

Prefazione all'edizione riveduta

Fin dal 1989 ho sostenuto con entusiasmo il progetto di una nuova edizione di *Mecchanica Quantistica Moderna* del mio grande amico J. J. Sakurai, al fine di estendere l'utilità di questo testo fino al ventunesimo secolo. Ho avuto diversi scambi di vedute con la cerchia degli amici più stretti di Sakurai, e in particolare con il Professor Yasuo Hara della Tsukuba University e con il Professor Akio Sakurai della Kyoto Sangyo University in Giappone.

Il libro si rivolge a studenti che abbiano già studiato la meccanica quantistica durante gli ultimi due anni del corso di laurea o successivamente. Non fornisce un'introduzione alla meccanica quantistica per principianti. Il lettore dovrebbe avere già familiarità con la risoluzione di equazioni d'onda dipendenti e indipendenti dal tempo, con l'evoluzione temporale libera del pacchetto d'onde gaussiano e con la risoluzione di problemi di riflessione e trasmissione nel caso unidimensionale. Alcune delle proprietà generali delle autofunzioni e degli autovalori dell'energia dovrebbero essere note agli studenti cui questo testo si rivolge.

La motivazione principale di questo lavoro è la revisione del testo principale. Ci sono tre importanti aggiunte e/o cambiamenti nella seconda edizione, che per il resto ricalca essenzialmente la versione originale. Le modifiche includono la riscrittura di alcune porzioni della sezione 5.2 sulla teoria delle perturbazioni indipendenti dal tempo nel caso degenere, da parte del Professor Kenneth Johnson del M.I.T., che prendono in considerazione un argomento sottile trattato raramente in modo approfondito negli altri testi di meccanica quantistica. Il Professor Roger Newton dell'Indiana University ha introdotto alcuni miglioramenti nella descrizione dell'allargamento delle righe spettrali nell'effetto Stark e spiegazioni aggiuntive riguardo gli spostamenti di fase in prossimità di risonanze, il teorema ottico e gli stati non normalizzabili. Queste modifiche compaiono come "aggiunte del curatore" o "note del curatore" nella seconda edizione. Il Professor Thomas Fulton della Johns Hopkins University ha rivisto il suo contributo riguardante lo scattering coulombiano (Paragrafo 7.13): ora compare come una porzione più corta di testo in cui l'enfasi è posta sulla descrizione fisica, mentre i dettagli matematici sono stati spostati nell'Appendice C.

Sebbene non costituiscano una grossa porzione del testo, alcune aggiunte si sono rese necessarie per tenere conto di alcuni sviluppi della meccanica quantistica diventati di interesse rilevante a partire dal 1 Novembre 1982. A tal fine, due capitoli supplementari sono stati inclusi alla fine del testo. Il Supplemento I tratta della variazione adiabatica e della fase geometrica (resa popolare da M. V. Berry a partire dal 1983), ed è in realtà la traduzione in inglese del supplemento scritto dal Professor Akio Sakurai per l'edizione giapponese di *Meccanica Quantistica Moderna* (copyright © Yoshioka-Shoten Publishing of Kyoto). Il Supplemento II sui decadimenti non-

esponenziali è stato scritto dal mio collega Professor Xerxes Tata, e revisionato dal Professor E. C. G. Sudarshan della University of Texas a Austin. Anche se i decadimenti non-esponenziali, dal punto di vista teorico, sono studiati da molto tempo, le misure sperimentali sulle probabilità di transizione che verificano in maniera indiretta tali decadimenti sono state effettuate solo nel 1990. L'introduzione di materiale aggiuntivo è naturalmente una decisione personale del curatore: i lettori giudicheranno da parte loro quanto tali scelte siano appropriate. Grazie al Professor Akio Sakurai, gli errori di stampa presenti nelle prime dieci ristampe della prima edizione sono stati corretti nella presente edizione. Il collega Professor Sandip Pakvasa è stato per me guida e fonte di continuo incoraggiamento durante l'intero processo di revisione.

In aggiunta ai precedenti ringraziamenti, i miei ex-studenti Shi Xiaohong, e Yasunaga Suzuki sono stati un'utile cassa di risonanza per le idee sull'edizione riveduta mentre seguivano il mio corso di meccanica quantistica alla University of Hawaii durante la primavera del 1992. Suzuki ha completato la prima traduzione dal giapponese del Supplemento I come lavoro di fine corso. Il Dr. Andy Acker mi ha fornito assistenza con i programmi di elaborazione grafica. Il Dipartimento di Fisica e Astronomia, e il Gruppo di Fisica delle Alte Energie della University of Hawaii a Manoa in particolare, mi hanno fornito i supporti materiali e l'atmosfera conciliante per portare a termine il mio compito. Infine desidero esprimere la mia gratitudine all'*editor* del settore di fisica Stuart Johnson, alla sua assistente editoriale Jennifer Duggan e al coordinatore di produzione Amy Wilcutt della Addison-Wesley per il loro incoraggiamento e per l'ottimismo nel ritenere che l'edizione riveduta sarebbe stata portata a termine.

San Fu Tuan
Honolulu, Hawaii

Prefazione alla seconda edizione

La meccanica quantistica mi affascina. Descrive un'ampia molteplicità di fenomeni basandosi su poche ipotesi. È basata su un formalismo completamente diverso dalle equazioni differenziali della fisica classica, e tuttavia la contiene. Fornisce predizioni quantitative per molte situazioni fisiche e queste predizioni sono in accordo con gli esperimenti. In breve, la meccanica quantistica è, oggigiorno, la base fondamentale della nostra comprensione del mondo fisico.

Perciò, sono molto lieto che mi sia stato chiesto di curare la seconda edizione di *Meccanica Quantistica Moderna*, di J. J. Sakurai. Ho utilizzato per alcuni anni il materiale di questo libro per tenere il corso di meccanica quantistica e mi sono trovato in sintonia con la sua presentazione. Come molti altri docenti, tuttavia, ho trovato incompleti alcuni aspetti del libro e perciò ho introdotto del materiale tratto da altri libri, dalla mia esperienza personale e dalla mia attività di ricerca.

La mia intenzione originale era certamente più ambiziosa di ciò che si è potuto realizzare, eppure ho impiegato molto più tempo di quanto avrei voluto. Ho ricevuto molti eccellenti suggerimenti da diversi revisori, e avrei voluto poterli includere tutti. Sono comunque soddisfatto del risultato e ho cercato per quanto possibile di mantenere lo spirito del manoscritto originale di Sakurai.

Il **Capitolo 1** è fondamentalmente inalterato. Alcune delle figure sono state aggiornate e sono stati inseriti riferimenti al Capitolo 8, dove è presentata l'origine relativistica del momento magnetico di Dirac.

Del materiale è stato aggiunto al **Capitolo 2**. In particolare è stata aggiunta una sezione sulle soluzioni elementari dell'equazione di Schrödinger: la particella libera in tre dimensioni, l'oscillatore armonico unidimensionale, usando le funzioni generatrici e il potenziale lineare, al fine di introdurre le funzioni di Airy. La soluzione del potenziale lineare è stata poi utilizzata nella discussione dell'approssimazione WKB e gli autovalori sono stati confrontati con un esperimento che misura "neutroni che rimbalzano". È stata anche inclusa una breve discussione delle oscillazioni del neutrino come illustrazione pratica del fenomeno dell'interferenza quantistica.

Il **Capitolo 3** ora contiene anche soluzioni dell'equazione di Schrödinger per potenziali centrali. Viene presentata l'equazione radiale generale; essa è applicata al caso della particella libera in tre dimensioni e alla buca sferica infinita. Risolviamo l'oscillatore armonico isotropo e discutiamo la sua applicazione alla "buca di potenziale nucleare". Ricaviamo la soluzione anche usando il potenziale coulombiano e ne discutiamo la degenerazione. Mettiamo in rilievo alcune tecniche matematiche avanzate.

Al **Capitolo 4** è stata aggiunta una sottosezione in cui si discute la simmetria, nota classicamente in termini del vettore di Lenz, caratteristica del problema coulombiano.

Questo fornisce un'introduzione a $SO(4)$ pensata come un'estensione della precedente discussione nel Capitolo 3 sulle simmetrie continue.

Vi sono due aggiunte al **Capitolo 5**. In primo luogo c'è una nuova introduzione al Paragrafo 5.3 nella quale si applica la teoria delle perturbazioni all'atomo di idrogeno nel contesto del calcolo di correzioni relativistiche all'energia cinetica. Questo, insieme ad alcune modifiche al materiale sull'interazione spin-orbita, è utile per eseguire confronti con l'equazione di Dirac applicata all'atomo di idrogeno presentata alla fine del libro.

In secondo luogo una nuova sezione su hamiltoniane con dipendenza temporale "estrema" è stata aggiunta. Essa include una breve discussione dell'approssimazione istantanea e una più dettagliata esposizione dell'approssimazione adiabatica, che si sviluppa poi in una discussione della fase di Berry e in un esempio specifico (con verifica sperimentale) nel caso di un sistema con spin $\frac{1}{2}$. Parte del materiale presente nelle appendici dell'edizione precedente è stato inserito in questa sezione.

La parte finale del libro ha subito le revisioni più significative, tra le quali l'inversione dell'ordine dei capitoli sulla *diffusione* e sulle *particelle identiche*. Ciò è in parte dovuto alla forte convinzione da parte mia (e da parte di alcuni revisori) che il materiale sulla diffusione richiedesse particolare attenzione. Inoltre, su suggerimento dei revisori, il lettore viene fatto avvicinare alla teoria quantistica di campo, sia mediante un'estensione del materiale sulle particelle identiche che include la seconda quantizzazione, che con un nuovo Capitolo sulla meccanica quantistica relativistica.

Perciò è stata quasi completamente riscritta l'introduzione del **Capitolo 6**, che contiene ora la diffusione in meccanica quantistica. Questo argomento è sviluppato utilizzando un trattamento dipendente dal tempo. Inoltre le sezioni sull'ampiezza di diffusione e l'approssimazione di Born sono state riscritte per seguire la nuova impostazione. Ciò implica tra l'altro avere incluso una breve sezione sul teorema ottico nel trattamento dell'ampiezza di diffusione, prima di continuare con l'approssimazione di Born. Le restanti sezioni sono state modificate, combinate e riarrangiate, con la rimozione di parte del materiale, nel tentativo di mantenere ciò che io, e i revisori, riteniamo siano i punti più importanti presenti nella precedente edizione.

Il **Capitolo 7** contiene due nuove sezioni che incrementano significativamente il materiale sulle particelle identiche. (La sezione sui tableaux di Young è stata rimossa). Gli stati a molte particelle sono discussi usando la seconda quantizzazione. Due applicazioni vengono discusse in dettaglio. Una è il problema di un gas di elettroni in presenza di un mezzo di supporto uniforme carico positivamente. L'altra è la quantizzazione canonica del campo elettromagnetico.

Il trattamento degli stati quantistici a molte particelle è solo uno dei cammini che portano allo sviluppo della teoria quantistica di campo. L'altro cammino consiste nell'incorporare la relatività speciale nella meccanica quantistica, ed è il soggetto del **Capitolo 8**. Dopo l'introduzione, viene presa in considerazione l'equazione di Klein-Gordon nella misura in cui mi è sembrato ragionevole. L'equazione di Dirac è trattata dettagliatamente, in un modo più o meno standard. Infine viene risolto il problema coulombiano per l'equazione di Dirac e vengono fatti alcuni commenti circa la transizione a una teoria quantistica relativistica di campo.

Le **appendici** sono state riorganizzate. Una nuova appendice sulle unità elettromagnetiche è pensata per quegli studenti che utilizzano le unità di misura del sistema internazionale (*SI*) nei corsi di base e si trovano a dover usare le unità *gaussiane* nei corsi avanzati.

Sono un fisico sperimentale, e cerco di includere nel mio insegnamento alcuni risultati sperimentali significativi. Alcuni di essi sono presenti in questa nuova edizione, sovente in termini di figure prese principalmente da pubblicazioni recenti.

- La Figura 1.6 illustra l'uso di un apparato Stern-Gerlach per analizzare gli stati di polarizzazione di un fascio di atomi di cesio.
- La rotazione dello spin per ottenere la misura di precisione di $g - 2$ del muone è mostrata in Figura 2.1.
- Le oscillazioni del neutrino osservate dalla collaborazione KamLAND sono mostrate in Figura 2.2.
- Un bell'esperimento che mostra i livelli energetici quantistici di "neutroni che rimbalzano", Figura 2.4, è incluso per sottolineare l'accordo fra gli autovalori esatti e quelli ottenuti con l'approssimazione WKB per il potenziale lineare.
- La Figura 2.10, che mostra lo spostamento di fase gravitazionale, era presente anche nell'edizione precedente.
- Ho aggiunto la Figura 3.6, per sottolineare che i problemi con potenziale centrale possono essere applicati a situazioni fisiche del mondo reale.
- Sebbene molte misure di violazione della parità siano state eseguite negli ultimi cinquant'anni, la misura originale di Wu, Figura 4.6, ne rimane una delle più chiare illustrazioni.
- La fase di Berry per particelle di spin $\frac{1}{2}$, misurata con neutroni ultra-freddi, è mostrata in Figura 5.6.
- La Figura 6.6 è un chiaro esempio di come si usino i dati di diffusione per determinare le proprietà del bersaglio.
- Talvolta esperimenti eseguiti con cura mettono in evidenza dei problemi nelle predizioni teoriche. La Figura 7.2 mostra ciò che succede quando la simmetria di scambio non è presa in considerazione.
- La quantizzazione del campo elettromagnetico è illustrata mediante dati sull'effetto Casimir (Figura 7.9) e sull'osservazione della "luce compressa" (Figura 7.10).
- Infine sono mostrate alcune classiche dimostrazioni della necessità di introdurre la meccanica quantistica relativistica. La scoperta originale di Carl Anderson del positrone è mostrata in Figura 8.1. Informazioni recenti sui dettagli dei livelli energetici dell'atomo di idrogeno sono incluse in Figura 8.2.

Inoltre ho introdotto un certo numero di riferimenti a lavori sperimentali pertinenti alla discussione dell'argomento in esame.

I miei ringraziamenti vanno a molte persone che mi hanno aiutato in questo progetto.

Tra i colleghi fisici ricordo John Cummings, Stuart Freedman, Joel Giedt, David Hertzog, Barry Holstein, Bob Jaffe, Joe Levinger, Alan Litke, Kam-Biu Luk, Bob McKeown, Harry Nelson, Joe Paki, Murray Peshkin, Olivier Pfister, Mike Snow, John Townsend, San Fu Tuan, David Van Baak, Dirk Walecka, Tony Zee, ed anche i revisori che hanno letto le varie bozze del libro. Alla Addison-Wesley sono stato guidato in questo processo da Adam Black, Katie Conley, Ashley Eklund, Deb Greco, Dyan Menezes, e Jim Smith. Sono anche grato a John Rogosich e Carol Sawyer di Techsetters, Inc. per la loro competenza tecnica e i loro consigli. Mi scuso con coloro i cui nomi sono stati dimenticati in questi ringraziamenti.

Infine spero sinceramente che questa nuova edizione rispetti l'approccio originale di Sakurai e che non sia stata indebolita sensibilmente dal mio intervento.

Jim Napolitano
Troy, New York