

Indice generale

| | |
|--|----------|
| Prefazione alla prima edizione | xi |
| Prefazione alla seconda edizione | xii |
| Prefazione alla terza edizione | xiv |
| In memoriam | xvii |
| 1 Concetti fondamentali | 1 |
| 1.1 L'esperimento di Stern-Gerlach | 1 |
| 1.1.1 <i>Descrizione dell'esperimento</i> | 2 |
| 1.1.2 <i>Esperimenti di Stern-Gerlach sequenziali</i> | 4 |
| 1.1.3 <i>Analogia con la polarizzazione della luce</i> | 6 |
| 1.2 Ket, bra e operatori | 10 |
| 1.2.1 <i>Lo spazio dei ket</i> | 11 |
| 1.2.2 <i>Spazio dei bra e prodotti interni</i> | 12 |
| 1.2.3 <i>Operatori</i> | 14 |
| 1.2.4 <i>Moltiplicazione</i> | 15 |
| 1.2.5 <i>L'assioma associativo</i> | 16 |
| 1.3 Ket di base e rappresentazione matriciale | 17 |
| 1.3.1 <i>Autoket di un'osservabile</i> | 17 |
| 1.3.2 <i>Autoket come ket di base</i> | 18 |
| 1.3.3 <i>Rappresentazioni matriciali</i> | 19 |
| 1.3.4 <i>Sistemi di spin $\frac{1}{2}$</i> | 22 |
| 1.4 Misure, osservabili e relazioni di indeterminazione | 23 |
| 1.4.1 <i>Misure</i> | 23 |
| 1.4.2 <i>Ancora sistemi di spin $\frac{1}{2}$</i> | 25 |
| 1.4.3 <i>Osservabili compatibili</i> | 28 |
| 1.4.4 <i>Osservabili incompatibili</i> | 31 |
| 1.4.5 <i>La relazione di indeterminazione</i> | 33 |
| 1.5 Cambiamento di base | 35 |
| 1.5.1 <i>Operatore di trasformazione</i> | 35 |
| 1.5.2 <i>Matrice di trasformazione</i> | 36 |
| 1.5.3 <i>Diagonalizzazione</i> | 37 |
| 1.5.4 <i>Osservabili unitariamente equivalenti</i> | 38 |
| 1.6 Posizione, impulso e traslazione | 39 |
| 1.6.1 <i>Spettri continui</i> | 39 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1.6.2 | <i>Autoket di posizione e misure di posizione</i> | 40 |
| 1.6.3 | <i>Traslazione</i> | 42 |
| 1.6.4 | <i>L'impulso come generatore delle traslazioni</i> | 44 |
| 1.6.5 | <i>Le relazioni di commutazione canoniche</i> | 47 |
| 1.7 | Funzioni d'onda nello spazio delle coordinate e degli impulsi | 49 |
| 1.7.1 | <i>La funzione d'onda nello spazio delle coordinate</i> | 49 |
| 1.7.2 | <i>L'operatore impulso nella base delle coordinate</i> | 51 |
| 1.7.3 | <i>La funzione d'onda nello spazio degli impulsi</i> | 51 |
| 1.7.4 | <i>Pacchetti d'onda gaussiani</i> | 54 |
| 1.7.5 | <i>Generalizzazione a tre dimensioni</i> | 55 |
| 2 | Dinamica quantistica | 61 |
| 2.1 | Evoluzione temporale ed equazione di Schrödinger | 61 |
| 2.1.1 | <i>L'operatore di evoluzione temporale</i> | 61 |
| 2.1.2 | <i>L'equazione di Schrödinger</i> | 64 |
| 2.1.3 | <i>Autoket dell'energia</i> | 66 |
| 2.1.4 | <i>Dipendenza temporale dei valori medi</i> | 68 |
| 2.1.5 | <i>La precessione dello spin</i> | 69 |
| 2.1.6 | <i>Oscillazioni dei neutrini</i> | 71 |
| 2.1.7 | <i>Ampiezza di correlazione e relazione di indeterminazione tempo-energia</i> | 73 |
| 2.2 | Le rappresentazioni di Schrödinger e di Heisenberg | 75 |
| 2.2.1 | <i>Operatori unitari</i> | 75 |
| 2.2.2 | <i>Ket di stato e osservabili nelle rappresentazioni di Schrödinger e Heisenberg</i> | 76 |
| 2.2.3 | <i>L'equazione del moto di Heisenberg</i> | 77 |
| 2.2.4 | <i>Particelle libere; teorema di Ehrenfest</i> | 79 |
| 2.2.5 | <i>Ket di base e ampiezze di transizione</i> | 81 |
| 2.3 | L'oscillatore armonico unidimensionale | 83 |
| 2.3.1 | <i>Autoket e autovalori dell'energia</i> | 84 |
| 2.3.2 | <i>Evoluzione temporale dell'oscillatore</i> | 88 |
| 2.4 | L'equazione d'onda di Schrödinger | 91 |
| 2.4.1 | <i>Equazione d'onda dipendente dal tempo</i> | 91 |
| 2.4.2 | <i>Equazione d'onda indipendente dal tempo</i> | 92 |
| 2.4.3 | <i>Interpretazione della funzione d'onda</i> | 94 |
| 2.4.4 | <i>Il limite classico</i> | 96 |
| 2.5 | Soluzioni elementari dell'equazione d'onda di Schrödinger | 97 |
| 2.5.1 | <i>La particella libera in tre dimensioni</i> | 98 |
| 2.5.2 | <i>L'oscillatore armonico unidimensionale</i> | 99 |
| 2.5.3 | <i>Il potenziale lineare</i> | 102 |
| 2.5.4 | <i>L'approssimazione semiclassica (WKB)</i> | 105 |
| 2.6 | Propagatori e Integrali di Cammino di Feynman | 110 |
| 2.6.1 | <i>Propagatori in meccanica ondulatoria</i> | 110 |
| 2.6.2 | <i>Il propagatore come ampiezza di transizione</i> | 114 |
| 2.6.3 | <i>Integrali di cammino come somma sui cammini</i> | 116 |
| 2.6.4 | <i>La formulazione di Feynman</i> | 117 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 2.7 | Potenziali e trasformazioni di gauge | 122 |
| 2.7.1 | <i>Potenziali costanti</i> | 122 |
| 2.7.2 | <i>Gravità in meccanica quantistica</i> | 124 |
| 2.7.3 | <i>Le trasformazioni di gauge nell'elettromagnetismo</i> | 127 |
| 2.7.4 | <i>L'effetto Aharonov-Bohm</i> | 134 |
| 2.7.5 | <i>Il monopolo magnetico</i> | 137 |
| 3 | Teoria del momento angolare | 149 |
| 3.1 | Rotazioni e relazioni di commutazione per il momento angolare | 149 |
| 3.1.1 | <i>Rotazioni finite e rotazioni infinitesime</i> | 149 |
| 3.1.2 | <i>Le rotazioni infinitesime in meccanica quantistica</i> | 152 |
| 3.1.3 | <i>Le rotazioni finite in meccanica quantistica</i> | 153 |
| 3.1.4 | <i>Relazioni di commutazione per il momento angolare</i> | 154 |
| 3.2 | Sistemi di spin $1/2$ e rotazioni finite | 155 |
| 3.2.1 | <i>Gli operatori di rotazione per spin $\frac{1}{2}$</i> | 155 |
| 3.2.2 | <i>Una nuova analisi della precessione dello spin</i> | 157 |
| 3.2.3 | <i>Studio delle rotazioni di 2π tramite interferometria neutronica</i> | 158 |
| 3.2.4 | <i>Il formalismo a due componenti di Pauli</i> | 159 |
| 3.2.5 | <i>Le rotazioni nel formalismo a due componenti</i> | 161 |
| 3.3 | SO(3), SU(2) e rotazioni di Eulero | 164 |
| 3.3.1 | <i>Il gruppo ortogonale</i> | 164 |
| 3.3.2 | <i>Il gruppo unimodulare unitario</i> | 165 |
| 3.3.3 | <i>Le rotazioni di Eulero</i> | 166 |
| 3.4 | Operatori densità, insiemi puri e miscele | 169 |
| 3.4.1 | <i>Fasci polarizzati e non polarizzati</i> | 169 |
| 3.4.2 | <i>Medie sull'ensemble e operatore densità</i> | 171 |
| 3.4.3 | <i>Evoluzione temporale degli ensemble</i> | 175 |
| 3.4.4 | <i>Generalizzazione al continuo</i> | 176 |
| 3.4.5 | <i>Meccanica statistica quantistica</i> | 177 |
| 3.5 | Autovalori e autostati del momento angolare | 181 |
| 3.5.1 | <i>Relazioni di commutazione e operatori "a scala"</i> | 181 |
| 3.5.2 | <i>Autovalori di J^2 e J_z</i> | 183 |
| 3.5.3 | <i>Elementi di matrice degli operatori di momento angolare</i> | 185 |
| 3.5.4 | <i>Rappresentazioni dell'operatore di rotazione</i> | 186 |
| 3.6 | Il momento angolare orbitale | 189 |
| 3.6.1 | <i>Il momento angolare orbitale come generatore delle rotazioni</i> | 189 |
| 3.6.2 | <i>Le armoniche sferiche</i> | 192 |
| 3.6.3 | <i>Le armoniche sferiche come matrici di rotazione</i> | 196 |
| 3.7 | L'equazione di Schrödinger per potenziali centrali | 197 |
| 3.7.1 | <i>L'equazione radiale</i> | 197 |
| 3.7.2 | <i>La particella libera e la buca sferica infinita</i> | 200 |
| 3.7.3 | <i>L'oscillatore armonico isotropo</i> | 201 |
| 3.7.4 | <i>Il potenziale coulombiano</i> | 204 |
| 3.8 | Somma di momenti angolari | 207 |
| 3.8.1 | <i>Semplici esempi di somma di momenti angolari</i> | 207 |
| 3.8.2 | <i>Teoria formale della somma di momenti angolari</i> | 210 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3.8.3 | <i>Relazioni di ricorrenza per i coefficienti di Clebsch-Gordan</i> | 214 |
| 3.8.4 | <i>Coefficienti di Clebsch-Gordan e matrici di rotazione</i> | 219 |
| 3.9 | Il modello di oscillatore di Schwinger per il momento angolare | 220 |
| 3.9.1 | <i>Momento angolare e oscillatori disaccoppiati</i> | 220 |
| 3.9.2 | <i>Formula esplicita per le matrici di rotazione</i> | 224 |
| 3.10 | Misure di correlazione di spin e disuguaglianza di Bell | 226 |
| 3.10.1 | <i>Correlazioni negli stati di singoletto di spin</i> | 226 |
| 3.10.2 | <i>Il principio di località di Einstein e la disuguaglianza di Bell</i> | 229 |
| 3.10.3 | <i>Meccanica Quantistica e disuguaglianza di Bell</i> | 231 |
| 3.11 | Operatori tensoriali | 234 |
| 3.11.1 | <i>Operatori vettoriali</i> | 234 |
| 3.11.2 | <i>Tensori cartesiani e tensori irriducibili</i> | 236 |
| 3.11.3 | <i>Prodotto di tensori</i> | 238 |
| 3.11.4 | <i>Elementi di matrice di operatori tensoriali; teorema di Wigner-Eckart</i> | 240 |
| 4 | Simmetrie in meccanica quantistica | 249 |
| 4.1 | Simmetrie, leggi di conservazione e degenerazioni | 249 |
| 4.1.1 | <i>Simmetrie nella fisica classica</i> | 249 |
| 4.1.2 | <i>Simmetrie nella meccanica quantistica</i> | 250 |
| 4.1.3 | <i>Degenerazione</i> | 251 |
| 4.1.4 | <i>La simmetria $SO(4)$ del potenziale coulombiano</i> | 252 |
| 4.2 | Simmetrie discrete, parità o inversione spaziale | 256 |
| 4.2.1 | <i>Funzioni d'onda e parità</i> | 259 |
| 4.2.2 | <i>La doppia buca di potenziale simmetrica</i> | 261 |
| 4.2.3 | <i>La regola di selezione per la parità</i> | 264 |
| 4.2.4 | <i>Violazione della parità</i> | 265 |
| 4.3 | Le traslazioni su reticolo come simmetria discreta | 265 |
| 4.4 | La simmetria discreta di inversione temporale | 271 |
| 4.4.1 | <i>Digressione sulle operazioni di simmetria</i> | 273 |
| 4.4.2 | <i>Operatore di inversione temporale</i> | 275 |
| 4.4.3 | <i>Funzione d'onda</i> | 280 |
| 4.4.4 | <i>L'inversione temporale per sistemi di spin $\frac{1}{2}$</i> | 281 |
| 4.4.5 | <i>Interazioni con campi elettrici e magnetici; degenerazione di Kramers</i> | 284 |
| 5 | Metodi di approssimazione | 289 |
| 5.1 | Teoria perturbativa indipendente dal tempo: caso non degenero | 289 |
| 5.1.1 | <i>Formulazione del problema</i> | 289 |
| 5.1.2 | <i>Il problema a due stati</i> | 290 |
| 5.1.3 | <i>Trattazione formale della serie perturbativa</i> | 292 |
| 5.1.4 | <i>La rinormalizzazione della funzione d'onda</i> | 296 |
| 5.1.5 | <i>Esempi elementari</i> | 297 |
| 5.2 | Teoria perturbativa indipendente dal tempo: caso degenero | 301 |
| 5.2.1 | <i>L'effetto Stark lineare</i> | 305 |
| 5.3 | Atomi idrogenoidi: struttura fine ed effetto Zeeman | 307 |
| 5.3.1 | <i>Correzione relativistica all'energia cinetica</i> | 307 |
| 5.3.2 | <i>Interazione spin-orbita e struttura fine</i> | 309 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.3.3 | <i>L'effetto Zeeman</i> | 313 |
| 5.3.4 | <i>L'interazione di Van der Waals</i> | 317 |
| 5.4 | Metodi variazionali | 318 |
| 5.5 | Potenziali dipendenti dal tempo: la rappresentazione d'interazione | 322 |
| 5.5.1 | <i>Formulazione del problema</i> | 322 |
| 5.5.2 | <i>La rappresentazione d'interazione</i> | 323 |
| 5.5.3 | <i>Problemi a due stati dipendenti dal tempo: risonanza magnetica nucleare, maser e altro</i> | 325 |
| 5.5.4 | <i>La risonanza magnetica di spin</i> | 327 |
| 5.5.5 | <i>Il maser</i> | 328 |
| 5.6 | Hamiltoniane con dipendenza dal tempo particolare | 329 |
| 5.6.1 | <i>L'approssimazione istantanea</i> | 330 |
| 5.6.2 | <i>L'approssimazione adiabatica</i> | 330 |
| 5.6.3 | <i>La fase di Berry</i> | 333 |
| 5.6.4 | <i>La fase di Berry per particelle di spin $\frac{1}{2}$</i> | 335 |
| 5.6.5 | <i>Nuova discussione dell'effetto Aharonov-Bohm e del monopolino magnetico</i> | 337 |
| 5.7 | Teoria perturbativa dipendente dal tempo | 339 |
| 5.7.1 | <i>La serie di Dyson</i> | 339 |
| 5.7.2 | <i>Probabilità di transizione</i> | 341 |
| 5.7.3 | <i>Perturbazione costante</i> | 343 |
| 5.7.4 | <i>Perturbazione armonica</i> | 347 |
| 5.8 | Applicazioni alle interazioni con un campo classico di radiazione | 349 |
| 5.8.1 | <i>Assorbimento ed emissione stimolata</i> | 349 |
| 5.8.2 | <i>L'approssimazione di dipolo elettrico</i> | 351 |
| 5.8.3 | <i>L'effetto fotoelettrico</i> | 352 |
| 5.8.4 | <i>Emissione spontanea</i> | 355 |
| 5.9 | Spostamento dell'energia e larghezza di decadimento | 357 |
| 6 | Teoria della diffusione | 369 |
| 6.1 | Diffusione come perturbazione dipendente dal tempo | 369 |
| 6.1.1 | <i>Tasso di transizione e sezioni d'urto</i> | 371 |
| 6.1.2 | <i>Soluzione per la matrice T</i> | 372 |
| 6.1.3 | <i>Diffusione dal futuro al passato</i> | 374 |
| 6.2 | L'ampiezza di diffusione | 374 |
| 6.2.1 | <i>Descrizione con pacchetti d'onda</i> | 379 |
| 6.2.2 | <i>Il teorema ottico</i> | 379 |
| 6.3 | L'approssimazione di Born | 381 |
| 6.3.1 | <i>L'approssimazione di Born di ordine superiore</i> | 385 |
| 6.4 | Sfasamenti e onde parziali | 386 |
| 6.4.1 | <i>Stati di particella libera</i> | 386 |
| 6.4.2 | <i>Lo sviluppo in onde parziali</i> | 391 |
| 6.4.3 | <i>Unitarietà e sfasamenti</i> | 392 |
| 6.4.4 | <i>Determinazione degli sfasamenti</i> | 395 |
| 6.4.5 | <i>Diffusione da una sfera rigida</i> | 397 |
| 6.5 | Approssimazione iconale | 399 |
| 6.5.1 | <i>Onde parziali e approssimazione iconale</i> | 401 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6.6 | Diffusione a bassa energia e stati legati | 404 |
| 6.6.1 | <i>Buca o barriera rettangolare</i> | 404 |
| 6.6.2 | <i>Diffusione a energia zero e stati legati</i> | 406 |
| 6.6.3 | <i>Stati legati come poli di $S_l(k)$</i> | 409 |
| 6.7 | Diffusione risonante | 411 |
| 6.8 | Considerazioni di simmetria nella diffusione | 415 |
| 6.9 | Diffusione anelastica elettrone-atomo | 418 |
| 6.9.1 | <i>Il fattore di forma nucleare</i> | 421 |
| 7 | Particelle identiche | 427 |
| 7.1 | Simmetria permutazionale | 427 |
| 7.2 | Il postulato di simmetrizzazione | 431 |
| 7.3 | Il sistema di due elettroni | 433 |
| 7.4 | L'atomo di elio | 436 |
| 7.5 | Stati di molte particelle | 440 |
| 7.6 | Teoria del funzionale densità | 441 |
| 7.6.1 | <i>Il funzionale energia per una singola particella</i> | 442 |
| 7.6.2 | <i>Il teorema di Hohenberg-Kohn</i> | 444 |
| 7.6.3 | <i>Le equazioni di Kohn-Sham</i> | 446 |
| 7.6.4 | <i>Modelli di energia di scambio e correlazione</i> | 449 |
| 7.6.5 | <i>Applicazione all'atomo di elio</i> | 450 |
| 7.7 | Campi quantistici | 453 |
| 7.7.1 | <i>Seconda quantizzazione</i> | 453 |
| 7.7.2 | <i>Variabili dinamiche in seconda quantizzazione</i> | 455 |
| 7.7.3 | <i>Esempio: il gas di elettroni degeneri</i> | 459 |
| 7.8 | Quantizzazione del campo elettromagnetico | 463 |
| 7.8.1 | <i>Le equazioni di Maxwell nel vuoto in assenza di sorgenti esterne</i> | 464 |
| 7.8.2 | <i>I fotoni e la quantizzazione dell'energia</i> | 466 |
| 7.8.3 | <i>L'effetto Casimir</i> | 468 |
| 7.8.4 | <i>Osservazioni conclusive</i> | 471 |
| 8 | Meccanica quantistica relativistica | 477 |
| 8.1 | Verso la meccanica quantistica relativistica | 477 |
| 8.1.1 | <i>Le unità naturali</i> | 478 |
| 8.1.2 | <i>Energia di una particella libera relativistica</i> | 478 |
| 8.1.3 | <i>L'equazione di Klein-Gordon</i> | 479 |
| 8.1.4 | <i>Un'interpretazione delle energie negative</i> | 483 |
| 8.1.5 | <i>Il campo di Klein-Gordon</i> | 485 |
| 8.1.6 | <i>Riassunto: l'equazione di Klein-Gordon e il campo scalare</i> | 489 |
| 8.2 | L'equazione di Dirac | 489 |
| 8.2.1 | <i>La corrente conservata</i> | 491 |
| 8.2.2 | <i>Soluzioni di particella libera</i> | 492 |
| 8.2.3 | <i>Interpretazione delle energie negative</i> | 494 |
| 8.2.4 | <i>Interazioni elettromagnetiche</i> | 494 |
| 8.3 | Le simmetrie dell'equazione di Dirac | 496 |
| 8.3.1 | <i>Momento angolare</i> | 496 |
| 8.3.2 | <i>Parità</i> | 497 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 8.3.3 | <i>Coniugazione di carica</i> | 498 |
| 8.3.4 | <i>Inversione temporale</i> | 499 |
| 8.3.5 | <i>CPT</i> | 500 |
| 8.4 | Soluzione nel caso di potenziale centrale | 501 |
| 8.4.1 | <i>L'atomo monoelettronico</i> | 504 |
| 8.5 | Teoria dei campi quantistica relativistica | 508 |
| A | Unità elettromagnetiche | 513 |
| B | Soluzioni elementari dell'equazione di Schrödinger | 519 |
| B.1 | Particella libera ($V = 0$) | 519 |
| B.2 | Potenziali costanti a tratti in una dimensione | 520 |
| B.2.1 | <i>Il potenziale con pareti rigide (scatola unidimensionale)</i> | 520 |
| B.2.2 | <i>La buca di potenziale quadrata</i> | 520 |
| B.3 | Problemi di trasmissione e riflessione | 521 |
| B.3.1 | <i>La buca quadrata</i> | 521 |
| B.3.2 | <i>La barriera di potenziale</i> | 522 |
| B.3.3 | <i>Il gradino di potenziale</i> | 522 |
| B.3.4 | <i>La barriera di potenziale generica</i> | 522 |
| B.4 | L'oscillatore armonico unidimensionale | 522 |
| B.5 | Il problema della forza centrale | 523 |
| B.6 | L'atomo di idrogeno | 527 |
| C | Hamiltoniana per una carica in campo elettromagnetico | 529 |
| D | Dimostrazione della regola della somma di momenti angolari (eq.3.358) | 531 |
| E | Calcolo dei coefficienti di Clebsch-Gordan | 533 |
| F | Note sulle variabili complesse | 534 |
| F.1 | Numeri complessi e funzioni complesse | 534 |
| F.2 | Derivazione e analiticità | 534 |
| F.3 | Integrazione e sviluppo in serie | 536 |
| F.4 | Il teorema dei residui di Cauchy | 537 |
| | Bibliografia | 540 |
| | Indice analitico | 543 |