

Prefazione

LA FISICA QUANTISTICA è una materia classica: sviluppata circa un secolo fa, è parte integrante della formazione di un fisico da oltre cinquant'anni. Una sua singolare caratteristica è quella di essere tuttora un argomento di ricerca di frontiera. Ancora più singolare è forse il fatto che alcuni dei risultati più recenti, con lo sviluppo della teoria dell'informazione quantistica a partire dall'ultimo decennio del secolo scorso, riguardano non solo applicazioni, per quanto inaspettate, e verifiche sperimentali, per quanto spettacolari, ma toccano il nocciolo stesso della teoria.

L'insegnamento della fisica quantistica è però rimasto sorprendentemente stabile. Negli ultimi anni sono comparsi numerosi eccellenti libri di testo, che seguono sostanzialmente l'impianto dei testi classici scritti intorno alla metà del Novecento, e cioè i trattati di Messiah¹, Schiff² (e, in misura minore, Landau³ e Fermi⁴). L'impostazione di questi testi, ormai diventata tradizionale, presenta la fisica quantistica come il naturale sviluppo della teoria dei quanti di Max Planck e Niels Bohr. La fisica quantistica è vista come evoluzione di una meccanica ondulatoria, formulata in risposta alla crisi della fisica classica che tra la fine dell'Ottocento e l'inizio del Novecento ha portato alla nascita della fisica atomica.

Questo libro parte dall'ipotesi che un approccio diverso, radicato negli sviluppi più recenti, possa essere concettualmente più soddisfacente e didatticamente più efficace. In particolare, siamo convinti che i principi della fisica quantistica siano più trasparenti se formulati come in qualunque recente testo di informazione quantistica⁵, segnatamente, per sistemi con un numero finito di gradi di libertà. La meccanica quantistica è così il risultato dell'applicazione di questi principi alle leggi di base della meccanica, e può essere costruita a partire dalle proprietà di simmetria di quest'ultima.

A dire il vero, un punto di vista simile è alla base di alcune trattazioni altrettanto classiche, come il trattato di Dirac⁶ e i libri di testo di Sakurai⁷ e Gottfried⁸. Si tratta però di libri avanzati, in genere considerati di difficile accessibilità, forse a dimostrazione del fatto che quando sono stati scritti i tempi non erano maturi per un simile cambiamento di prospettiva. Dopotutto, la fisica è una scienza sperimentale, e gli esperimenti che permettono di motivare la fisica quantistica moderna — uno dei quali verrà adottato come punto di partenza di questo libro — hanno smesso di essere esperimenti ideali e sono diventati reali solo nel corso degli ultimi dieci anni o poco più.

L'approccio adottato qui si basa su due presupposti. Il primo è che le simmetrie forniscono il miglior principio organizzatore nella presentazione della fisica quantistica. Ciò suggerisce di sviluppare la formulazione della meccanica inizialmente in una sola dimensione, per poi passare allo studio di sistemi di più corpi e in più dimensioni. Il secondo è che i metodi algebrici sono in generale più trasparenti rispetto alle tecniche dell'analisi complessa. Ciò porta a privilegiare,

¹A. Messiah, *Mécanique quantique*, Parigi, 1959.

²L.I. Schiff, *Quantum Mechanics*, New York, 1949.

³L.D. Landau e E. Lifshitz, *Kvantovaya mehanika*, Mosca, 1947.

⁴E. Fermi, *Quantum Mechanics*, Chicago, 1961.

⁵B. Schumacher e M. Westmoreland, *Quantum Processes, Systems, and Information*, Cambridge, 2010.

⁶P.A.M. Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics*, Oxford, 1930.

⁷J.J. Sakurai, *Modern Quantum Mechanics*, Menlo Park, California, 1985.

⁸K. Gottfried, *Quantum Mechanics: Fundamentals*, New York, 1966.

in linea di massima, le tecniche operatoriali rispetto alla risoluzione di equazioni differenziali, sia nella formulazione della teoria, sia nella discussione delle sue applicazioni.

Questo libro si propone di fornire un'introduzione completa alla fisica quantistica. "Introduzione" significa che non si presuppone alcuna precedente esposizione alla meccanica quantistica o al suo formalismo. Gli unici prerequisiti sono conoscenze di base di analisi matematica, geometria analitica e algebra lineare (a livello dei primi due o tre semestri di qualunque corso di laurea triennale europeo in ambito scientifico), e una familiarità con il linguaggio della meccanica analitica a livello elementare. "Completa" significa che gli argomenti trattati coprono lo spettro di una formazione di base in fisica quantistica non-relativistica e sono sufficienti per affrontare corsi più avanzati, ad esempio di teoria quantistica dei campi o di fisica della materia, senza che sia necessario un successivo corso di meccanica quantistica avanzata. La materia presentata si presta a essere trattata nell'arco di due semestri, in ciascuno dei quali venga discusso il materiale contenuto in tre delle sei sezioni in cui il testo è suddiviso.

La materia trattata è stata organizzata secondo un criterio didattico, anziché enciclopedico, seguendo il criterio di *less is more*: l'obiettivo è fornire le idee e le tecniche che devono far parte del bagaglio culturale di un fisico, piuttosto che un repertorio esaustivo di conoscenze e metodi. La scelta dei temi affrontati è basata sulla convinzione che l'insegnamento della meccanica quantistica abbia una triplice motivazione. La prima è che la fisica quantistica fornisce un linguaggio universale nella formulazione della fisica moderna. Sono quindi stati inclusi argomenti, come l'integrale funzionale o gli stati coerenti, che talvolta non fanno parte del curriculum di base, ma che sono fondamentali per l'uso della fisica quantistica in altri contesti — nel caso specifico, la teoria quantistica dei campi e l'ottica quantistica. La seconda è che la fisica quantistica è una rivoluzione concettuale che richiede un ripensamento radicale di ciò che ci si aspetta da una teoria fisica. Ciò porta a includere argomenti importanti per apprezzare la portata concettuale delle idee quantistiche, quali il teorema di *no cloning* o la decoerenza. La terza è che la meccanica quantistica fornisce un insieme di tecniche importanti per diverse applicazioni. Abbiamo quindi incluso, anche se a livello estremamente introduttivo, argomenti necessari per applicazioni alla fisica della materia o alla fisica nucleare e delle particelle, come la teoria dell'urto.

Abbiamo viceversa appena accennato, od omesso del tutto, diversi argomenti che potrebbero essere adeguatamente discussi solo in un corso monografico, per i quali facciamo quindi riferimento a eccellenti testi recenti. In particolare, la teoria semiclassica della radiazione e uno studio completo della teoria dell'urto⁹; la meccanica statistica quantistica¹⁰; la teoria dell'informazione e della computazione quantistica¹¹ e un approccio sistematico alla teoria dell'integrale funzionale¹². La nostra trattazione non ha pretese di rigore matematico: di nuovo, per una formulazione matematicamente rigorosa della meccanica quantistica facciamo riferimento a testi specializzati¹³.

La fisica quantistica è un linguaggio, e come tutti i linguaggi può essere appresa in modo efficace solo con la pratica. Lo svolgimento di esercizi e problemi ne è quindi parte integrante. Ciononostante, non abbiamo fornito una raccolta completa di problemi, in quanto ne esistono già numerose, alle quali non abbiamo nulla da aggiungere. Abbiamo tuttavia incluso nel testo un piccolo numero di esercizi svolti — una quarantina in tutto — sotto forma di complementi. I complementi possono essere fruiti in due modi: come esercizi svolti, appunto — a questo fine ciascuno inizia con una precisa domanda —, oppure come discussione di argomenti e tecniche utili o addirittura indispensabili per le applicazioni: in vista di ciò, ogni complemento porta un titolo. Al termine del testo abbiamo inoltre incluso dieci test di autovalutazione: i primi cinque relativi agli argomenti trattati nelle

⁹S. Weiberg, *Lectures on Quantum Mechanics*, (seconda edizione), Cambridge, 2015.

¹⁰M. Kardar, *Statistical Physics of Particles*, Cambridge, 2007.

¹¹B. Schumacher e M. Westmoreland, *op. cit.*; N.D. Mermin, *Quantum Computer Science*, Cambridge, 2007.

¹²J. Zinn-Justin, *Path Integrals in Quantum Mechanics*, Oxford, 2005.

¹³J. Glimm e A. Jaffe, *Quantum Physics*, New York, 1981; J. Dimock, *Quantum Mechanics and Quantum Field Theory*, Cambridge, 2011.

prime tre parti del testo, e gli altri relativi alle ultime tre parti. Si tratta di collezioni di esercizi che possono essere pensati come testi di esame o autoesame. Il loro svolgimento permette di verificare la comprensione di tutti o quasi i principali metodi e applicazioni, escludendo soltanto i temi più concettuali.

Per quanto possa discostarsi dalle trattazioni precedenti, qualunque presentazione di un argomento classico si basa sulla letteratura preesistente, e questo libro non fa eccezione. In generale, non forniremo riferimenti bibliografici alla letteratura originale; le nostre fonti principali sono i numerosi trattati e testi, a cominciare da quelli classici già citati di Landau, Fermi, Dirac, Sakurai e Gottfried, nei confronti dei quali questo libro ha un debito importante. Un debito altrettanto importante è nei confronti dei circa mille studenti che, nel corso degli anni, hanno seguito un corso di meccanica quantistica basato su questi punti di vista presso l'Università di Milano. Sono stati una fonte di dubbi, domande, curiosità e idee che hanno contribuito in modo essenziale a questo testo. Ci auguriamo che questo libro catturi anche un po' del loro interesse e del loro entusiasmo.

Il lavoro di elaborazione che ha portato a questo testo è durato diversi anni. Siamo riconoscenti a molti colleghi, dottorandi e studenti che, nel corso del tempo, hanno espresso commenti e critiche, segnalato errori e imprecisioni, e suggerito miglioramenti: in particolare Simone Alioli, Stefano Carrazza, Stefano Di Vita, Riccardo Fabbricatore, Giancarlo Ferrera, Claudio Muselli, Emanuele R. Nocera, Maria Giulia Ratti, German Sborlini, Giovanni Stagnitto, Alessandro Vicini. Ringraziamo il team editoriale di Zanichelli, per l'aiuto preciso e puntuale nella preparazione del testo finale. È quasi superfluo aggiungere che gli inevitabili errori e imprecisioni restanti sono nostra responsabilità.

