

Carlo Cosmelli

Fisica per filosofi

Percorsi storico-filosofici di Paolo Pecere

1ª edizione, marzo 2021

© copyright 2021 by Carocci editore S.p.A., Roma

Realizzazione editoriale: Omnibook, Bari

Impaginazione: Luca Paternoster, Urbino

Finito di stampare nel marzo 2021
da Lineagrafica, Città di Castello (PG)

ISBN 978-88-430-0000-0

Riproduzione vietata ai sensi di legge
(art. 171 della legge 22 aprile 1941, n. 633)

Senza regolare autorizzazione,
è vietato riprodurre questo volume
anche parzialmente e con qualsiasi mezzo,
compresa la fotocopia, anche per uso interno
o didattico.

Indice

Prefazione	11
Elenco delle grandezze e dei simboli	15
Introduzione	19
I principi della fisica di <i>Carlo Cosmelli</i>	19
<i>Sui Percorsi storico-filosofici</i> di <i>Paolo Pecere</i>	23
1. Fisica: linguaggio, termini e definizioni	27
1.1. Il gioco delle parti: di cosa parleremo, come e perché	27
1.2. Linguaggio e ipotesi di base	33
1.3. Nota. Grandezze fisiche	42
1.4. Nota formale. Variazioni, derivate, somme	44
Percorso storico-filosofico 1. Fisica, meccanica, filosofia sperimentale	47
2. Meccanica classica	53
2.1. La meccanica classica: introduzione	54
2.2. Il primo principio della dinamica: il principio di inerzia	55

Percorso storico-filosofico 2. Spazio, movimento naturale e inerzia	63
2.3. Il secondo principio della dinamica	67
2.4. Il terzo principio della dinamica	72
2.5. Relatività e invarianza galileiane	74
2.6. Principi, leggi, leggi fenomenologiche	77
2.7. Massa inerziale e massa gravitazionale: il principio di equivalenza	81
2.8. L'energia. 1	83
2.9. Compendio di meccanica classica	90
Percorso storico-filosofico 3. Meccanicismo e forza di gravità	92
3. Termodinamica	97
3.1. Introduzione: qual è il problema e quale la sua soluzione	97
3.2. I principi della termodinamica in breve	102
3.3. Definizioni di alcune delle grandezze utilizzate in termodinamica	103
3.4. Il primo principio della termodinamica	113
3.5. L'energia. 2	116
3.6. Il secondo principio della termodinamica	116
3.7. L'entropia	122
3.8. Entropia e probabilità	127
3.9. Il diavoleto di Maxwell	138
3.10. Entropia e informazione: un accenno	139
3.11. Il terzo principio della termodinamica: teorema di Nernst	145
3.12. Il principio zero della termodinamica	146
Percorso storico-filosofico 4. Unità della natura e conservazione dell'energia	147

4.	Elettromagnetismo	153
4.1.	Introduzione	154
4.2.	Una nuova proprietà: la carica elettrica	154
4.3.	Il concetto di campo	161
4.4.	Le equazioni di Maxwell	167
4.5.	Il concetto di unificazione delle interazioni	173
4.6.	Onde	174
	Percorso storico-filosofico 5. Moto assoluto, spazio assoluto ed etere	183
5.	Teoria della relatività speciale	189
5.1.	Il punto della situazione in fisica agli inizi del Novecento	189
5.2.	La teoria della relatività speciale	196
5.3.	Il risultato matematico: le trasformazioni di Lorentz	200
5.4.	Conseguenze delle trasformazioni di Lorentz	204
5.5.	Lo spazio-tempo	213
5.6.	La velocità della luce nel vuoto: è veramente la massima possibile, ma non raggiungibile, per un corpo di massa diversa da zero?	224
5.7.	$E = mc^2$	226
5.8.	Nota conclusiva sulla relatività speciale	229
	Percorso storico-filosofico 6. Tempo assoluto, tempo relativo, tempo soggettivo	233
6.	Teoria della relatività generale	237
6.1.	Introduzione	237
6.2.	Struttura dell'articolo originale di Einstein del 1916	238
6.3.	La gravità e altri problemi della meccanica classica	241
6.4.	I due principi della relatività generale e il principio di Mach	245
6.5.	Un nuovo concetto: lo spazio-tempo curvo è reale	246
6.6.	Conseguenze delle equazioni del campo di Einstein	250

6.7.	L'ultima previsione verificata: le onde gravitazionali	253
	Percorso storico-filosofico 7. Spazio e geometria	254
7.	Meccanica quantistica	259
7.1.	Introduzione	260
7.2.	I principi della meccanica quantistica	272
7.3.	Un esperimento famoso: le due fenditure	288
7.4.	Come si utilizza la funzione d'onda; il gatto di Schrödinger e il <i>tunneling</i> quantistico	302
7.5.	L'articolo di Einstein, Podolsky e Rosen: la meccanica quantistica è incompleta	313
7.6.	Le disuguaglianze di Bell	325
7.7.	La vita di un sistema quantistico interlacciato	333
7.8.	La non località oggi. Crittografia quantistica	336
7.9.	Il teorema di Noether	337
	Percorso storico-filosofico 8. Determinismo, caso, libero arbitrio: la discussione sulla fisica quantistica	339
	Percorso storico-filosofico 9. Atomi, particelle e onde: com'è fatta la materia	343
8.	Oggi	349
8.1.	Compendio	349
8.2.	I mattoni: il modello standard e la relatività generale	349
8.3.	Che cosa è la massa?	354
8.4.	Cosmologia. Il principio cosmologico	356
8.5.	Alcune delle domande a cui vorremmo rispondere	359
	Note	361
	Bibliografia	371
	Indice analitico	377

Prefazione

Il seme di questo libro fu lanciato la sera del 12 luglio 2007. In quel periodo la Sapienza era aperta anche in serata per concerti, incontri e manifestazioni varie. Io avevo organizzato dei caffè scientifici in cui due persone di estrazione culturale differente, tipicamente un fisico e un filosofo, discutevano su un tema a loro scelta. E il pubblico poteva intervenire. Io (fisico) scelsi di discutere insieme a Emidio Spinelli (filosofo) su questioni riguardanti l'etica e il libero arbitrio. Spinelli parlando di Hans Jonas e del principio di responsabilità, io di alcune caratteristiche della termodinamica e del determinismo. Serata bella e interessante, con tanti studenti che ascoltavano e facevano domande.

Ma c'era un problema: molti dei presenti erano studenti di Filosofia, preparati, intelligenti e dotati di un linguaggio appropriato, eppure da alcune domande e commenti si capiva che la maggior parte di loro non aveva la benché minima idea di cosa fosse la termodinamica, i suoi principi, le basi concettuali su cui si fondava. Questo mi preoccupava considerando anche che molti di loro avrebbero scelto l'indirizzo di Filosofia della scienza, bellissimo corso con docenti eccellenti. Ma come affrontarlo partendo da zero, senza avere alcuna nozione di fisica classica, relatività o meccanica quantistica? Perché era chiaro che, se avevano un problema con la termodinamica, a maggior ragione avrebbero avuto difficoltà con la cosiddetta "fisica moderna" (relatività e meccanica quantistica).

Tornato a casa cominciai a pensare alla questione. In fondo era naturale, cosa ci si poteva aspettare da una società in cui frasi come "Ah, io la matematica (la fisica) non l'ho mai capita" venivano accettate anche da persone di cultura? E con una scuola in cui l'insegnamento delle materie scientifiche troppo spesso era limitato a nozioni, formule, studiate su volumi di centinaia e centinaia di pagine, con programmi sconfinati e un numero limitato di ore a disposizione?

Questa situazione non mi piaceva. E, non essendo io il ministro della Pubblica istruzione e dell'Università (allora si chiamava così), decisi che l'unica cosa che si poteva fare era di provare a intervenire sugli studenti di Filosofia della Sapienza.

Come? Ma era ovvio, provando a dare loro le nozioni di cui erano sprovvisti facendo un corso di Fisica per filosofi. Su tutta la fisica? Studiando su quali testi? Con quale formalismo? L'idea fu di fare un corso limitato ai principi della fisica, le affermazioni fondamentali che stanno alla base di tutta la costruzione scientifica. Con un minimo di formalismo matematico (fortunatamente i principi si leggono, non vanno dimostrati).

Decisi di andare a trovare il presidente del corso di laurea in Filosofia, Carlo Cellucci, di cui nel 1979 avevo seguito, per puro piacere, le lezioni su *Caso e necessità* di Jacques Monod. A questo punto potete immaginare quale fu la sua reazione: fu d'accordo e credo di dovere a lui se poi l'istituzione del nuovo corso (di Fisica, tenuto da un fisico a Filosofia!) fu accettata dal Consiglio di corso di laurea in Filosofia. Nell'anno accademico 2008-09 si partì, all'inizio con una ventina di studenti, che scesero subito a una decina dopo aver capito che non si trattava di lezioni di Filosofia della scienza, ma che si parlava proprio di fisica. Il corso, tuttavia, cominciò a piacere e negli ultimi anni siamo arrivati a un numero variabile fra gli 80 e i 120 studenti l'anno (gli ordinamenti cambiano annualmente, sono i misteri della Sapienza).

Ma c'era sempre il problema dell'assenza di testi. Venivano in aiuto agli studenti le dispense che avevo scritto e i video del corso di Relatività e Meccanica quantistica che proposi nel 2014 per la piattaforma on line Coursera, con 12 000 studenti di tutto il mondo.

Da quell'esperienza in rete imparai che, benché l'insegnamento fosse condotto in italiano con sottotitoli in inglese (la piattaforma Coursera ha sede in California), solo il 60% degli studenti era di lingua italiana, gli altri erano stranieri. E scoprii anche (dalle centinaia di e-mail a cui risposi per dubbi, consigli e commenti) che a seguire erano studenti universitari, persone comuni, studenti singoli, docenti italiani di Matematica e Fisica, alcuni insieme a intere classi. Insomma, la cosa interessava e piaceva. Quindi, cominciai ad accarezzare l'idea di farne un libro da rendere disponibile a molte più persone di quelle che seguivano le lezioni.

Questo che avete in mano non è altro che il volume scritto a partire dalle note del corso. Ma non solo. Una volta iniziato a mettere insieme il materiale mi resi conto che in fondo era diretto *in primis* agli studenti di

Filosofia e che, dunque, non sarebbe stato male inserire alcune parti *filosofiche* che, per alcuni degli argomenti più importanti, raccontasse cosa dicevano in quel momento i filosofi.

Qui entrò in gioco Paolo Pecere che si dichiarò entusiasta della proposta e che ha scritto tutte le sezioni filosofiche di questo lavoro.

A questo punto in genere nelle prefazioni si scrive qualcosa del tipo “Ringrazio tutti coloro hanno letto e riletto le bozze del libro, ogni errore è dovuto solo all’autore e sarò grato a chi mi vorrà segnalare eventuali sviste, imprecisioni, omissioni” e così via.

In questo caso la situazione è diversa. A parte il naturale ringraziamento dovuto a tutti coloro che hanno accettato di leggere il manoscritto segnalando errori e/o modifiche; primi fra tutti Paolo Pecere, che ha letto con attenzione e sufficiente distacco quanto avevo scritto, e Gianluca Mori di Carocci, che mi ha guidato nella stesura dal punto di vista del lettore. Il testo avrà sicuramente errori o imprecisioni, e questo credo sia scontato per una prima edizione; inoltre, ogni volta che lo rileggo vorrei cambiare qualcosa, vorrei riscrivere completamente alcuni paragrafi che mi sembrano oscuri o poco chiari, e spesso l’ho fatto. Ma prima o poi il lavoro definitivo va consegnato, quindi alla fine si decide di chiudere e quello che avete fra le mani ne è il risultato. Mi auguro che questo libro possa essere letto da molte persone di estrazione differente, che mi vengano fatte osservazioni, commenti e segnalazioni, di cui tener conto nelle future edizioni per migliorarlo.

Roma, 31 gennaio 2021

Elenco delle grandezze e dei simboli

A destra sono indicate le grandezze a cui corrispondono i simboli scritti a sinistra. Alcuni simboli hanno più corrispondenze e significati diversi a seconda del contesto in cui vengono usati.

Viene anche indicato il rimando alla pagina in cui la grandezza viene nominata/definita per la prima volta o con significati diversi a seconda delle varie sezioni: meccanica classica, termodinamica, relatività speciale, relatività generale, meccanica quantistica, cosmologia.

<i>Simbolo</i>	<i>Nome, pagina</i>
<i>a</i>	Accelerazione, cfr. p. 46
<i>B</i>	Campo magnetico (induzione magnetica), cfr. p. 164
<i>c</i>	Velocità della luce nel vuoto, cfr. p. 170 (elettromagnetismo); p. 198 (relatività speciale)
CDM	<i>Cold Dark Matter</i> (“materia oscura fredda”), cfr. p. 359
<i>ds</i>	Distanza spazio-temporale (Minkowski, spazio-tempo), cfr. p. 216
<i>E</i>	Campo elettrico, cfr. pp. 153, 163
<i>E</i>	Energia, cfr. p. 83 (meccanica classica); pp. 109, 116 (termodinamica); p. 226 (relatività speciale)
EPR	Einstein, Podolsky, Rosen (esperimento mentale), cfr. p. 313
<i>F</i>	Forza, cfr. pp. 28, 56 (meccanica classica)
<i>f</i>	Frequenza di un’onda, di un fenomeno periodico, cfr. p. 176
<i>fem</i>	Forza elettromotrice, cfr. p. 195
<i>g</i>	Accelerazione di gravità, p. 80
<i>g</i>	Gluone, cfr. p. 355
<i>g</i>	Fattore g, rapporto (momento magnetico/momento angolare), cfr. p. 354
<i>G</i>	Costante di gravitazione universale, cfr. pp. 53, 78
<i>h, ħ</i>	Planck, costante; $\hbar = h/2\pi$, cfr. p. 264
<i>i</i>	Corrente elettrica, cfr. p. 164
<i>I</i>	Informazione, quantità di, cfr. p. 140
<i>I</i>	Intensità della luce, cfr. p. 291
<i>J</i>	Densità di corrente elettrica, cfr. p. 170
<i>k</i>	Numero d’onda, $k = 2\pi/\lambda$, p. 176
<i>k, k₀</i>	Costante nella legge di Coulomb, nei materiali, pp. 153, 155; nel vuoto, cfr. p. 365
<i>k_B</i>	Boltzmann, costante di, cfr. p. 106

L	Lavoro, cfr. pp. 85, 112
L	Momento angolare, p. 268
L_0	Lunghezza a riposo, cfr. p. 208
m, m_p, m_G	Massa, massa inerziale, massa gravitazionale, cfr. pp. 67, 81, 242
n	Indice di rifrazione di un mezzo, cfr. p. 173
$O; x, y, z, t$	Origine; coordinate spaziali e temporali di un sistema di riferimento, cfr. p. 40
p	Pressione, cfr. p. 107
p	Quantità di moto, cfr. p. 69
$P(E)$	Probabilità associata ad un evento E , cfr. p. 129
Q	Quantità di calore scambiata, cfr. p. 111
Q, q	Carica elettrica, cfr. p. 154
QFT	<i>Quantum Field Theory</i> ("teoria quantistica dei campi"), cfr. p. 353
R	Costante universale dei gas, cfr. p. 108
R	Distanza fra due corpi, raggio, cfr. p. 58
R	Resistenza elettrica, cfr. p. 195
r_s	Schwarzschild, raggio, cfr. p. 251
S	Entropia, cfr. pp. 122, 124
s	Spazio, cfr. pp. 27, 37 (meccanica classica); pp. 204-13 (relatività speciale); p. 239 (relatività generale)
S	Superficie, cfr. p. 107
T	Periodo di un'onda, cfr. p. 175
T	Temperatura, cfr. p. 104
t	Tempo, cfr. pp. 27, 37 (meccanica classica); pp. 201, 209 (relatività speciale); pp. 246, 250 (relatività generale)
U	Energia interna, cfr. p. 110
u	Unità di misura, cfr. p. 42
UTC	<i>Coordinated Universal Time</i> (tempo universale), cfr. p. 254
V	Volume, cfr. p. 107
V, v	Velocità, cfr. p. 55 (meccanica classica); p. 205 (relatività speciale)
$W(A)$	Molteplicità della configurazione A , cfr. p. 130
γ	Fattore relativistico, cfr. p. 202
ϵ_0	Costante dielettrica del vuoto, cfr. pp. 171, 365
ϵ_r	Costante dielettrica relativa, cfr. p. 365
η	Rendimento (di un ciclo termodinamico), cfr. p. 119
Λ	Costante cosmologica, cfr. p. 359
μ_0	Permeabilità magnetica del vuoto, cfr. p. 164
μ_r	Permeabilità magnetica relativa, cfr. p. 366
τ_0	Durata a riposo (di un evento), cfr. p. 209
φ	Fase (di un'onda), cfr. p. 177
$\Phi(B)$	Flusso del campo B , cfr. p. 195
$\psi, \psi(r, t)$	Funzione d'onda, cfr. p. 274
ω	Pulsazione di un'onda, cfr. p. 176
ρ	Densità, densità di massa (per unità di volume), cfr. p. 25
ρ	Resistività elettrica, cfr. p. 168
ρ_c	Densità di carica elettrica (per unità di volume), cfr. p. 170

Simboli matematici

$E \pm n$	Equivale a: $10^{\pm n}$
$\stackrel{\text{def}}{=}$	Definizione (a destra) del simbolo che sta a sinistra dell'uguale
$dg(x)/dx$	Derivata della grandezza g rispetto alla grandezza x , cfr. p. 46
$\partial f/\partial x$	Derivata parziale della grandezza $f(x)$ rispetto alla grandezza x
Δ	Variazione di una grandezza, cfr. p. 44; incertezza di una misura, cfr. p. 35 (generale); p. 285 (meccanica quantistica)
\ln	Logaritmo naturale, cfr. p. 128
\log_2	Logaritmo in base 2, cfr. p. 141
Σ	Somma di tanti termini, cfr. p. 47
\cong, \approx	Circa uguale a
\neq	Diverso da
\oplus	Somma non aritmetica, cfr. p. 207
\propto	Proporzionale a
\sim, \approx	Approssimativamente uguale a
\cdot	Prodotto, prodotto scalare (fra vettori), cfr. pp. 160-1
\times	Prodotto vettoriale (fra vettori), cfr. pp. 160-1
$A \equiv B$	A coincide con B, cfr. p. 43
$\langle g \rangle$	Valore medio della grandezza g , cfr. p. 45
$\int_a^b f(t)dt$	Integrale della funzione $f(t)$ calcolato fra $t = a$ e $t = b$
$\oint f(x)dx$	Integrale di linea della funzione $f(x)$ lungo una linea chiusa
$\bar{\nabla} \cdot \bar{A}$	Divergenza del vettore \bar{A}
$\bar{\nabla} \times \bar{A}$	Rotore del vettore \bar{A}

Introduzione

I principi della fisica

La fisica non è semplice, è inutile fingere che non sia così: la descrizione delle teorie, specie per quel che riguarda la fisica del xx secolo, utilizza spesso formalismi molto complessi. E anche avendo compreso il formalismo matematico, spesso è complicato capirne il significato. Eppure, conoscere la migliore descrizione che oggi possiamo avere del mondo che ci circonda è affascinante, è qualcosa di cui non potremmo fare a meno.

In questo libro ci siamo proposti di presentare i principi e alcune delle leggi fondamentali della fisica che rappresentano una selezione abbastanza ristretta di *tutta* la fisica, per cui non basterebbero centinaia e centinaia di pagine e che richiederebbe l'utilizzo di formalismi avanzati.

Abbiamo scelto di parlare quasi esclusivamente dei principi della fisica per due ragioni. La prima è dovuta al fatto che un *principio*, nell'ambito delle scienze sperimentali, non è nient'altro che un'affermazione su un aspetto molto generale della natura. Ci ritorneremo, ma una buona definizione del termine "principio" è questa:

Un principio è una proposizione assunta come vera, non ricavata da altre proposizioni.

Sembra complicato, ma in realtà vuole solo dire che non stiamo parlando di un teorema. Un teorema deve essere dimostrato – in base a delle premesse – ed è logicamente vero. Un principio è l'espressione formale – quindi scritta in linguaggio scientifico – di un'osservazione riportata a regola universale. Se lo negassimo non avremmo nulla di contraddittorio *dal punto di vista della logica*. Un principio sta a capo di una teoria e non è ricavato da altre proposizioni (come nel caso di un teorema). Potrebbe dunque essere diverso? Certo, un principio

sarà vero fin quando non si dimostrerà, con l'esperienza, che è falso o che la teoria derivata dal principio porta a delle osservazioni contraddittorie. E allora verrà sostituito da un altro principio o cancellato definitivamente.

Facciamo un esempio. Nel mondo classico Aristotele affermava l'esistenza di una relazione di proporzionalità fra la velocità di un corpo e la forza a cui era sottoposto. Era sensata? Sì, poteva benissimo essere vera, solo che era sbagliata: misure e considerazioni accurate avrebbero mostrato che non era così. Ma ci sono voluti circa diciannove secoli per arrivare a una formulazione corretta del fenomeno. Nel 1687 Isaac Newton disse: la relazione di proporzionalità è fra l'*accelerazione* di un corpo e la forza impressa, e la proporzionalità è attraverso la massa. È il secondo principio della dinamica, espresso dalla formula che (quasi) tutti hanno trovato sui libri di scuola:

$$F = m \cdot a$$

È vera? Per l'epoca di Newton sì. Veniva confermata dai dati sperimentali, era un'ottima inferenza di una legge generale da alcuni dati sperimentali. Ma supponiamo che avessimo deciso che la relazione dovesse essere:

$$F = \sqrt{m} \cdot a$$

In essa abbiamo sempre una relazione di proporzionalità fra forza e accelerazione, solo che è attraverso la radice quadrata della massa. Ma non c'è nulla di logicamente sbagliato, potrebbe anche essere vera. In questo caso la relazione $F = \sqrt{m} \cdot a$ sarebbe stata altrettanto logicamente giustificata e accettabile della $F = m \cdot a$; e servono degli esperimenti e delle misure per mostrare che non è corretta. Ma anche la relazione $F = m \cdot a$ si dimostrerà non corretta, nel senso di non avere validità universale. Albert Einstein nel 1905 con la sua relatività speciale mostrerà come andrà scritta, modificandola. E nel 1927 Erwin Schrödinger la sostituirà addirittura con un'altra formula, nell'ambito della meccanica quantistica. Questa nuova formula non solo sarà differente formalmente, ma avrà anche un significato del tutto diverso.

La cosa essenziale è che i principi sono, quasi sempre, molto semplici. Non essendo dei teoremi non necessitano di dimostrazioni, possiamo parlarne senza riempire pagine e pagine di calcoli complessi, ciò che importa è capire il significato nascosto dentro le formule.

La seconda ragione per cui abbiamo deciso di discutere i principi della fisica è che essi rappresentano veramente i fondamenti della nostra conoscenza; non sono tanti, ma ciascuno ha significati molto profondi che ci aiutano nel farci un'immagine complessiva della teoria fisica a cui si riferiscono.

Di approcci possibili per trattare questa materia ce ne sono vari: da quello storico a quello che punta sugli sviluppi tecnologici, o sulle interpretazioni fisiche e/o filosofiche delle varie parti della fisica, a quello esclusivamente sperimentale. Abbiamo scelto quello che dal nostro punto di vista è il più semplice e anche il più sensato per un lettore con differenti provenienze e necessità: dagli studenti di facoltà non scientifiche (sebbene potrebbe forse essere utile anche a uno studente più esperto), a insegnanti e allievi delle scuole superiori che sovente hanno a che fare con libri di centinaia di pagine in cui si riporta quasi tutto lo scibile umano (tanto vasti da rendere spesso difficile una visione generale della disciplina), a lettori semplicemente amanti della scienza che non possiedono il bagaglio matematico necessario per leggere i testi fondamentali ma cercano qualcosa di diverso rispetto agli innumerevoli e ottimi volumi divulgativi che non hanno alcuna parte formale.

L'approccio è quello utilizzato nel corso di Principi di fisica per filosofia tenuto alla Sapienza ed è essenzialmente uno sviluppo cronologico, che è sembrato il più semplice da trattare. L'ordine cronologico con cui sono state trattate le varie parti della fisica ha il vantaggio di introdurre termini, proprietà e concetti un poco per volta. Ogni capitolo utilizzerà quelli precedenti e ne introdurrà di nuovi. Talvolta anche negando o modificando idee e nozioni già espresse, ma mantenendo sempre come riferimento la costruzione di un sistema, per quanto possibile, coerente, completo, non contraddittorio, aderente alla realtà sperimentale.

La scelta di seguire lo sviluppo cronologico non implica il parlare, per esempio, della termodinamica come se ne parlava nel XIX secolo. Quando ce ne occuperemo introdurremo anche concetti sviluppati nel XX secolo (come la teoria dell'informazione).

L'esposizione delle teorie fisiche, dopo un capitolo introduttivo su linguaggio, terminologia e definizioni della fisica, sarà divisa in sette capitoli; all'inizio di ogni capitolo troverete un riquadro in cui sono riassunti i principi e le leggi fondamentali relativi al capitolo:

1. la *meccanica*, dove si tratterà di corpi materiali (pochi per volta), forze e movimenti e dove verrà esposta la relatività galileiana;

2. la *termodinamica*, dove si vedrà come insiemi di numerosi corpi materiali si comportano secondo nuove leggi che spiegano i fenomeni termici; tratteremo della direzione del tempo e introdurremo l'informazione come grandezza termodinamica;
3. l'*elettromagnetismo*, dove si vedrà la necessità di introdurre una nuova grandezza, la carica elettrica; tratteremo di alcune leggi a essa collegate, di come alcune siano in contrasto con la relatività galileiana, e di come la luce non sia altro che la manifestazione di una carica elettrica che si muove variando la sua velocità;
4. la *relatività speciale*, dove l'analisi dettagliata di alcune incongruenze teoriche e sperimentali nell'elettrodinamica porteranno a una rivoluzione nei concetti di spazio e di tempo;
5. la *relatività generale*, dove l'analisi di un semplice esperimento mentale condotto in un ascensore porterà a modificare di nuovo i concetti di spazio e di tempo, di relatività e all'abbandono della legge di gravitazione universale di Newton, spesso utile, ma solo approssimativamente vera;
6. la *meccanica quantistica*, dove si scoprirà che alcuni esperimenti fatti su sistemi microscopici non possono essere spiegati da alcuna delle teorie precedenti e che, quindi, va creata una teoria nuova; si vedrà come questa teoria sia controintuitiva, ontologicamente spiazzante, disperatamente limitativa della nostra possibilità di conoscere il mondo esterno, ma maledettamente giusta e precisa in tutte le sue previsioni;
7. *oggi*, dove, per concludere con la massima brevità, si mostreranno alcuni grafici e tabelle relativi a quello che sappiamo attualmente del mondo microscopico e della nascita e dell'evoluzione del nostro universo su scala intergalattica. Concluderemo con alcuni dubbi e problemi che ancora adesso si incontrano per una descrizione coerente del nostro universo.

Tra questi capitoli si trovano i *Percorsi storico-filosofici*, scritti da Paolo Pecere, dedicati ai grandi scienziati, alle idee e alle discussioni che di volta in volta hanno fatto da sfondo alla formazione delle teorie fisiche.

A questo punto va detto tutto quello di cui non si parlerà. Non parleremo dei liquidi, dei fluidi reali e di tutti quei fenomeni che venivano chiamati semplicemente "caotici", ma che negli anni Settanta del secolo scorso vennero formalizzati da Edward Lorenz dando origine alle moderne teorie del caos. Si tratta di teorie che si applicano alla fisica di alcuni sistemi complessi, al moto delle nuvole, alle capriole di fuoco delle fiamme in un camino, agli attacchi epilettici, all'anoressia e alla bulimia, al battito del cuore in chi sta per avere un infarto, al comparto della finanza – forse –, a molti aspetti del mondo che c'è oltre la coper-

tina di questo libro. Come non parleremo della fisica della materia e di come oggi si possano progettare materiali con le caratteristiche fisico-chimiche volute. E non parleremo degli incredibili sviluppi che ha avuto la cosmologia nell'ultimo secolo. Sviluppi che hanno portato da un lato a chiarire una serie di dubbi che si avevano sull'origine e sull'evoluzione del nostro universo, ma che ci pongono anche nuove domande su misure parzialmente oscure o incomprensibili.

Concluderemo accennando ad alcuni aspetti ancora problematici nella descrizione che abbiamo appena fatto del mondo che ci circonda. Perché il fatto è che abbiamo una costruzione molto funzionale e complessa, il cosiddetto "modello standard", ma questo è ancora pieno di *dettagli* da chiarire, investigare e misurare. E anche la cosmologia ha alcuni *dettagli* di investigare. Dettagli? Sì, ma nel corso dei secoli sono stati sempre alcuni dettagli a far nascere le nuove teorie e a portare avanti la conoscenza. Quindi, non possiamo dire che tutto funziona e tutto va bene. Abbiamo dei problemi ma al momento non potrebbe andare meglio.

Buon divertimento.

CARLO COSMELLI

Sui Percorsi storico-filosofici

Storicamente la fisica è nata come parte della filosofia dedicata all'indagine sulle cause dei fenomeni naturali. La rivoluzione scientifica del XVII secolo fu al tempo stesso una rivoluzione filosofica: Galileo Galilei si intestava il titolo di filosofo, poiché pretendeva di stabilire una verità alternativa a quella della fisica aristotelica e dell'astronomia tolemaica, e ancora Newton dedicava il suo capolavoro, fin dal titolo, ai *Principi matematici della filosofia naturale* (1687). La separazione tra fisica e filosofia naturale è successiva, ed è dipesa dalla specializzazione della parte matematica e sperimentale della fisica e dalla conseguente separazione dei percorsi di studio, ma l'unità d'intenti è rimasta: fisica e filosofia sono entrambe forme di ricerca della conoscenza, fondate su argomenti logici ed esperienze. La riflessione sui concetti fondamentali della fisica chiama in causa inevitabilmente nozioni e argomenti della tradizione filosofica, a partire dallo stesso uso di termini carichi di teoria e di storia, come "natura", "fenomeno", "materia", "atomo", "oggetto", "principio", "assioma", "dimostrazione", "spiegazione".

Per dare conto di questa dimensione storica e filosofica della fisica, abbiamo scelto di inserire, in margine alla trattazione delle teorie fisiche,

diverse sezioni dedicate ai grandi scienziati, alle idee e alle discussioni che di volta in volta hanno fatto da sfondo alla formazione delle teorie fisiche. In queste sezioni si approfondisce il nesso storico e teorico tra fisica e filosofia, che nell'insegnamento scientifico è solitamente trascurato, analizzando di volta in volta concetti e problemi che hanno accompagnato lo sviluppo delle teorie fisiche, mostrandone il più ampio contesto e le relazioni con alcune indagini filosofiche tradizionali: l'idea di filosofia sperimentale e meccanicismo, i concetti di spazio e tempo e materia, di movimento relativo e assoluto, di gravità ed energia, il problema del determinismo.

Inserire questi percorsi in un'esposizione dei principi della fisica è un modo di rispondere a un'esigenza più volte affermata dopo la nascita della fisica classica. Alla fine del Settecento, un filosofo come Immanuel Kant dedicò un'intera opera a mostrare il nesso necessario tra la sua filosofia, di cui aveva gettato le basi nella *Critica della ragion pura* (1781), e la fisica di Newton. Il titolo dell'opera kantiana – *Principi metafisici della scienza della natura* (1786) – ricalcava volutamente quello dei *Principi matematici della filosofia naturale* newtoniani. Kant (2003, pp. 107, 123), infatti, sosteneva che i fisici non possono non far uso («sebbene inconsapevolmente») di principi filosofici per stabilire le proprie teorie e definire i propri oggetti: i soli dati empirici non bastano a fare una teoria, questa presuppone sempre delle premesse che sono poste a priori. Quando trascurano questa componente filosofica i fisici si limitano a «postulare» i principi, e in certi casi possono male intendere il significato e le implicazioni delle proprie stesse teorie matematiche, su cui d'altra parte sono la massima autorità. Kant, quindi, auspicava che una «mano più abile», tra i «fisici matematici», prendesse spunto dalla sua opera per integrare i trattati matematici con una parte filosofica.

Le cose andarono diversamente. Mentre i contenuti tecnici della fisica crescevano in quantità e complessità, la filosofia scomparve sempre di più dai trattati di fisica su cui si formarono generazioni di scienziati, tra Ottocento e Novecento. Eppure molti grandi fisici teorici, come Albert Einstein, Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg e Niels Bohr hanno sottolineato il bisogno di collegare le teorie fisiche con la filosofia. Einstein (1949, pp. 673-4, trad. mia) diede esplicitamente ragione a Kant, parlando della sua «grande scoperta» del valore costitutivo dei concetti per la definizione dell'oggettività: soltanto mediante la «totalità dei concetti e delle relazioni concettuali che sono pensate indipendentemente dall'esperienza» – scriveva Einstein – noi «pensiamo

fisicamente» e ci rappresentiamo un'oggettività. Procedere altrimenti sarebbe come «respirare nel vuoto». Einstein precisò di dissentire da Kant «solamente per il fatto che non concepiamo le “categorie” come inalterabili», ma come «libere convenzioni», storicamente mutevoli.

In realtà, lo stesso Kant aveva riconosciuto l'importanza del mutamento teorico in fisica, interessandosi sempre alle ultime frontiere della ricerca. Tuttavia, l'immagine secondo cui la scienza progredisce e così facendo lascia indietro la filosofia, che invece sarebbe incapace di progresso, si è imposta nella cultura successiva. Per alcuni fisici di oggi la filosofia è scientificamente inutile o peggio fuorviante. Per esempio Stephen Hawking, in una conferenza sulla fisica di oggi, ha dichiarato:

La filosofia è morta. I filosofi non si sono tenuti al passo con gli sviluppi della scienza, in particolare della fisica [...]. Gli scienziati sono diventati i portatori della torcia della scoperta nella nostra ricerca della conoscenza. [Nuove teorie] ci portano a una nuova e diversa immagine dell'universo e del nostro posto in esso (cit. in Warman, 2011, trad. mia).

Simili opinioni sono diffuse nella comunità scientifica e sono incoraggiate dall'assenza della filosofia nella formazione scientifica. Come abbiamo visto, tuttavia, la pensavano diversamente grandi scienziati che hanno rivoluzionato la fisica moderna, da Galilei a Keplero (Johannes Kepler), da Newton a Einstein, che davano grande importanza alle proprie conoscenze filosofiche e le usarono per creare le proprie teorie. Ieri come oggi, la filosofia può avere un ruolo considerevole nella ricerca scientifica: analizzare i principi e i concetti fondamentali delle teorie, individuarne gli eventuali aspetti problematici, immaginare ipotesi alternative sono attività tipicamente filosofiche, che servono a creare nuove teorie.

Ma la difficoltà della comunicazione interdisciplinare dipende anche dalla filosofia attuale. Qualche filosofo, di fronte alla separazione disciplinare dalla scienza, ha effettivamente reagito svalutando l'intero sapere scientifico, per rivendicare l'autonomia e, in certi casi, il primato della pura indagine filosofica. Henri Bergson, per esempio, sostenne contro Einstein che la fisica non poteva comprendere la dimensione soggettiva del tempo e dell'esperienza vissuta in genere. Martin Heidegger asserì addirittura che la scienza in generale “non pensa”, cioè è un ragionamento meccanico incapace di accedere ai propri presupposti, e difese la necessità di tornare a un pensiero filosofico indipendente dalla scienza e pertanto più profondo. In effetti, anche tra i filosofi che ritengono pos-

sibile e fruttuosa una collaborazione con la scienza, l'analisi filosofica tende a contestare la validità assoluta di quest'ultima, mostrando i limiti delle teorie attuali e sostenendo la possibilità di approfondire la nostra conoscenza, finanche di rivoluzionarla. Ma questo non deve costituire un ostacolo alla collaborazione tra scienziati e filosofi: riconoscere la rivedibilità delle teorie fisiche, che risulta dallo studio del loro susseguirsi nella storia, non indica una debolezza né contraddice l'idea di scienza. Al contrario, la scienza moderna nasce proprio in base all'assunto della *rivedibilità* e dell'*incertezza* delle conoscenze, conseguenza del fatto che si può dire "scientifica" soltanto un'affermazione che si sottopone a prove e si corrobora attraverso un processo pubblico, collettivo e possibilmente riproducibile. La scienza – come ha sottolineato di recente Carlo Rovelli (2014, pp. 225-30, cit. a p. 228) – «si nutre di una radicale mancanza di certezze», mentre la certezza assoluta appartiene piuttosto a certe forme di credenza religiosa. Le conoscenze fisiche accolte dalla comunità scientifica, in quanto sottoposte alle procedure sopra menzionate, devono essere senz'altro difese di fronte a chi le mette in dubbio senza opporre teorie altrettanto fondate e sperimentalmente controllabili, poiché rappresentano le migliori conoscenze disponibili nel presente. Ma la credenza di possedere una teoria infallibile, quando è fatta propria dai fisici, diventa un freno alla ricerca.

Ecco perché i *Percorsi storico-filosofici* sono anche approfondimenti su diversi momenti di svolta della storia della fisica. L'importanza della dimensione filosofica e storica per l'educazione scientifica fu riconosciuta in modo efficace da Einstein, che in una lettera all'insegnante Robert Thornton del 7 dicembre 1944 la presentò come un modo di sviluppare la mentalità autenticamente scientifica e favorire l'ampliamento della conoscenza:

Sono pienamente d'accordo con te sul significato e sul valore educativo della metodologia, così come della storia e della filosofia della scienza. Oggi molta gente – perfino scienziati professionisti – mi sembra come chi ha visto migliaia di alberi ma non ha mai visto una foresta. Una conoscenza dello sfondo storico e filosofico dà quel genere di indipendenza dai pregiudizi della propria generazione, di cui la maggioranza degli scienziati sta soffrendo. Questa indipendenza creata dallo sguardo filosofico – a mio parere – costituisce il tratto che distingue un mero artigiano o specialista dal vero ricercatore della verità².