

UMBERTO SCOTTI DI UCCIO

Basi di meccanica quantistica

UNIVERSITÀ

Indice

p. 13 Presentazione

Oltre i confini della meccanica classica

17 Capitolo 1

I successi e i limiti della fisica classica

1.1. Cosa è la fisica?, 17

1.2. La fisica classica, 18

1.3. Le regole generali della fisica classica, 21

1.4. Le forze, 22

1.5. I modelli semiclassici, 25

1.6. Il principio di corrispondenza 26

29 Capitolo 2

La struttura della materia e della radiazione

2.1. Oltre la fisica classica, 29

2.2. Vedere gli atomi, 29

2.3. Laboratorio di teoria: a caccia di un modello per calcolare le dimensioni degli atomi, 31

2.4. L'interazione radiazione-materia nel laboratorio didattico, 36

2.5. La meccanica quantistica, 39

2.6. Le stranezze, 41

2.7. I prossimi capitoli, 43

Livello 1

La costante di Planck e la quantizzazione dell'energia

47 Capitolo 3

La misura della costante di Planck nel laboratorio didattico

3.1. Il LED, 47

- 3.2. Laboratorio di elettronica: la caratteristica IV dei LED, 48
 - 3.3. Il significato fisico di V_s , 50
 - 3.4. Laboratorio didattico: la misura della costante di Planck, 52
 - 3.5. Quanto vale h ?, 57
- p. 57 **Capitolo 4**
Il fotone
- 4.1. La relazione $E = hv$, 57
 - 4.2. Emissione e assorbimento di fotoni, 59
 - 4.3. Lo spettro della radiazione elettromagnetica, 60
 - 4.4. La luce impulsata, 61
 - 4.5. Il danno da radiazione, 63
- 67 **Capitolo 5**
Il laser
- 5.1. Cos'è il laser, 67
 - 5.2. Dal LED al laser, 69
 - 5.3. Le caratteristiche tecniche dei laser, 71
 - 5.4. Impulsi laser, 73
- 77 **Capitolo 6**
I livelli di energia dell'atomo di idrogeno
- 6.1. La spettroscopia atomica, 77
 - 6.2. La misura di spettroscopia ottica nel laboratorio didattico, 78
 - 6.3. Lo spettro dell'idrogeno, 80
 - 6.4. La formula di Rydberg e l'interpretazione di Bohr, 81
 - 6.5. Come si eccita l'atomo di idrogeno, 84
 - 6.6. Gli stati liberi, 84
- Livello 2**
Le leggi del caso
- 89 **Capitolo 7**
La meccanica statistica
- 7.1. Un capitolo speciale, 89
 - 7.2. La termodinamica classica, 90
 - 7.3. Le definizioni operative della meccanica statistica, 91
 - 7.4. L'entropia, 94
 - 7.5. I sistemi isolati, 95

- 7.6. I sistemi a contatto con l'ambiente, 97
- 7.7. La meccanica statistica e la meccanica quantistica, 100

- p. 103 Capitolo 8
Il mitico corpo nero e l'energia solare
 - 8.1. Cos'è il corpo nero, 103
 - 8.2. Una misura nel laboratorio didattico, 105
 - 8.3. La formula di Planck, 109
 - 8.4. La legge di Wien e il colore delle stelle, 111
 - 8.5. Il bilancio energetico, 114
 - 8.6. L'energia solare, 116
 - 8.7. L'intensità della radiazione solare al suolo, 117

- 119 Capitolo 9
Il mondo microscopico
 - 9.1. L'azione meccanica, 119
 - 9.2. Cosa distingue il mondo macroscopico dal mondo microscopico, 120
 - 9.3. Altri due modi di calcolare l'azione meccanica caratteristica, 123
 - 9.4. Lilliput e Brobdingnag, 124

- 127 Capitolo 10
Il principio di indeterminazione e le leggi del caso
 - 10.1. Lo spazio delle fasi in meccanica classica, 127
 - 10.2. Un'esperienza nel laboratorio didattico, 128
 - 10.3. Il principio di indeterminazione, 133
 - 10.4. La dinamica dei sistemi quantistici, 136
 - 10.5. La morale della favola, 137

- 141 Capitolo 11
Le distribuzioni di probabilità in meccanica quantistica
 - 11.1. Perché parlare di probabilità, 141
 - 11.2. La definizione sperimentale di probabilità in meccanica classica, 141
 - 11.3. Statistica temporale e statistica di ensemble, 143
 - 11.4. Un esperimento di meccanica classica, 145
 - 11.5. Da un esperimento simulato alla teoria: le distribuzioni di probabilità, 147
 - 11.6. Un esperimento simulato: la particella nella scatola, 150
 - 11.7. La funzione d'onda, 153
 - 11.8. Dubbi e speranze, 154

Livello 3***La struttura della materia***

- p. 159 Capitolo 12
Gli orbitali atomici e la funzione d'onda
- 12.1. L'approccio quantistico alla struttura dell'atomo, 159
 - 12.2. Gli orbitali, 160
 - 12.3. La funzione d'onda, 163
 - 12.4. Una brevissima rassegna sperimentale, 164
 - 12.5. Analisi dei grafici: dall'orbitale al raggio di Bohr, 166
 - 12.6. Laboratorio di teoria: una stima del raggio di Bohr, 167
 - 12.7. Le scale di energia, quantità di moto, velocità, 169
 - 12.8. Orbite e orbitali, 169
- 173 Capitolo 13
Il momento angolare orbitale e lo spin
- 13.1. Il momento angolare nel mondo micro, 173
 - 13.2. Il momento angolare dei corpi estesi in meccanica classica, 173
 - 13.3. Il momento angolare delle particelle quantistiche, 174
 - 13.4. Il principio di indeterminazione e il momento angolare, 176
 - 13.5. Il momento angolare orbitale in meccanica quantistica, 176
 - 13.6. Lo spin delle particelle elementari, 178
 - 13.7. Un esempio di conservazione del momento angolare, 179
 - 13.8. Il momento magnetico dell'elettrone, 180
- 183 Capitolo 14
La struttura elettronica dell'atomo di idrogeno
- 14.1. Cosa abbiamo imparato dell'atomo di idrogeno? Cosa manca ancora?, 183
 - 14.2. Gli stati stazionari dell'atomo di idrogeno, 183
 - 14.3. Le rappresentazioni della struttura elettronica, 186
 - 14.4. Le transizioni ottiche e le leggi di conservazione: le regole di selezione, 186
- 189 Capitolo 15
Gli atomi con più elettroni
- 15.1. Il modello a elettroni indipendenti, 189
 - 15.2. La struttura elettronica, 191
 - 15.3. Lo stato 1s, 193

- 15.4. L'effetto di schermaggio, 194
 - 15.5. L'energia dei livelli: il numero quantico n , 197
 - 15.6. L'energia dei livelli: il numero quantico l , 198
 - 15.7. L'energia di legame, 200
 - 15.8. Gli stati eccitati dell'atomo, 201
- p. 205 Capitolo 16
Le molecole
- 16.1. Quanto sono grandi le molecole, 205
 - 16.2. Il legame chimico, 207
 - 16.3. Gli orbitali molecolari, 208
 - 16.4. Laboratorio di teoria: il meccanismo fisico che lega gli atomi, 210
 - 16.5. L'oscillatore quantistico, 211
 - 16.6. L'interazione delle molecole con la radiazione, 214
- 217 Capitolo 17
I solidi
- 17.1. Cristalli e amorfi, 217
 - 17.2. Le proprietà strutturali dei cristalli, 218
 - 17.3. Le proprietà termiche dei cristalli, 219
 - 17.4. Le proprietà elettroniche dei cristalli, 220
 - 17.5. Gli stati localizzati e gli stati delocalizzati, 221
 - 17.6. La struttura elettronica dei cristalli, 223
 - 17.7. Metalli e isolanti, 225
- 227 Capitolo 18
L'effetto fotoelettrico e le proprietà ottiche dei metalli
- 18.1. Le scale di energia, 227
 - 18.2. La banda di conduzione dei metalli: elettroni quasi liberi, 228
 - 18.3. L'effetto fotoelettrico, 230
 - 18.4. Le proprietà ottiche dei metalli, 233
- 237 Capitolo 19
La conduzione elettrica nei metalli
- 19.1. La legge di Ohm, 237
 - 19.2. Elettroni in movimento, 237
 - 19.3. Lo scattering, 239
 - 19.4. Laboratorio di teoria: l'effetto del vento, 242
 - 19.5. Laboratorio di teoria: l'effetto del campo elettrico, 244

- 19.6. La corrente elettrica, 245
- 19.7. Torniamo alla legge di Ohm, 247
- 19.8. Contro cosa urtano gli elettroni?, 248

- p. 251 Capitolo 20
Gli isolanti e i semiconduttori
 - 20.1. Un classico esperimento di elettrostatica, 251
 - 20.2. Pillole di elettrostatica dei metalli, 252
 - 20.3. Pillole di elettrostatica dei dielettrici, 253
 - 20.4. Le proprietà dei materiali, 255
 - 20.5. La fotoconducibilità, 256
 - 20.6. Le proprietà ottiche degli isolanti, 258
 - 20.7. I semiconduttori, 259
 - 20.8. Il doping, 260
 - 20.9. Le lacune, 262

- Livello 4**
La meccanica ondulatoria

- 267 Capitolo 21
Onde
 - 21.1. Dalla meccanica classica alla meccanica quantistica, 267
 - 21.2. La fenomenologia delle onde nel laboratorio didattico, 269
 - 21.3. Cosa spostano le onde?, 270
 - 21.4. Il problema del supporto, 272
 - 21.5. Laboratorio di teoria: onde come funzioni matematiche, 273
 - 21.6. I fronti d'onda e la velocità di fase, 275
 - 21.7. Onde su campi scalari e onde su campi vettoriali, 277

- 281 Capitolo 22
Dalle onde monocromatiche al pacchetto d'onda
 - 22.1. Laboratorio di teoria: la matematica delle onde, 281
 - 22.2. Le onde impulsive, 283
 - 22.3. Le onde monocromatiche, 284
 - 22.4. Il pacchetto d'onda, 286
 - 22.5. L'analisi di Fourier, 287
 - 22.6. La meccanica ondulatoria, 290
 - 22.7. Un esperimento didattico di analisi dati, 291
 - 22.8. Il principio di indeterminazione per il pacchetto d'onda, 292

- p. 295 Capitolo 23
Onda e particella
- 23.1. Oggetti quantistici come pacchetti d'onda, 295
 - 23.2. L'esperimento della doppia fenditura nel laboratorio didattico, 295
 - 23.3. Una breve rassegna sperimentale, 298
 - 23.4. Le relazioni di de Broglie, 300
 - 23.5. La lunghezza d'onda degli oggetti, 301
 - 23.6. L'interazione coerente, 303
- 307 Capitolo 24
La funzione d'onda
- 24.1. Onda e particella, 307
 - 24.2. L'interpretazione stocastica della funzione d'onda, 308
 - 24.3. La regola di Born, 309
 - 24.4. Laboratorio di teoria: l'interpretazione dei grafici, 311
 - 24.5. Laboratorio di teoria: la barriera di potenziale in meccanica classica, 313
 - 24.6. L'effetto tunnel, 314
 - 24.7. Le equazioni della meccanica quantistica, 316
- 319 Capitolo 25
Onde stazionarie e particelle in scatola
- 25.1. La domanda di ricerca, 319
 - 25.2. Un esperimento nel laboratorio didattico, 319
 - 25.3. Laboratorio di teoria: un modello interpretativo, 322
 - 25.4. Anche in fisica classica c'è la quantizzazione!, 323
 - 25.5. Elettroni come onde in scatola, 324
 - 25.6. Il modello quantistico di particella nella scatola, 326
 - 25.7. La funzione d'onda della particella nella scatola, 328
 - 25.8. Il principio di indeterminazione per la particella nella scatola, 329
- 331 Capitolo 26
La misura quantistica e il collasso della funzione d'onda
- 26.1. La polarizzazione della luce, 331
 - 26.2. Un esperimento didattico, 332
 - 26.3. L'interpretazione classica, 336
 - 26.4. Un esperimento di pensiero, 337
 - 26.5. Le misure quantistiche, 338
 - 26.6. La seconda legge di Born, 340

- 26.7. Il collasso della funzione d'onda, 341
- 26.8. Il teorema di Bell, 342
- 26.9. Gli assiomi della meccanica quantistica, 344
- 26.10. Le interpretazioni della meccanica quantistica, 345

Presentazione dell'opera

La meccanica quantistica affascina e spaventa, perché temiamo che la nostra cultura scolastica sia insufficiente per farci un'idea accettabile di questa parte della fisica. D'altro canto, Questa circostanza mette in soggezione chi desidera avere un'idea di come funzionino le tecnologie attuali e quelle del futuro prossimo; ma è in difficoltà anche chi si confronta, più semplicemente, con la comunicazione mediatica e sociale, ormai invasa da gatti di Schrödinger, entanglement, qubit, teletrasporto, ecc., citati più spesso a sproposito che a giusta ragione.

Ci sono migliaia di libri che parlano di meccanica quantistica, sicché scriverne un altro richiede una buona dose di coraggio e di presunzione. Meglio dirlo subito: questa opera non ha tanto l'ambizione di essere migliore quanto, piuttosto, quella di essere diversa dalle altre.

Sinteticamente:

1. questo testo è specificamente rivolto a chi insegna fisica nella scuola secondaria e agli studenti della scuola secondaria o appena diplomati, che per curiosità scientifica vogliono approfondire questo tema, anche da soli; è anche adatto come prima lettura agli studenti che affronteranno in modo formale la meccanica quantistica all'università; infine, grazie agli approfondimenti, è perfettamente adatto ai corsi universitari di ingegneria e scienze o come premessa ai corsi più formali di meccanica quantistica;
2. questo non è un testo di carattere divulgativo, ma un manuale di fisica scritto con la leggerezza di un romanzo. Il formalismo è veramente elementare. I nodi concettuali sono affrontati con rigore, ma senza la pretesa di introdurre dimostrazioni formali;
3. l'opera nasce da anni di insegnamento in vari corsi universitari, corsi di aggiornamento per docenti della scuola secondaria e percorsi formativi extracurricolari rivolti a studenti liceali. Nell'approccio ai contenuti, questo testo si ispira alla letteratura scientifica della didattica della fisica, a partire dal rinnovamento della didattica della meccanica quantistica di livello universitario proposto da Lévi-Leblond,¹ fino alle proposte recenti.

In sintesi, questi sono i punti qualificanti:

1. l'uso dei ragionamenti euristici e qualitativi come premessa allo sviluppo formale di un modello fisico;
2. il rifiuto dell'approccio storico alla disciplina, sostituito dal riferimento episodico ai protagonisti e ai fatti della storia della fisica;
3. il riferimento continuo agli esperimenti recenti, con l'obiettivo di cercare il miglior modo di presentare e introdurre un argomento e non il più noto o il più antico;
4. l'uso di un punto di vista moderno anche nell'inquadramento teorico, in modo da preparare lettrici e lettori al linguaggio della fisica contemporanea.

1. J.M. Lévi-Leblond, «Science & Education», 12, 2003, pp. 495-502.

La questione del formalismo merita un breve discorso a parte. Nella didattica tradizionale, il famoso detto “Zitto e calcola”² mette a tacere ogni dubbio interpretativo: la teoria è identificata con la sua struttura matematica; non occorre alcuna giustificazione del formalismo, che può essere fissato in forma assiomatica; l'unica cosa che conta è l'accordo con gli esperimenti. Questo è l'approccio certamente più diffuso in ambito universitario. Da queste premesse, segue che non si può capire la meccanica quantistica senza capirne la forma matematica.

In questo testo vogliamo proporre un approccio molto diverso. La meccanica quantistica è identificata con l'ambito dei fenomeni “micro”; perciò, parlare di meccanica quantistica significa raccontare esperimenti. Alla matematica, che resta necessaria per avere una descrizione quantitativa e predittiva, sono sistematicamente affiancate le rappresentazioni grafiche più opportune. È invece rifiutato ogni tentativo di banalizzare o, peggio, di usare forme suggestive per parlare delle equazioni difficili. Riteniamo, infatti, che questi metodi non aiutino quanto piuttosto danno al lettore solo l'illusione di aver compreso qualche concetto.

L'ordine di presentazione dei temi affrontati segue un criterio originale. Nei primi capitoli, si introducono gli ambiti della fisica classica e della fisica moderna, per dimostrare che la fisica classica non può spiegare nessuna proprietà della materia e della radiazione. Inizia da qui un percorso le cui tappe sono segnate dall'ordine crescente di difficoltà:

1. la meccanica quantistica “facile” è quella degli atomi, delle molecole, dei solidi e delle loro interazioni con i fotoni. Si parte dalla misura della costante di Planck e dal concetto di fotone; si affronta il nodo concettuale del principio di Heisenberg; infine, si unisce il linguaggio della chimica a quello della fisica per presentare le proprietà della materia e della radiazione;
2. la meccanica quantistica “meno facile” è la meccanica ondulatoria. In questa parte dell'opera si riprendono le idee sulle onde meccaniche ed elettromagnetiche per stabilire una forte analogia con le “onde di materia” descritte dalle equazioni di Schrodinger e Dirac;
3. la meccanica quantistica “difficile” è infine quella che riguarda i comportamenti più bizzarri e le frontiere della fisica e dell'epistemologia, fino ad arrivare a scoprire i limiti della teoria nella sua forma attuale.

La scala di difficoltà, facciamo attenzione, non è assoluta: lettrici e lettori sono chiamati a ripianare i gradini arrivando in fondo al testo!

Un ringraziamento speciale va ai colleghi I. Testa e S. Galano per il contributo all'opera, in particolare per ciò che riguarda gli aspetti legati alla didattica della fisica.

2. “Shut up and calculate” è una frase attribuita a troppi fisici per essere davvero certi della sua paternità; cfr., i.e., la voce su wikipedia.

Oltre i confini
della meccanica classica

1. I successi e i limiti della fisica classica

La fisica classica ha aperto una finestra sul mondo, ma non permette di comprendere le proprietà della materia e della radiazione a un livello fondamentale. In questo capitolo discuteremo in modo critico dei successi di questo approccio, con l'obiettivo di capire come superarne i limiti e rifondare la fisica su basi più ampie.

§1.1. Cosa è la fisica?

Le scienze naturali

Le scienze naturali si propongono un obiettivo ambizioso: aiutarci a comprendere come è fatto e come funziona il mondo. Tutto ci dice che, in questo compito, abbiamo lavorato e lavorino molto bene. Lo vediamo dal loro continuo progresso, tanto sul piano fondamentale, quanto su quello applicativo o, in altri termini, dall'evoluzione culturale e tecnologica dell'intera umanità.

D'altro canto, le scienze naturali si trovano ad affrontare una grande questione di fondo. Su cosa possono basare la propria autorevolezza? Come possono definire un metodo di lavoro che permetta di procedere senza incorrere in contraddizioni, ambiguità, dubbi interpretativi, ragionamenti circolari, ecc.? Non è un problema da poco; infatti, su questo tema i filosofi hanno dibattuto per secoli e senza dubbio continueranno a farlo nei secoli a venire. Nel frattempo, a partire da Galileo, gli scienziati hanno iniziato a darsi delle regole precise.

Il metodo scientifico

Per rispondere in modo costruttivo alle obiezioni di carattere metodologico, le scienze naturali fissano in modo molto rigido il proprio modo di operare. È ciò che comunemente chiamiamo *metodo scientifico*.

Il metodo scientifico, in estrema sintesi, anticipa il pensiero del filosofo austriaco L. Wittgenstein:

Su ciò di cui non si può parlare, si deve tacere.

Dunque, sappiamo di poterci fidare di quello che le scienze naturali ci dicono perché, quando non possono parlare, stanno zitte. È un pensiero confortante.¹

¹ Non apriremo qui la discussione, molto attuale, sulla grande differenza che c'è tra ciò che dice la scienza e ciò che dicono singoli scienziati a titolo personale.

Il caso della fisica: il metodo scientifico Nel caso della fisica, il *metodo scientifico* parte proprio da questo punto, cioè dalla precisazione di quale sia l'insieme di "cose" di cui la fisica può parlare e, per contrasto, di quali non può dire nulla. Esso precisa, inoltre, in quale modo ne possa parlare e, per contrasto, in quale modo non possa farlo.

Le definizioni operative In qualunque manuale di fisica generale leggiamo che la fisica si occupa esclusivamente dello studio delle *grandezze fisiche*; che le *grandezze fisiche* sono meticolosamente descritte dalle loro *definizioni operative*; che ogni definizione operativa include la spiegazione di come fare ad associare alla grandezza fisica in questione uno o più numeri, che ne danno la *misura*. Immediatamente dopo, apprendiamo che il compito della fisica è descrivere i fenomeni, cioè tutto ciò che abbiamo intorno, attraverso le misure delle grandezze fisiche che li caratterizzano e attraverso le relazioni che si stabiliscono tra di esse. In altre parole, la fisica descrive sempre i fenomeni con dei numeri; non sorprende, quindi, che il suo linguaggio naturale sia la matematica.

I limiti della fisica classica Perché tornare su questi concetti? Non dovrebbero essere già chiari e consolidati dallo studio della fisica di base? Il motivo è semplice: la meccanica quantistica ci mette di fronte a molti problemi interpretativi del tutto nuovi. Alcuni di questi problemi sono delle vere e proprie aporie, cioè questioni davvero difficili e spesso ancora aperte. Altri, però, si possono affrontare con una certa tranquillità a patto di fare qualche passo indietro, prima di farne altri in avanti. Dunque, ci tocca essere molto critici su tutte le cose che abbiamo imparato nei manuali di fisica generale, andare a cercare i problemi concettuali, i limiti, gli ambiti di validità, perché solo così possiamo renderci conto di come la meccanica quantistica li superi e solo così potremo capire che la meccanica quantistica non è un pezzo di fisica aggiunto alla fisica classica, ma è semplicemente "la" fisica.

Dove ci porta questo discorso? Questo capitolo è un brevissimo viaggio attraverso alcuni concetti fondamentali della fisica classica. Nei prossimi paragrafi proveremo a rispondere, sinteticamente, a questa domanda: fino a che punto ci porta la fisica classica? Quali sono i suoi successi e quali i punti deboli? Possiamo spiegarci, in termini generali, perché la fisica classica ha dei limiti oltre i quali non può andare?

§1.2. La fisica classica

Cosa è la "fisica classica" Con la locuzione "fisica classica" si intende, di solito, l'insieme della meccanica di Newton, della termodinamica di Joule e Clausius e

dell'elettromagnetismo di Maxwell. Per molti versi, però, anche la relatività ristretta di Einstein fa parte dello stesso blocco concettuale. Il motivo è questo: le equazioni di Maxwell già contengono la costante universale caratteristica della relatività, cioè la velocità della luce nel vuoto c_0 ; inoltre contengono, a patto di saperle trovare, le trasformazioni relativistiche di Lorentz. Perciò, con un po' di elasticità, la includeremo nel gruppo.

Le interpretazioni storiche

Dobbiamo ora fare una precisazione importante, per sgombrare il campo da un equivoco. Non ha molto senso parlare di "fisica classica" in chiave storica, dicendo per esempio "è la fisica nota alla fine del XIX secolo". Anche se questo è un modo comune di raccontare le cose, resta pur sempre un modo sbagliato.

In primo luogo così si fa un torto alla storia; non è affatto vero che la fine del XIX secolo segni un confine di demarcazione draconiano. Anzi, proprio nel secolo successivo sono arrivati molti contributi importanti che hanno completato il quadro della fisica classica sia sul piano formale che nelle basi fenomenologiche.

In secondo luogo si fa un torto alla fisica, perché non fa parte di questa disciplina il ragionamento fondato su base storica. Per esempio, non ha senso chiedere a uno studente di fisica o a un ricercatore: "Affronta questo problema, ma sta attento: potrai usare solo i concetti noti fino al millenovecento". Solo gli storici della fisica saprebbero rispondere correttamente a domande così particolari; meglio lasciare a loro questo tipo di appiccio e proporci un diverso modo di ragionare.

La fisica classica è un modello fisico

Il modo corretto di individuare la "fisica classica" è, dunque, un altro. La storia non c'entra niente. La fisica classica è, semplicemente, un modello fisico.²

In generale, chiamiamo "modello fisico" un insieme di leggi espresse in forma matematica e adatte a descrivere le relazioni tra le grandezze fisiche caratteristiche di certi fenomeni. Un modello fisico ha, quindi, due elementi: da un lato un insieme di fenomeni, che chiamiamo "ambito di validità", dall'altro un insieme di leggi per descriverli.

L'ambito della fisica classica

L'ambito della fisica classica è un po' sfumato, ma con un certo grado di approssimazione si può dire che coincida con l'insieme dei fenomeni macroscopici. Sinteticamente, la ragione è questa: le definizioni operative delle grandezze della fisica classica funzionano bene solo in questo caso. Vediamone un paio di esempi.

2. Non faremo distinzione, in questo libro, tra i termini "modello fisico" e "teoria".

Esempio E.1.1
*La definizione di
 velocità*

Limitiamoci alla meccanica di Newton. Fissiamo accuratamente un sistema di riferimento nel quale effettuare le misure; sperimentalmente, potremo mai arrivare alla certezza che un corpo sia fermo?

Questa domanda ci porta ad analizzare in modo critico la definizione operativa di velocità. Partiamo dunque dalla velocità media $v_m = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ e portiamo il limite per Δt che tende a zero. Ma un attimo! Sperimentalmente, questa è un'operazione priva di senso. Tutto ciò che possiamo fare realmente è considerare una sequenza di intervalli di tempo via via più piccoli, ma a un certo punto dovremo necessariamente fermarci. Alla fine del processo di misura avremo determinato la velocità media su un certo intervallino di tempo, quello minimo; come si usa dire, un intervallo di tempo piccolo, ma finito.

Supponiamo di aver trovato, in questo intervallino, che $v_m = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = 0$.

L'unica cosa che possiamo concludere è che la posizione iniziale e quella finale coincidono, ma non sappiamo nulla su cosa sia accaduto tra l'istante iniziale e quello finale: il corpo potrebbe essere stato fermo, ma potrebbe anche essere andato da qualche parte per poi tornare indietro. Peggio di così, la formula che dà v_m è adatta solo al modello di punto materiale. In questo modello, noi supponiamo che la lunghezza dell'oggetto sia piccola rispetto a tutte le altre lunghezze caratteristiche; senonché, nel valutare la velocità, vorremmo considerare spostamenti Δx sempre più piccoli, così piccoli che il modello di punto materiale non può funzionare più!

Tanto basta; siamo in grado di trarre una conclusione semplice e al tempo stesso disarmante: a un'analisi attenta, ahimè, la definizione operativa di velocità ha dei seri limiti di applicazione.

Non dobbiamo, però, decidere troppo rapidamente di gettare la definizione classica di velocità alle ortiche, visto che in tanti casi funziona benissimo; più saggiamente, dobbiamo solo prepararci alla possibilità che in certe situazioni sperimentali non funzioni. Non saremo stupiti, dunque, quando scopriremo che in meccanica quantistica la velocità passa in secondo piano e che la stessa sorte tocca anche all'accelerazione. Doveva essere così, è la cronaca di una morte annunciata.

Esempio E.1.2
La definizione di forza

La definizione operativa di forza, in meccanica classica, è una definizione di carattere sperimentale che procede più o meno in questo modo: prima si introducono le specifiche di un particolare sensore, che chiamiamo dinamometro; poi si definisce la grandezza fisica "forza" attraverso il suo procedimento di misura, cioè spiegando come si usa il dinamometro.

Anche in questo caso incontriamo qualche difficoltà. In primo luogo, la definizione operativa richiede la condizione di statica, ma abbiamo visto che non sempre si può dire se un corpo è fermo oppure si muove.

In secondo luogo, non possiamo costruire dinamometri che funzionino sulla scala atomica o subatomica, per esempio per misurare la forza su un singolo elettrone.

Anche il concetto di forza è confinato all'ambito macroscopico; in meccanica quantistica non se ne parla più.

§1.3. Le regole generali della fisica classica

Il successo della fisica classica La fisica classica può vantare un enorme bagaglio di successi nello spiegare i fenomeni naturali. In sintesi, ciò dipende da una buona sistemazione di base, in cui riconosciamo da un lato “le regole del gioco” e dall'altro le “leggi di forza”.

Le leggi di Newton Le regole del gioco sono le equazioni generali, quelle cioè che valgono sempre.
Se i corpi non si muovono troppo velocemente, le regole del gioco sono le leggi della dinamica, cioè le tre leggi di Newton: il principio di inerzia con la relatività di Galileo, la seconda legge della dinamica e il principio di azione e reazione.

La relatività ristretta Se le velocità in gioco sono invece prossime alla velocità della luce nel vuoto c_0 , la descrizione si complica. Per tener conto delle trasformazioni di Lorentz, occorre modificare le equazioni; entriamo nella meccanica relativistica.
In moltissimi casi, comunque, gli effetti relativistici sono così piccoli da non influenzare la descrizione qualitativa dei fenomeni (cioè, a parole li descriveremmo allo stesso modo). Cambiano invece le determinazioni quantitative; tuttavia, talvolta le differenze sono tanto piccole che i fisici parlano di “correzioni relativistiche”.

La conservazione dell'energia Oltre alle leggi di Newton, tra le regole del gioco troviamo alcune leggi molto speciali: quelle di “conservazione”.
Partiamo dall'energia. Nello studio della fisica elementare si segue di solito questo percorso: in meccanica si introduce prima il concetto di energia cinetica e, successivamente, quello di energia potenziale; in termodinamica si allarga poi il campo, ammettendo implicitamente che la nozione di energia debba essere più generale: si parla, per esempio, di energia chimica, ecc.
Cominciamo ad avere troppe forme: in definitiva, cos'è l'energia? Parafrasando una delle famose *Lectures on Physics* di Feynman,³

³ Le *Lectures on Physics* di R. Feynman sono ora disponibili in forma aperta su Internet, su concessione del Caltech.

potremmo rispondere che l'energia è una certa quantità che possiamo valutare numericamente di volta in volta con le equazioni opportune e che si mantiene costante, qualunque cosa stia cambiando intorno, durante tutti i fenomeni fisici.

Insomma, la grandezza fisica "energia" è difficile da definire in forma astratta e generale, ma si conserva. È proprio l'esistenza della legge di conservazione che la rende così importante.

La conservazione della quantità di moto

Abbiamo una seconda legge di conservazione: quella della quantità di moto.

Possiamo definire questa grandezza fisica a partire dal caso più semplice, quello di un piccolo oggetto di massa m , in moto a velocità \vec{v} , ponendo $\vec{p} = m \vec{v}$. Ma occorre un po' di attenzione: al di là delle correzioni relativistiche,⁴ questa formula non va sempre bene. Infatti, le equazioni di Maxwell dimostrano che non solo le particelle, ma anche il campo elettromagnetico è caratterizzato da una quantità di moto propria, che però non possiamo esprimere con la stessa formula.

La conservazione del momento angolare

Lo stesso accade anche per il momento angolare, una grandezza fisica su cui torneremo a più riprese. Si parte dalla definizione del momento angolare di una particella, dato da $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$, ma si deve poi considerare che occorre una definizione più ampia, perché ad esempio anche il campo elettromagnetico ha un suo proprio momento angolare. Ci troviamo insomma in una situazione analoga a quella dell'energia: anche la quantità di moto e il momento angolare sono difficili da definire in forma generale. Abbiamo formule che funzionano caso per caso; il risultato è reso prezioso dall'esistenza delle leggi di conservazione.

Approfondimento #1.1

Perché i fisici sparano particelle le une contro le altre per avere informazioni sulla loro struttura interna?

§1.4. Le forze

La risultante delle forze

Le regole generali non bastano: per stabilire come si muoverà un corpo abbiamo bisogno di aggiungere altre informazioni dettagliate.

Per esempio, mettiamo a confronto il moto di un corpo in caduta libera con quello di un altro che scivola su un piano inclinato. Le regole del gioco sono le stesse, perciò senza pensarci troppo in ambo i casi scriviamo $\vec{F} = m\vec{a}$, andrà sempre bene.

4. Le correzioni relativistiche riguardano il valore della massa m , da distinguere dalla massa a riposo m_0 .

La \vec{F} a primo membro non è “una” forza, è la somma vettoriale di tutte le forze che agiscono sul corpo, cioè quella che di solito chiamiamo “risultante” o “forza netta” o ancora “forza totale”, e non è affatto una cattiva idea indicarla col simbolo più esplicito \vec{F}_{Tot} . Per determinarla, la prima cosa da fare è quindi riconoscere quali forze entrano in gioco. Come si fa?

Le forze sono interazioni

Ci aiuta la terza legge della dinamica: ogni “legge di forza” è una “legge di interazione”, in cui un corpo A agisce sul corpo B , mentre al tempo stesso il corpo B agisce sul corpo A .

Ne segue una regola semplice e saggia, da seguire sempre, senza nessuna possibile eccezione al mondo: se vogliamo capire che forze agiscono su un corpo, dobbiamo guardare quali altri corpi ha intorno (figura 1.1).

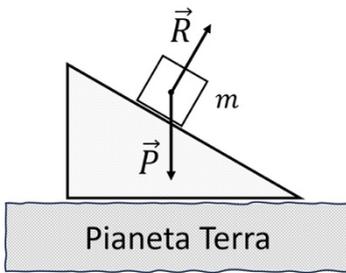


Figura 1.1.

Un classico problema di meccanica: disegnare i vettori forza che agiscono su un blocchetto di massa m posto su un piano inclinato liscio; cioè, disegnare il suo “diagramma di corpo libero”.

Per individuare le forze, ci chiediamo cosa c’è intorno al corpo che stiamo esaminando: siccome c’è la Terra, sul nostro corpo agirà il peso \vec{P} ; siccome c’è il piano d’appoggio, c’è la reazione vincolare \vec{R} . Siccome poi non ci sono altri corpi che interagiscano significativamente col blocchetto, non ci sono altre forze che agiscono su di esso.

Le interazioni fondamentali

Nel corpus della fisica classica abbiamo due sole leggi universali di forza: la legge di gravitazione e la legge dell’elettromagnetismo, codificata dalle equazioni di Maxwell. Si tratta, naturalmente, di due leggi di interazione: la prima descrive l’interazione tra due masse, la seconda l’interazione tra due cariche, includendo tanto l’interazione elettrica quanto quella magnetica.

Le costanti universali

Le equazioni che descrivono le interazioni fondamentali possono contenere solo costanti universali, cioè grandezze fisiche il cui valore numerico dipende esclusivamente dalla scelta delle unità di misura, ma non cambia da luogo a luogo o con lo scorrere del tempo.

Le costanti universali della fisica classica sono due. Per la gravitazione c’è la costante di gravitazione universale G . Per l’elettromagnetismo c’è bisogno di fare attenzione. Ricordiamo che nel *S.I.* la permeabilità magnetica del vuoto μ_0 è fissata dalla scelta dell’unità di misura della corrente elettrica, l’ampere; restano, quindi, la costante dielettrica del vuoto ϵ_0 e la velocità della luce nel vuoto c_0 . Tuttavia, ϵ_0 e c_0 sono legate

tra loro dall'equazione $c_o = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_o \mu_o}}$. In conclusione, anche l'elettromagnetismo è caratterizzato da una sola costante universale indipendente.

Le leggi di unificazione

La legge della gravitazione universale è stata il primo grande esempio di legge di unificazione. Newton si rese conto che avrebbe potuto descrivere la caduta di una mela e la rotazione della Luna intorno alla Terra, due fenomeni molto lontani tra loro, ricorrendo ad uno stesso modello e alla stessa legge di forza.

Le equazioni di Maxwell, a loro volta, unificano le leggi dell'elettrostatica, del magnetismo, dell'elettrodinamica e dell'ottica, mettendo insieme il tutto sotto il cappello dell'elettromagnetismo.

Approfondimento #1.2

Oggi sappiamo che esistono (almeno) altre due interazioni fondamentali, l'interazione debole e quella forte. Le leggi che le descrivono contengono altre costanti universali?

Approfondimento #1.3

Perché la fisica classica non può descrivere in nessun modo né l'interazione debole né quella forte?

I fenomeni e le forze

Apparentemente, nei fenomeni che abbiamo sotto agli occhi nella vita di tutti i giorni, vediamo in azione molte forze diverse. In realtà (figura 1.2), si tratta di manifestazioni più o meno complesse della gravitazione e dell'interazione elettromagnetica, almeno escludendo lo sfortunato caso di avere a che fare con qualche processo radioattivo.

Leggi fenomenologiche di forza

Le leggi di forza fondamentali sono descritte da equazioni universali; le leggi delle altre forze sono invece descritte da equazioni fenomenologiche. Esempi di equazioni fenomenologiche sono la legge di Hooke, la legge dell'attrito radente cinematico, ecc.

In ciascuna di queste leggi compaiono alcune grandezze fisiche che descrivono le proprietà specifiche dei corpi, dette *parametri fenomenologici*. Sono parametri fenomenologici, ad esempio, la costante elastica k di una molla; il coefficiente di attrito radente cinematico μ_r nello slittamento di due superfici a contatto; la densità di massa ρ_m ; la resistività elettrica ρ ; la costante dielettrica relativa ϵ_r ; ecc.

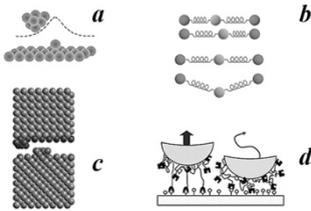


Figura 1.2.

a. Le reazioni vincolari sono l'effetto della repulsione elettrostatica tra gli "ultimi" atomi di un corpo e i "primi" dell'altro. b. Le forze elastiche dipendono dal fatto che i legami chimici (dovuti essenzialmente a forze elettrostatiche) sono elastici, il che consente di descrivere le molecole (e anche i solidi) con un modello di masse e molle; c. l'attrito è determinato dalla rottura dei legami di coesione con dissipazione di energia; d. le forze di coesione sono legami chimici, quelle di adesione sono legami chimici o forze (elettrostatiche) di Van der Waals.

I parametri fenomenologici

Generalizzando, possiamo dire che la fisica classica descrive tutte le proprietà della materia e della radiazione elettromagnetica ricorrendo esclusivamente ai parametri fenomenologici. Essi possono essere valutati sperimentalmente, da caso a caso, e poi utilizzati nelle equazioni della teoria per fare predizioni quantitative sull'esito di certi esperimenti e anche per trarre conclusioni generali. Questo modo di procedere mette la fisica classica in una posizione di forza: bastano poche informazioni sperimentali per descrivere tantissimi fenomeni.

D'altro canto, i parametri fenomenologici devono dipendere dal modo in cui la materia è aggregata: sono grandezze che, in ultima analisi, dovrebbero poter essere stimate sapendo solo come sono sistemati gli atomi nei diversi materiali. Tuttavia, la fisica classica non dispone degli strumenti teorici per assolvere a questo compito. Vediamo perché, con l'aiuto di un esempio.

Esempio 1.3 La densità di massa

Per "calcolare da principi primi" la densità del ferro dovrebbe essere sufficiente sapere che gli atomi di ferro contengono 26 elettroni ciascuno e che la massa media dei loro nuclei è circa 55.8 u.m.a.; queste sono, infatti, le loro uniche caratteristiche distintive. A partire da questo dato, in linea di principio si dovrebbe saper calcolare il volume ΔV occupato da una massa Δm di atomi e, infine, la densità. Ahimè, la fisica classica non ce la può fare.

§1.5. I modelli semiclassici

Per descrivere le proprietà della materia a volte si usano modelli "semiclassici". In un modello semiclassico si traggono dalla fisica e dalla chimica sperimentali alcune informazioni sulla natura microscopica della materia, per poi giustificarle o usarle in qualche ragionamento seguendo le regole della fisica classica.