimento da parte degli altri a motivarmi in questa impresa, perché essere considerata da tutti un po' maniaca e malata non è particolarmente motivante.

Non posso nemmeno affermare che il presente scritto sia il frutto della noia o di trascurati impegni scolastici. Per la precisione, durante la stesura del libro, tra lezioni e compiti in classe, ero intensamente impegnata a scuola e mi sforzavo di ottenere un buon voto finale all'esame di maturità. In questa situazione, dunque, la produzione di capitoli di fisica quantistica aveva per me piuttosto il significato di un benvenuto – quanto impegnativo – svago.

Mio padre ha detto una volta che, davvero, un libro come il mio può essere scritto soltanto quando si è molto giovani. Solo in

gioventù si avrebbero la motivazione e la tenacia necessarie per fare una cosa simile, senza scopo o utilità, senza obblighi esterni e senza neanche l'ombra di interessi economici. Ebbene, se sia vero non lo so, ma spero tanto di riuscire a trovare anche più avanti negli anni, la forza e il tempo per poter provare di nuovo il piacere di fare una cosa inutile e senza scopo come questa ;-).

Che cosa è stato, allora, a spingermi a scrivere queste pagine? Semplicissimo: il mio amore per la fisica e il mio entusiasmo di fronte a quella molteplicità di affascinanti e complessi processi per i quali – in contrasto con la nostra esperienza quotidiana e il nostro cosiddetto buon senso – non valgono né il principio di causalità, né il concetto stesso di oggettività. Un mondo nel quale il caso assoluto e oggettivo entra legittimamente a far parte delle leggi fisiche e nel quale un oggetto quantistico può tranquillamente trovarsi, nello stesso istante, in posti diversi. Un mondo così pieno di contraddizioni e paradossi che a tratti sembra davvero mancare il terreno sotto i piedi. Tuttavia, per quanto complessi possano sembrare i fenomeni del microcosmo e poco intuitive le leggi che li governano, altrettanto affascinanti e meravigliose sono le conoscenze che si possono raggiungere sulla natura stessa di questo mondo, attraverso gli studi del comportamento fisico degli oggetti quantistici.

Io voglio conoscere la struttura ultima della natura. Voglio sapere come funziona questo mondo meraviglioso in cui viviamo. Per questo motivo, all'età di circa 15 anni, spinta da un'insopprimibile sete di sapere, mi procurai le prime nozioni sui meccanismi della fisica quantistica attraverso la lettura di libri di divulgazione scientifica. E via via andava crescendo il mio interesse per questo tema così avvincente e capace di impossessarsi completamente di me. Sempre più domande si affollavano nella mia mente, esigendo risposte che nessuno era in grado di darmi.

Dopo qualche tempo, mi accorsi di essere giunta a un limite che non avrei potuto superare con ulteriori letture di testi divulgativi. Tuttavia, il salto verso la letteratura specialistica, che è pensata soprattutto per gli studenti universitari e richiede la conoscenza della matematica superiore, era senz'altro impegnativo e appariva troppo difficile da compiere – se non del tutto impossibile – per una della terza liceo come me.

Questa divaricazione tra la letteratura scientifica divulgativa che evita accuratamente ogni formula matematica ed è accessi-

bile a tutti, e la letteratura specialistica nella quale, quasi in ogni pagina, si incontrano svariati integrali ed equazioni differenziali, fu all'inizio un problema per me. Tuttavia, grazie anche a biblioteche, negozi di libri usati e internet, riuscii finalmente a progredire nei miei studi e a prendere lentamente confidenza con il contesto quantitativo della disciplina. Ebbi così modo di constatare come diversi aspetti e proprietà della fisica quantistica, attraverso il formalismo matematico, diventassero molto più comprensibili e chiari. Riconobbi come una descrizione veramente comprensibile e non soltanto superficiale degli effetti quantistici fosse possibile solo attraverso lo studio di testi ben spiegati e corredati dal formalismo matematico appropriato. Una volta che ciò mi fu chiaro, dopo più di due anni di studi, cominciai a sentire il bisogno di dare un ordine alle conoscenze che avevo raccolto fino a quel punto e mi venne l'idea di fissare per iscritto, così come li avevo capiti io, un paio dei temi centrali o alcuni degli effetti che si presentano in meccanica quantistica. Nel farlo provai tanta gioia che cominciai a pensare seriamente a una esposizione più articolata di temi di fisica quantistica che fosse nuova nella concezione e valida dal punto di vista didattico, e che, sotto forma di un libro scritto da me, colmasse il vuoto esistente tra le pubblicazioni scientifiche divulgative e la letteratura specialistica.

Ciò che ne è risultato, gentili lettori, si trova in questo istante tra le vostre mani. Riassumendo, questo libro è la pura espressione della mia gioia nel dare una descrizione il più possibile comprensibile ed efficace dal punto di vista didattico, ma anche profonda e vasta, dei temi affascinanti della meccanica quantistica nonché il mio personale augurio di riuscire magari io stessa, un bel giorno, a contribuire allo sviluppo di queste meravigliose conoscenze. E tutto ciò semplicemente perché mi piace.

Berlino, dicembre 2005

Silvia Arroyo Camejo

Indice

Sulla nascita di questo libro	V
Introduzione	1
1 Luce e materia	7
Che cos'è veramente la luce?	7
Ma qui che cosa oscilla?	9
Che cosa sono la frequenza e la lunghezza d'onda della luce?	11
Che cos'è veramente la materia?	12
Di che cosa è fatta la materia dotata di massa a riposo?	13
Le particelle elementari sono davvero delle particelle?	15
2 L'origine della costante di Planck	17
Da dove nasce l'ipotesi quantistica?	17
Come venne risolto il problema della catastrofe ultravioletta?	19
Da che cosa dipende il contenuto di energia di un quanto di luce?	20
3 L'effetto fotoelettrico	23
Che cos'è l'effetto fotoelettrico?	23
Che c'è di non-classico nell'effetto fotoelettrico?	25
Come risolse Einstein queste contraddizioni?	28
Come è possibile ricavare da tutto ciò un valore per h ?	30
4 L'esperimento della doppia fenditura	33
Che cos'è l'esperimento della doppia fenditura?	33
Che succede nell'esperimento della doppia fenditura con la luce?	35
Come si spiega il motivo a strisce?	38
Allora la luce è un'onda?	40

5	L'esperimento della doppia fenditura con gli elettroni	43
	L'esperimento della doppia fenditura può essere condotto anche con gli elettroni?	43
	Che succede nell'esperimento della doppia fenditura con gli elettroni?	44
	È davvero impossibile spiegare la figura a strisce in un altro modo?	46
	L'elettrone deve allora essere considerato davvero come un'onda?	48
	Quali conclusioni bisogna trarre dai risultati dell'esperimento?	49
6	L'effetto Compton	51
	Che cosa si intende per effetto Compton?	51
	Come è possibile calcolare la variazione della lunghezza d'onda?	53
	Perché l'effetto Compton non si manifesta con la luce visibile?	57
	L'effetto Compton può essere spiegato solo con il modello corpuscolare?	59
7	Il principio di indeterminazione di Heisenberg	61
	Che cosa dice il principio di indeterminazione di Heisenberg?	61
	Come ci si può immaginare concretamente la relazione di indeterminazione?	63
	Anche la figura di interferenza si può spiegare con la relazione di indeterminazione?	64
	Che cosa è possibile concludere dall'esito degli esperimenti?	67
	È possibile condurre l'esperimento della doppia fenditura anche con altre particelle?	69
	Che cos'è allora l'elettrone adesso: un'onda o una particella?	70
8	Il collasso della funzione d'onda	73
	Dove sta in fondo la contraddizione tra i modelli corpuscolare e ondulatorio?	73

Che significa esattamente il dualismo onda-particella?	75
Come fa l'elettrone-onda a diventare una particella sullo schermo di proiezione?	77
Che succede al resto dell'elettrone-onda?	78
Come la mettiamo con la simultaneità e la trasmissione istantanea di informazione?	79
Che cosa provoca il collasso della funzione d'onda?	82
9 Il dibattito tra Bohr e Einstein	87
Quali furono i motivi del dibattito tra Bohr e Einstein?	87
Ma che cos'è in fondo il "caso", dal punto di vista fisico?	89
In che cosa consistevano le critiche di Einstein?	91
Che esperimenti discussero Bohr e Einstein?	94
Su quali fatti sperimentali si basava la discussione?	97
Come rispose Bohr?	98
Quali conclusioni possiamo trarre dal dibattito tra Bohr e Einstein?	100
10 Il modello atomico di Bohr	103
Quali modelli erano già stati proposti per l'atomo?	103
Quali sono i punti deboli del modello atomico di Rutherford?	106
Come risolve il modello di Bohr queste discrepanze?	107
Che cos'è il raggio di Bohr?	110
Quali valori assume l'energia nei livelli energetici dell'atomo?	112
Come avvengono l'assorbimento e l'emissione di fotoni?	113
Il modello atomico di Bohr è da considerare "giusto"?	115
11 L'equazione di Schrödinger	117
Che differenza c'è tra la meccanica delle matrici e la meccanica ondulatoria?	117
Quale significato si attribuisce alla funzione d'onda?	119
Come si ricava l'equazione di Schrödinger?	121
Che cosa si calcola con l'equazione di Schrödinger?	125
Quali ripercussioni ebbe l'equazione di Schrödinger sul modello atomico?	127

12 Il gatto di Schrödinger	131
Di che cosa si tratta quando si parla del gatto di Schrödinger?	131
In che cosa consiste l'esperimento mentale del gatto di Schrödinger?	133
Che c'è di paradossale in tutto ciò?	134
Come si rappresenta, in meccanica quantistica, la sovrapposizione di stati di una particella?	135
In che stato si trova il gatto?	139
13 L'interpretazione del formalismo della meccanica quantistica	141
Come si risolve il paradosso del gatto di Schrödinger?	141
Che cosa dice l'interpretazione di Copenhagen?	143
Che cosa dice l'interpretazione a molti mondi?	146
Che cosa dice la teoria della decoerenza?	151
Quale interpretazione corrisponde alla "realtà"?	158
14 Il paradosso EPR	161
Che cos'è il paradosso EPR e in quale contesto nasce?	161
Com'è fatto l'apparato sperimentale immaginario del paradosso EPR?	163
Non è allora più necessario il cambiamento di paradigma operato dalla meccanica quantistica?	167
La meccanica quantistica è davvero incompleta?	168
Meccanica quantistica o teorie delle variabili nascoste?	169
La meccanica quantistica esclude per principio le variabili nascoste?	170
Come è costruita la meccanica di Bohm?	172
15 La disuguaglianza di Bell	175
È possibile una verifica sperimentale dell'esistenza delle variabili nascoste?	175
Che cos'è lo spin di una particella?	176
Misurare lo spin secondo le teorie delle variabili nascoste oppure secondo la meccanica quantistica?	178
Com'è fatto l'esperimento EPR di Bohm?	181
Quali sono le previsioni delle teorie delle variabili nascoste?	184
Come avviene la verifica sperimentale delle previsioni?	188

16 Le moderne applicazioni della fisica quantistica	193
In che modo la fisica quantistica trova applicazioni pratiche?	193
Che cos'è l'informazione quantistica?	194
Che cos'è il teletrasporto quantistico?	195
Che cosa sono i computer quantistici?	202
Che cos'è la crittografia quantistica?	205
17 Gravità quantistica	215
A che serve una teoria quantistica della gravità?	215
C'è una soluzione al conflitto tra le due teorie?	217
Che cosa dice la teoria delle stringhe?	219
Che cosa dice la gravità quantistica a loop?	220
Esistono anche affinità tra le teorie della gravità quantistica?	222
La gravità quantistica è ancora fisica o già filosofia?	225
Postfazione	229
Glossario	233
Lecture ulteriori	239
Indice analitico	249

Introduzione

Che cos'è la fisica quantistica?

Verosimilmente, cari lettori, qualche volta vi sarete già posti almeno una delle seguenti domande:

Che cosa sono i quanti?

Che relazione ha la fisica quantistica con il mondo reale?

Di che cosa è fatta la materia?

Che cos'è il principio di indeterminazione di Heisenberg?

Che c'entra il gatto di Schrödinger?

Ciò che accade nel mondo viene determinato da variabili nascoste?

*Qual è il confine tra microcosmo e macrocosmo?
ecc.*

Sono domande, queste, di basilare importanza non solo per la fisica moderna, ma anche, in larga misura, per la nostra generale visione del mondo e dell'essenza della natura, per la fiducia che riponiamo nel nostro buon senso e nella capacità stessa dell'uomo di conoscere. In tempi passati, i paradigmi epistemologici – cioè i modelli e le immagini del mondo che orientano la conoscenza teorica – erano improntati grandemente a premesse e principi puramente filosofici e venivano da questi determinati. Che questo sia un approccio fin troppo comprensibile e naturale alle domande fondamentali sull'esistenza e la realtà del mondo, appare chiaro. Tuttavia, esattamente come le scienze in passato sono state in grado di sostituire progressivamente le interpretazioni mistiche e religiose con spiegazioni razionali, anche ai nostri giorni deve avere luogo un cambiamento di paradigma. Anche se non ne siamo sempre consapevoli, la nostra immagine del mondo – a dispetto di tutte le nuove e profonde conoscenze paradigmatiche della fisica moderna – è ancora assai simile a quella dei tempi di Newton,

attorno al 1700. Nutriamo una visione meccanicistica e deterministica del mondo, costruita e confermata sulla base degli eventi che abitualmente ci circondano nella vita di tutti i giorni.

Un tavolo da biliardo, per esempio, riunisce in sé tutti i pregiudizi insiti nella nostra visione del mondo. Sotto la banale azione di forze d'urto, nel rispetto delle leggi di conservazione dell'energia e della quantità di moto, hanno luogo collisioni facilmente calcolabili, accompagnate eventualmente da moti rotatori. È la classica visione del mondo meccanicistico-deterministica, così come la conosciamo tutti. Ma è davvero appropriata questa immagine della natura? Veramente tutti gli oggetti della natura si comportano in modo così semplice e prevedibile, come palle da biliardo?

Con queste domande fondamentali bene in mente, nel corso di questo libro proveremo a dare una sbirciatina nel misterioso, meraviglioso e affascinante mondo dei quanti, nel tentativo di fare anche noi qualche piccolo passo avanti nell'eterna ricerca dell'essenza ultima delle cose e del principio primo della natura.

Che cosa sono gli oggetti quantistici?

Ricominciamo allora da capo: che cos'è, in definitiva, la fisica quantistica? Ebbene, la *fisica quantistica* è quel settore della fisica che si occupa del comportamento degli oggetti quantistici. Fin qui, tutto bene. Ma che cos'è allora un oggetto quantistico?

Abitualmente, nella categoria degli *oggetti quantistici* rientrano oggetti di dimensioni atomiche o subatomiche, come, per esempio, le particelle elementari, di cui fanno parte anche i ben noti mattoni fondamentali dell'atomo: elettroni, protoni e neutroni. In una formulazione più generale, si può asserire che tanto la materia quanto la luce, su piccola scala, devono essere considerate oggetti quantistici. Tuttavia, anche raggruppamenti notevolmente più consistenti di materia, formati da parecchie dozzine di atomi, possono ancora comportarsi come oggetti quantistici. Qualcosa di più preciso in merito si apprenderà senz'altro nei capitoli seguenti.

A che scopo si fa ricerca nel campo del microcosmo?

Dopo aver in qualche modo spiegato di che cosa si occupa la fisica quantistica, potrebbe forse essere interessante capire per quale ragione ci si occupa del comportamento degli oggetti microscopici e si fa ricerca nel settore delle particelle più piccole. Non si può negare che chi fa ricerca di base nel settore della fisica quantistica, della fisica delle particelle o della fisica delle alte energie, è spinto non tanto dalle applicazioni pratiche che i risultati delle sue ricerche possono avere, quanto piuttosto dalla curiosità inesauribile e dall'intima esigenza di conoscere e comprendere il mondo emozionante e sconvolgente che lo circonda. In questo modo, un fisico teorico che indaga i fondamenti della natura si vede costantemente in bilico tra ricerche senza uno scopo e ricerca senza un senso. Per il vero scienziato, tuttavia, ciò non rappresenta un ostacolo al proprio lavoro. Le conoscenze che egli raggiunge, infatti, e alle quali tendono costantemente le sue ricerche, gli schiudono in fondo niente meno che l'incantevole essenza stessa della natura. Fatti come quello che un oggetto quantistico possa trovarsi contemporaneamente in due posti diversi o che l'oggettività nel microcosmo sembri non esistere affatto, o ancora che l'esistenza del "fantomatico effetto a distanza" – negata con veemenza da Einstein – sia una parte ineluttabile della realtà fisica, rendono le ricerche in fisica quantistica di gran lunga più emozionanti della lettura di qualunque romanzo giallo, magari anche ottimo, ma in fondo fittizio. È proprio questo che rende la fisica quantistica così affascinante: il fatto che non si tratti di utopistica fantascienza, bensì della realtà in persona. Nel regno dell'infinitamente piccolo, fanno parte della "quotidianità quantistica" cose che perfino nelle avventure di Star-Trek farebbero arricciare il naso, sembrando sciocchezze. Oppure, per dirla con le parole puntuali e significative del fisico teorico Daniel Greenberger:

Einstein diceva che il mondo non può essere così folle. Noi oggi invece sappiamo che è davvero folle così.¹

¹ "Einstein sagte, die Welt kann nicht so verrückt sein. Heute wissen wir, die Welt ist so verrückt." A. Zeilinger: *Einsteins Schleier* (C. H. Beck) 2003; p. 7. Ed. it.: *Il velo di Einstein* (Einaudi) 2006.

La fisica è una costruzione compiuta di idee?

A scuola – e forse l'avrete già potuto sperimentare voi stessi – viene data troppo spesso l'impressione che la fisica sia un edificio perfetto e compiuto del pensiero, fatto di un certo numero di equazioni in grado di descrivere ciascuna un qualche esperimento idealizzato. La sfida dei fisici consisterebbe perciò, ogni volta, nel pescar dalla raccolta la formula giusta, adatta alla particolare situazione, e di darla in pasto al computer, corredata da opportuni dati sperimentali, in modo che il calcolatore alla fine sputi fuori i risultati correttamente rilevati. Ebbene – e lo sottolineo espressamente – le cose davvero *non* stanno così!

Max Planck (1858–1947), colui che a buon diritto può essere considerato il padre della teoria dei quanti, ebbe a dubitare, da giovane, di quanto promettenti fossero gli studi in fisica, nonostante egli provasse un forte interesse per questa disciplina, che è alla base di tutte le scienze naturali. Bonariamente, un famoso professore di Fisica lo sconsigliò, dicendo che in fisica l'essenziale era già stato tutto scoperto e che si trattava ormai solamente di spiegare un paio di dettagli insignificanti, che ancora sfuggivano. Planck riuscì così bene a non farsi condizionare da questo amichevole consiglio che i suoi successivi lavori aprirono una nuova era nei canoni della fisica, innescando una vera e propria rivoluzione all'interno della disciplina. Nell'anno 1900 Planck scoperse un aspetto ancora sconosciuto della natura: la quantizzazione a livello del microcosmo.

Che succede nel microcosmo?

Proprio attorno a questa domanda, che riguarda la struttura più interna delle cose, i principi basilari della natura e l'essenza della costituzione fisica e del comportamento del cosmo stesso, ruota il tema principale di questa escursione nel regno del microcosmo, come un filo rosso che attraversa ogni singolo capitolo.

Vorrei avvisarvi, fin da questo primissimo momento, che nel corso del nostro ormai imminente viaggio attraverso la fisica quantistica e il mondo affascinante dell'infinitamente piccolo, andremo sicuramente a sbattere la testa, per così dire, contro alcuni limiti della comprensione e della conoscenza. Ciò non dipenderà

comunque né da voi né dalle teorie fisiche prese in considerazione: è nella natura stessa degli oggetti considerati. Nel microcosmo si gioca una partita sottile, a tratti disorientante. Anche dopo i decenni di ricerca intensa e di successi della meccanica quantistica, gli oggetti quantistici sono e rimangono, inevitabilmente, un enigma, rappresentando l'essenza stessa della contraddittorietà, della impenetrabilità e del mistero. La fisica quantistica è così piena di paradossi inaspettati e di sorprese che la fiducia nelle proprie capacità di comprensione a volte ne esce scossa.

Tuttavia, a mio parere, è in fondo proprio questa (apparente) inaccessibilità epistemologica e questa enigmaticità del mondo quantistico a costituirne il fascino irresistibile.

Luce e materia

Che cos'è veramente la luce?

Già gli antichi greci si erano posti la domanda sulla natura della luce. Per quanto semplice questo quesito possa magari sembrare a un primo sguardo, rispondervi chiaramente è, al contrario, estremamente difficile. Nel corso dello sviluppo storico della fisica, lungo i secoli, la risposta a questa domanda è andata incontro a continui cambiamenti. Al lettore interessato al perché diremo soltanto, per ora, che ciò dipende dal fatto che la luce è una cosa maledettamente schizofrenica. Ne impareremo di più, comunque, nel seguito del libro. Adesso vogliamo invece dedicarci alla consueta, classica definizione di luce.

Prima di cominciare, tuttavia, è forse opportuno spiegare rapidamente che cosa si intende in fisica con l'aggettivo "classico". Lungo tutto il corso del libro, potrete constatare quanto spesso diremo di considerare i fatti fisici dal *punto di vista classico*, o che analizzeremo le previsioni della *teoria classica*, o espressioni del genere. Ogni volta la parolina "classico" starà a significare che esprimeremo il punto di vista della *fisica classica* sull'argomento in esame, dove, per fisica classica, intenderemo tutte le branche della fisica (e cioè la meccanica classica di Newton, l'elettrodinamica di Maxwell ecc. fino alla teoria della relatività di Einstein) con l'esclusione della fisica quantistica. Quest'ultima non rientra nella fisica classica perché reca con sé tratti talmente peculiari che la distinguono in modo significativo da tutto il resto. Ne parleremo meglio in proposito, comunque, più avanti. Quel che abbiamo detto fin qui era solo per

chiarire che tutte le teorie non quantistiche che tratteremo saranno qualificate con l'aggettivo "classico", in modo da poter distinguere anche concettualmente le vecchie teorie non quantistiche (dunque classiche) da quelle quantistiche (dunque non classiche).

Cominciamo allora con la teoria classica della luce. Se consultassimo un dizionario di fisica, troveremmo probabilmente una definizione simile alla seguente:

per "luce" si intende quella parte dello spettro della radiazione elettromagnetica compresa tra le lunghezze d'onda di $360 \cdot 10^{-9}$ m e $780 \cdot 10^{-9}$ m.

D'accordo, ma che possiamo farcene? Proverò a spiegarlo in modo un po' più comprensibile. Lo spazio (e cioè qualunque spazio, sia quello vuoto che quello pieno di terra, aria o qualunque altra cosa) è attraversato dal *campo elettromagnetico*. Per farsi un'idea intuitiva di questo campo, si può pensare a un grandissimo numero di corde o funi, tese attraverso lo spazio in tutte le direzioni. Se si agita una corda in un certo punto, la perturbazione si trasmette alle altre corde e si propaga nello spazio sotto forma di un'onda sferica tridimensionale. Le funi sono il mezzo attraverso il quale l'onda si propaga, esattamente come l'aria è il mezzo nel quale si propagano le onde sonore.

La luce si comporta in modo simile. Attraverso l'oscillazione periodica di una particella carica, i campi elettrico e magnetico che la circondano vengono messi a loro volta in vibrazione. Queste oscillazioni del campo elettrico vengono chiamate *onde elettromagnetiche*. Di per sé, un'onda elettromagnetica non è altro che un'oscillazione del campo elettromagnetico. L'energia di oscillazione dell'onda si propaga come una perturbazione del campo elettrico.

L'esistenza delle onde elettromagnetiche venne prevista per la prima volta dalle fondamentali equazioni che James Maxwell (1831–1879) propose per l'elettrodinamica classica e che, dal nome del loro scopritore, vengono anche chiamate *equazioni di Maxwell*. Esse descrivono, dal punto di vista teorico e matematico, la dinamica del campo elettrico e del campo magnetico. Le onde elettromagnetiche poterono essere rilevate sperimentalmente soltanto circa 27 anni dopo la scoperta teorica di Maxwell.

Fu Heinrich Hertz (1857–1894) il primo che riuscì a generarle in laboratorio e rilevarle nei suoi esperimenti del 1887.

Ma qui che cosa oscilla?

Potrebbero tuttavia essere rimasti ancora dei dubbi su come immaginarsi concretamente questi campi elettrici e magnetici oscillanti. A questo scopo, in figura 1.1 viene data una rappresentazione grafica di un'onda elettromagnetica. Occorre ora spiegare la struttura schematica di una simile onda.

Come si può ben notare, l'onda elettromagnetica possiede due direzioni di oscillazione. Il vettore del campo elettrico e quello del campo magnetico della radiazione elettromagnetica sono infatti sempre perpendicolari tra loro. Essi, inoltre, oscillano in fase, cioè raggiungono negli stessi istanti di tempo la massima *ampiezza* (= distanza dallo stato di quiete) e attraversano contemporaneamente la posizione di riposo. Infine, entrambi i campi sono perpendicolari alla direzione di propagazione dell'onda.

Le onde elettromagnetiche (come anche le onde che si propagano sulle corde o sull'acqua) appartengono alla categoria delle *onde trasversali*, caratterizzate dall'aver una direzione di oscillazione perpendicolare alla direzione di propagazione, al contrario

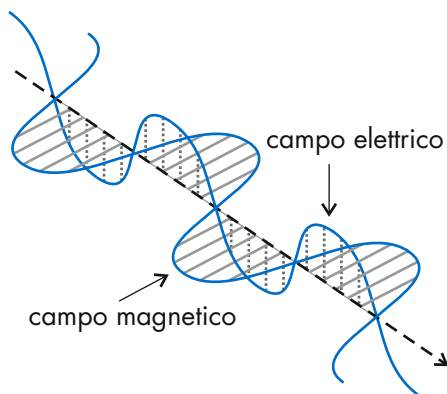


Fig. 1.1. Rappresentazione dei piani perpendicolari di oscillazione di un'onda elettromagnetica

di quanto accade con le *onde longitudinali* (come per esempio il suono), per le quali la direzione di oscillazione coincide con quella di propagazione. Una proprietà esclusiva delle onde trasversali è la *polarizzazione*, che consiste nella possibilità, per esempio per il vettore del campo elettrico dell'onda elettromagnetica, di oscillare in uno solo degli infiniti piani che contengono la direzione di propagazione. In questo caso si parla, in particolare, di onda *polarizzata linearmente*. La luce del sole, per esempio, non è polarizzata, ma se la si fa passare attraverso un filtro di polarizzazione si ottiene in uscita luce polarizzata secondo una determinata direzione.

Due ulteriori grandezze fondamentali che caratterizzano l'onda elettromagnetica sono la *lunghezza d'onda* λ e la *frequenza* ν . La lunghezza d'onda è semplicemente la distanza tra due punti identici dell'onda, come per esempio quelli mostrati in figura 1.2. La frequenza della radiazione, invece, fornisce il numero di oscillazioni che avvengono nell'unità di tempo. Lunghezza d'onda e frequenza sono tra loro inversamente proporzionali. È interessante notare che, moltiplicando tra loro queste grandezze, si ottiene la *velocità di propagazione* c dell'onda:

$$c = \nu \lambda. \quad (1.1)$$

Nel caso della radiazione elettromagnetica, si tratta proprio della ben nota velocità della luce, per la quale il simbolo c è universalmente adottato. Ogni volta che, nel corso del libro, la letterina c farà capolino in qualche formula, intenderemo sempre con essa la

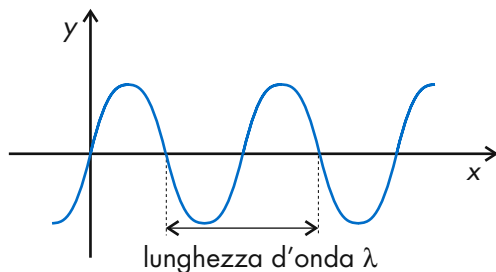


Fig. 1.2. La definizione di lunghezza d'onda

costante che esprime la *velocità della luce nel vuoto*, il cui valore è circa $c = 3,0 \cdot 10^8$ m/s. Quando non sarà questo il caso, il lettore verrà avvisato esplicitamente.

Che cosa sono la frequenza e la lunghezza d'onda della luce?

Teoreticamente, ci sono infiniti valori possibili per la frequenza e la lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica. Lo *spettro della radiazione elettromagnetica* contiene con continuità tutte le frequenze e le relative lunghezze d'onda della radiazione. Come si può riconoscere dal diagramma in scala logaritmica riportato in figura 1.3, lo spettro della radiazione elettromagnetica copre tutto l'arco delle frequenze e delle lunghezze d'onda che si estendono dalle cortissime onde della radiazione gamma forte, alle lunghe onde radio. Compresi tra questi estremi si trovano, nell'ordine: i raggi X duri e molli, la radiazione ultravioletta, il minuscolo campo di frequenze della radiazione visibile da noi esseri umani, i raggi infrarossi, la radiazione termica e, infine, le microonde. È davvero stupefacente che, in un certo qual modo, tutti questi tipi di radiazione siano essenzialmente identici alla luce che riusciamo a vedere con i nostri occhi, in quanto differiscono da essa unicamente per i valori della lunghezza d'onda o della frequenza. In fondo dipende solo da come è costruito il nostro organo della vista se siamo sensibili unicamente a questa porzione dello spettro e riusciamo a vedere solo questa parte di radiazione.

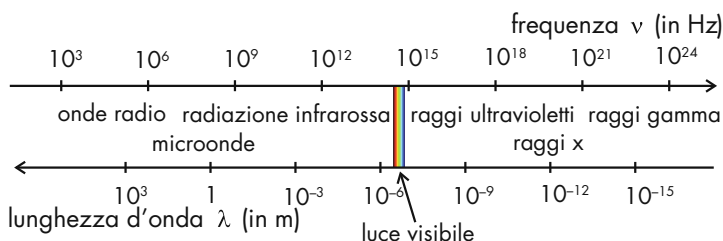


Fig. 1.3. Lo spettro della radiazione elettromagnetica, ordinato rispetto ai valori della frequenza ν e della lunghezza d'onda λ

A questo punto, ci si potrebbe chiedere perché ci sia questa grande abbondanza di frequenze nelle onde elettromagnetiche. La ragione principale risiede nel modo in cui le onde vengono generate. La sorgente delle onde gamma forti è, per esempio, un nucleo atomico radioattivo eccitato che, attraverso l'emissione di quanti gamma, può raggiungere uno stato energetico più favorevole. Le onde radio, al contrario, sono originate da un dipolo elettrico oscillante, un conduttore, cioè, aperto a un'estremità, al quale viene applicata una tensione elettrica alternata. Tutto considerato – a parte le diverse lunghezze d'onda – tutti i tipi di radiazione rappresentati in figura 1.3 sono essenzialmente identici dal punto di vista fisico, il che significa che sono tutti soggetti alle medesime leggi ottiche, proprio come la luce che vediamo.

Che cos'è veramente la materia?

A tutta prima, si potrebbe pensare qualcosa del tipo: “ma questo è chiaro! Materia è, appunto, tutto ciò che è materiale, che ha sostanza, che si può afferrare, al contrario delle microonde, della radiazione termica o della luce. Una pietra è chiaramente materiale: si può lanciarla in aria e ripiomba a terra con un tonfo. Questo non vale per la luce...”.

Ma allora come la mettiamo, per esempio, con un elettrone? Si lascia afferrare? Oppure consideriamo la radiazione alfa, che consiste di fasci di nuclei di elio: è davvero immateriale solo perché non si lascia tastare così facilmente o non si può vedere direttamente? Come si capisce, la questione è un po' imbrogliata e, per essere sinceri, non esiste nemmeno una definizione fisica precisa del concetto di *materia*. Naturalmente si potrebbe anche dire che è materia tutto ciò che ha massa, ma sappiamo, dalla scoperta di Einstein dell'*equivalenza energia-massa*, che

$$E = mc^2, \quad (1.2)$$

e cioè che ogni energia E è equivalente a una massa m , dove il quadrato della velocità della luce non rappresenta nient'altro che uno “speciale fattore di conversione”. Ogni energia ha allora una massa e a ogni massa può essere associata un'energia. Come si può ancora fare una distinzione tra ciò che ha massa e ciò che non ce l'ha?

E tuttavia, nonostante queste enormi difficoltà di definizione, c'è ancora la possibilità di fissare in qualche modo il concetto di materia: con questa parola si intendono tutte le particelle elementari dotate di massa a riposo. Ma che cos'è la massa a riposo? Per *massa a riposo* si intende la massa che una particella possiede quando non si muove; questo perché, secondo la *teoria della relatività ristretta*, ogni particella in moto è soggetta a un *aumento di massa*, che fa sì che la sua cosiddetta *massa dinamica* sia superiore alla sua massa a riposo. Al contrario, la luce e tutta la radiazione elettromagnetica in generale, non possiede massa a riposo, ma solo una massa dinamica. In questo modo si può operare una distinzione tra materia e radiazione.

Di che cosa è fatta la materia dotata di massa a riposo?

Come è universalmente noto ai nostri giorni, la materia che ci circonda è composta da minuscole particelle: gli *atomi*. Già nella Grecia antica, i filosofi Leucippo e Democrito (entrambi vissuti attorno al 500 a. C.) avevano formulato la loro ipotesi atomistica, secondo la quale, ogni cosa, in ultima istanza, doveva essere composta da particelle indivisibili.

Anche se queste prime supposizioni filosofiche possono sembrare piuttosto immotivate dal nostro attuale punto di vista, esse poterono trovare conferma soltanto molto tempo dopo, grazie al lavoro, tra gli altri, del chimico inglese John Dalton (1766–1844).

Da allora si succedettero sempre nuovi modelli atomici, diversi tra loro e continuamente migliorati. Il primo di questi, sviluppato dall'inglese Joseph Thomson (1856–1940) e chiamato anche *modello del panettone*, prevedeva che l'atomo fosse composto da una sorta di *pasta di materia* dotata di carica positiva, nella quale sarebbero stati immersi gli *elettroni* (scoperti anche questi da lui), recanti la carica negativa.

Tuttavia, di lì a poco, il neozelandese Ernest Rutherford (1871–1937) scoprì, con i suoi esperimenti sui fogli d'oro del 1909, che l'atomo, per la maggior parte, doveva essere vuoto e che gran parte della sua massa era concentrata in un nucleo estremamente piccolo e compatto, avente carica positiva. Gli elettroni, carichi negativamente, dovevano invece ruotare alla periferia dell'atomo, attor-

no al nucleo, a diverse distanze da esso, come in un sistema solare miniaturizzato, con il nucleo che fa le veci del sole e gli elettroni quelle dei pianeti. Divenne così chiaro che quella porzione ultima di materia che impropriamente era stata chiamata “atomos”, in verità era divisibile, eccome! L’atomo non poté più a lungo essere considerato la cosa più elementare, visto che era ulteriormente divisibile.

Dovette così necessariamente riformularsi la domanda se queste “frazioni di atomo”, a loro volta, fossero di natura elementare. Tuttavia, come si dimostrò, non lo sono affatto, perché il nucleo atomico è composto ulteriormente da due tipi di particelle: i *protoni*, carichi positivamente, e i *neutroni*, privi di carica, cioè neutri. Ma nemmeno queste particelle sono elementari, poiché sono fatte a loro volta di particelle e, precisamente, di *quark*, un nome dovuto al fisico delle particelle americano Murray Gell-Mann (n. 1926). Secondo il *modello standard della fisica delle particelle elementari*, i protoni p (uud) sono composti da due up-quark e un down-quark, mentre i neutroni n (udd) sono formati da due down-quark e un up-quark. Per la precisione, i quark dei suddetti nucleoni, assieme alle particelle di scambio dell’interazione nucleare forte (bosoni di scambio), costituiscono piuttosto un complicato e confuso agglomerato di quark, antiquark e diversi gluoni, un cosiddetto *plasma di quark e gluoni*, ma questo non dovrebbe cambiare nulla di sostanziale rispetto all’affermazione principale.

Per quanto ne sappiamo finora, questi quark sono davvero elementari, nel senso che non sono formati da altre particelle. E ci sono inoltre buoni motivi per credere che debba essere proprio così. Attualmente, quindi, tra i mattoni fondamentali dell’atomo, sono da considerare particelle elementari solamente gli *up-quark*, i *down-quark* e gli *elettroni*. Tuttavia – cosa apparentemente paradossale – sia i protoni che i neutroni sono annoverati tra le particelle elementari nonostante abbiamo appena visto che tali, in fondo, non sono.

È allora opportuno sottolineare qui, una volta per tutte, che “essere composto da altre particelle” non ha esattamente lo stesso significato di “essere divisibile”. Ma come? Ebbene, il fatto che, per esempio, un protone non sia ulteriormente divisibile, nonostante sia formato dai quark, molto più piccoli di lui, dipende da una proprietà della forza che tiene unito il protone o il neutrone. Tale forza, detta *interazione forte* (una delle quattro *forze fondamentali*

della natura), fa in modo che i quark non possano mai rimanere isolati. Di conseguenza, essi compaiono solo in formazioni da due, i *mesoni*, o in formazioni da tre, i *barioni*.

Il fenomeno per cui, per esempio, un gruppo di tre quark che formano un protone non può separarsi viene detto *inclusione dei quark* o anche *confinamento dei quark*. Questa interessante ed “esotica” proprietà dell’interazione forte – sia detto per inciso – rappresenta tuttora un enigma irrisolto nella ricerca sui fondamenti della fisica.

Recenti esperimenti condotti nei più grandi acceleratori di particelle del mondo sono volti a scovare, addirittura con un certo accanimento, un’ulteriore classe di particelle, i pentaquark, i quali, tuttavia, dovrebbero essere estremamente instabili. Si tratta di particelle composte da quattro quark e un antiquark. Esempi in proposito sono il Θ^+ ($uudd\bar{s}$), il Θ_c^0 ($uudd\bar{c}$) oppure lo Ξ^{--} ($ddss\bar{u}$). Come mostrano gli esperimenti attuali, provare in modo convincente la loro esistenza sembra estremamente difficile. Fino ad ora dieci esperimenti testimoniano a favore di questa tesi, ma altrettanti purtroppo depongono contro o forniscono un risultato che non consente di sbilanciarsi. Dalla prospettiva precaria di simili risultati sperimentali emergono dubbi persistenti sul fatto che gli esperimenti ideati fin qui siano da considerare convincenti. Una conferma veramente fondata della dubbia esistenza dei pentaquark potrà arrivare solo da esperimenti futuri¹. Ciò che invece è incontestato, è il fatto che queste ricerche sui pentaquark renderanno possibili nuove e profonde conoscenze sulla natura dell’interazione forte. Naturalmente, questi poliquark sono di straordinario interesse anche per la comprensione dell’enigmatico fenomeno del confinamento dei quark.

Le particelle elementari sono davvero delle particelle?

Da quanto abbiamo visto fin ora, le particelle elementari non sempre sono elementari nel vero senso della parola; tuttavia, per de-

¹ Una bella descrizione dei risultati “altalenanti” della ricerca si può trovare in K. Hicks: Experimental Search for Pentaquarks. Prog. Part. Nucl. Phys. **55** (2005); <http://arxiv.org/abs/hep-ex/0504027> (2005).

dicarci adesso all'altra metà del concetto, particelle lo saranno invece di sicuro, o no?

Ebbene, dipende! Nella fisica delle particelle elementari, il concetto di "particella" indica solitamente qualcosa di diverso da ciò a cui siamo abituati noi, nella nostra esperienza quotidiana, tra oggetti dell'ordine di grandezza di 10^{-1} m. Se ci immaginiamo una "particella", abbiamo in mente qualcosa di piccolo e compatto, paragonabile a una minuscola sferetta di metallo. Questa immagine di una *particella classica*, tuttavia, diventa sempre meno applicabile man mano che retrocediamo nella scala delle grandezze. Immaginiamo per un attimo di essere noi stessi degli oggetti del microcosmo, perfettamente adattati alla scala atomica e a proprio agio con dimensioni dell'ordine di 10^{-10} m. Allora saremmo subito costretti a riconoscere che la nostra immagine macroscopica di particella, intesa come una pallina minuscola e compatta, semplicemente non è più valida e dal punto di vista quantomeccanico rappresenta palesemente un non senso.

Una cosiddetta "particella", del tipo di quelle che imperversano abitualmente nel microcosmo, ha semplicemente tutt'un altro stile di vita: conduce, per così dire, una doppia vita. Proprio così: solo per metà del suo tempo è una particella, mentre per l'altra metà può comportarsi addirittura come un'onda. In qualche modo si è costretti, da un lato, ad ammettere che gli oggetti quantistici sono contemporaneamente uguali sia a particelle che a onde, non potendo, d'altro canto, inquadrarli separatamente in nessuna delle due categorie, perché non sono né onde classiche né particelle classiche. Essi si comportano in modo del tutto diverso da ciò a cui siamo abituati nel nostro "normale mondo classico". Le loro regole differiscono così tanto dalle nostre che dobbiamo confrontarci con difficoltà croniche ogni volta che tentiamo di seguire le loro astratte mosse sul campo. Questi oggetti non hanno niente a che vedere con tutto quello che siamo in grado di immaginare noi, limitati dal nostro orizzonte classico. Non sono né particelle macroscopiche, né onde macroscopiche: sono *oggetti quantistici*. E con l'aiuto di questo libro vogliamo tentare di metterci sulle loro tracce per comprendere il loro strano comportamento e conoscere un pochino più da vicino il loro meraviglioso, misterioso e affascinante carattere.