

REIΦYCI

MODELLI TEORICI E COMPUTAZIONALI DI FISICA DELLA MATERIA

2

Direttore

Roberto ZIVIERI
Università degli Studi di Ferrara

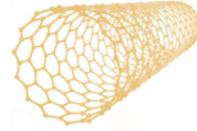
Comitato scientifico

Mario CARPENTIERI
Politecnico di Bari

Giancarlo CONSOLO
Università degli Studi di Messina

Giovanni FINOCCHIO
Università degli Studi di Messina

Eduardo Martinez VECINO
Universidad de Salamanca



Conoscere il comportamento di atomi e molecole permette la comprensione profonda della relazione fra materia, forza ed energia.

Roberto Zivieri

Negli ultimi decenni il settore scientifico della Fisica della materia è stato attraversato da una febbrile attività di ricerca, rivolta alla comprensione dei fenomeni fondamentali.

Molti dei risultati ottenuti, sia mediante formulazione di modelli teorici e computazionali, sia attraverso esperimenti, sono ancora in fase di conferma e di verifica. La descrizione dettagliata del formalismo matematico che sta alla base dei modelli formulati richiede ampi spazi di approfondimenti. Lo scopo principale della collana *ReiΦυσις* (dal latino *rei*, dativo di [res, rei], “cosa, materia” e dal greco *φυσις*, [physis], “fisica, natura”) è, pertanto, quello di raccogliere queste conoscenze e diffonderle ai lettori specialisti del settore, fornendo una panoramica il più possibile esauriente sulla stato dell’arte.

La collana accoglie studi, ricerche e scoperte rilevanti della Fisica della materia e trasmettere input e stimoli per l’ideazione e lo sviluppo di ricerche future, sia di settore che in campi affini o con esso interrelati. In *ReiΦυσις* saranno accolti anche volumi di carattere meno settoriale e specialistico, che risultino introduttivi per il lettore non specialista, dotato di una conoscenza base di Fisica generale propedeutica alla comprensione di tematiche più specialistiche di Fisica teorica della materia.

Ampio spazio è dedicato alle potenziali applicazioni tecnologiche che originano da questa branca della fisica, come le memorie magnetiche e i computer quantistici: non un mero completamento delle conoscenze scientifiche, ma esempi di sviluppo e progresso tecnologico che confluiscono e contribuiscono all’evoluzione della società stessa.



Vai al contenuto multimediale

Canio Noce

Introduzione alla Fisica moderna

Elementi di meccanica relativistica
e meccanica quantistica





Aracne editrice

www.aracneeditrice.it
info@aracneeditrice.it

Copyright © MMXVIII
Gioacchino Onorati editore S.r.l. – unipersonale

www.gioacchinoonoratieditore.it
info@gioacchinoonoratieditore.it

via Vittorio Veneto, 20
00020 Canterano (RM)
(06) 4551463

ISBN 978-88-255-1424-7

*I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica,
di riproduzione e di adattamento anche parziale,
con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i Paesi.*

*Non sono assolutamente consentite le fotocopie
senza il permesso scritto dell'Editore.*

I edizione: aprile 2018

a Giuseppe

Ce qui est caché par des arbres est, ici, visible et,
la queue du cheval, elle, demeure cachée
par un arbre,
afin de donner du phénomène une description
moins systématique.

R. MAGRITTE

Indice

- 15 *Premessa*
- 17 *Introduzione*
- 23 *Capitolo I*
La meccanica o le meccaniche?
- 29 *Capitolo II*
I principi della meccanica
- 35 *Capitolo III*
Le trasformazioni di Galileo
- 39 *Capitolo IV*
L'esperimento di Michelson & Morley
- 43 *Capitolo V*
Le trasformazioni di Lorentz
- 47 *Capitolo VI*
Trasformazioni di Lorentz: applicazioni
- 53 *Capitolo VII*
Geometria analitica e spazio-tempo
- 59 *Capitolo VIII*
La fisica dei quanti: nascita della teoria
- 61 *Capitolo IX*
L'esperienza di Thomson
- 65 *Capitolo X*
L'esperimento di Millikan

- 69 Capitolo XI
 Il modello atomico di Rutherford
- 73 Capitolo XII
 La spettroscopia e il modello di Bohr
- 77 Capitolo XIII
 L'esperienza di Franck e Hertz
- 79 Capitolo XIV
 L'effetto fotoelettrico
- 83 Capitolo XV
 Sull'origine dei raggi X
- 87 Capitolo XVI
 L'effetto Compton
- 91 Capitolo XVII
 Diffrazione da radiazione e da particelle
- 95 Capitolo XVIII
 Il corpo nero: alcune considerazioni
- 101 Capitolo XIX
 Dualismo onda–corpuscolo
- 105 Capitolo XX
 L'esperimento della doppia fenditura
- 109 Capitolo XXI
 Concetti base della meccanica quantistica
- 113 Capitolo XXII
 L'equazione di Schrödinger
- 115 Capitolo XXIII
 Soluzione dell'equazione di Schrödinger
- 119 Capitolo XXIV
 Sorprese quantistiche: l'effetto tunnel

125	<i>Conclusioni</i>
127	<i>Problemi</i>
133	<i>Appendice 1</i>
137	<i>Appendice 2</i>
147	<i>Appendice 3</i>
149	<i>Appendice 4</i>
151	<i>Appendice 5</i>
153	<i>Bibliografia</i>

Premessa

Il presente testo, dedicato all'introduzione alla fisica moderna, si prefigge lo scopo di introdurre in modo quantitativo, sebbene sommario e necessariamente schematico, gli aspetti principali della relatività ristretta, della fisica atomica e della meccanica quantistica.

I libri di testo disponibili sul mercato presentano i macro argomenti prima citati o solo a livello introduttivo/descrittivo oppure tendono a privilegiare un approccio analitico, ponendo l'accento su aspetti tecnici assai complessi. Dal punto di vista meramente metodologico questi orientamenti pongono alcuni problemi. Infatti, accertata la necessità di presentare insieme i predetti argomenti, è altresì chiara la necessità che questa presentazione unitaria sia corredata da strumenti matematici sufficienti per un'adeguata comprensione dei contenuti e delle conseguenze della fisica moderna.

Inoltre, trattandosi di un testo introduttivo, rimane inevitabile il vincolo sulle sue dimensioni e sui suoi prerequisiti. Questa condizione ha naturalmente imposto una selezione e presentazione degli argomenti, conducendo alla scelta di quelli più qualificati dal punto di vista del rapporto contenuto fisico/formalismo. Per esempio, per la relatività speciale abbiamo rinunciato alla trattazione tensoriale, limitando l'analisi agli aspetti concettuali e geometrici. Per quel che riguarda la meccanica quantistica, dopo aver introdotto l'equazione di Schrödinger e la natura della funzione d'onda con le naturali implicazioni a livello di principio di indeterminazione, abbiamo preferito analizzare alcuni esempi specifici, rilevanti ai fini della comprensione dei concetti alla base della fisica dei quanti, chiarendo l'origine dei livelli energetici discreti senza rinunciare all'esame dell'effetto tunnel.

L'obiettivo di creare un testo introduttivo, ha, inoltre, richiesto l'inclusione di una raccolta di esercizi rilevanti, riconducibili ai singoli capitoli del testo. Gli esercizi proposti consentono, a nostro parere, di verificare gli aspetti tecnici più rilevanti della teoria, pur presentandosi non banali.

Passando all'organizzazione del libro, quattro capitoli sono dedicati alla relatività ristretta, contenenti rispettivamente l'esperimento di Michelson e Morley, le trasformazioni di Lorentz e applicazioni e la formulazione geometrica dello spazio-tempo. Gli esperimenti che hanno portato alla nascita della teoria dei quanti, descritti in dieci capitoli, precedono quattro capitoli nei quali s'introduce l'equazione di Schrödinger e si discutono la soluzione di detta equazione per una barriera infinita di potenziale e l'effetto tunnel.

Larga parte di questo manuale è il frutto di lezioni da me tenute negli ultimi anni agli studenti del corso di istituzioni di fisica teorica e a docenti e futuri docenti della scuola secondaria di secondo grado. Per questi ultimi, le attività svolte si proponevano di discutere e analizzare i motivi per i quali la fisica moderna è, generalmente, considerata una disciplina di difficile trattazione nelle scuole superiori, complicata e faticosa da comprendere e, poi, come definire appropriate modalità di insegnamento che potessero avvicinare i giovani studenti ad uno studio attento e interessato per quest'ambito della fisica e, nel contempo, fornire ai docenti del materiale per stimolare corrette motivazioni e passione per la fisica moderna.

Ringrazio, tutti gli studenti del terzo anno del corso di laurea in fisica dell'Università degli Studi di Salerno, i giovani docenti del Tirocinio Formativo Attivo e i docenti dei Percorsi Abilitanti Speciali che, svolgendo il ruolo di primi utilizzatori di queste note, mi hanno fornito sagge considerazioni e argute indicazioni per la compilazione e la presentazione più adeguata del materiale di seguito riportato.

Ringrazio, altresì, il dott. Giuseppe Cuono che, leggendo attentamente il manuale, mi ha fornito preziosi consigli e suggerito importanti correzioni e Arturo Adesso per la realizzazione delle figure riportate nel libro.

Introduzione

Nell'immaginario collettivo quando si pensa alla fisica, solitamente, si fa riferimento alle grandi sfide legate allo studio dell'infinitamente piccolo: LHC, neutrini, particella di Dio, onde gravitazionali. . . sono termini che evocano e che definiscono, per la gente comune, la fisica. In molti altri casi, la fisica è concepita come la disciplina che studia essenzialmente il mondo sub-nucleare. In realtà anche l'infinitamente grande attrae in maniera particolare l'attenzione delle persone comuni, per cui lo studio dei pianeti, del sistema solare, delle galassie rappresenta un altro modo di intendere la fisica. In sintesi, per la maggioranza delle persone, il fisico studia e svolge attività di ricerca o sull'infinitamente grande oppure sull'infinitamente piccolo, senza mezze misure! Come dimostreremo tra breve, questa visione che fa parte dell'immaginario collettivo è riduttiva e semplicistica. La fisica è altresì associata, fisiologicamente, a ricercatori che vivono la loro condizione di ricerca in un mondo tutto loro, nel quale è impossibile penetrare se non si è addetti ai lavori. Il linguaggio di queste persone è patrimonio di un ristretto gruppo di "fortunati" che il resto del mondo non può comprendere. Esempi notevoli di questa visione possono essere considerati Galileo, Newton, Einstein, Fermi, Rubbia.

Naturalmente, tutto ciò è limitativo e non confacente a quello che è il ruolo effettivo e l'importanza della fisica. Possiamo, infatti, senza dubbio alcuno affermare che la fisica ha uno scopo molto ambizioso e senza fine, proponendosi di capire come è fatto e come funziona l'universo. Ciò implica che è oggetto della fisica tutto ciò che ci circonda, dall'infinitamente piccolo all'infinitamente grande. Non è, quindi, compito dei fisici costruire case, aerei, elettrodomestici e nemmeno curare malattie. Però, si può affermare, senza tema di smentita, che architetti, ingegneri, biologi e medici, tutti fanno uso continuo delle leggi e delle scoperte della fisica. Infatti, senza le idee prodotte dai fisici il livello della nostra società sarebbe primitivo: niente aerei, televisori, frigoriferi, centrali elettriche, laser, computer, tac, radiografie, risonanze magnetiche; la nostra vita si sarebbe arrestata agli standard della famiglia Flinstone della serie TV a cartoni animati!

Ciò detto, vediamo ora come studiare la fisica.

Galileo affermava che

l'universo non si può intendere se prima non si impari la lingua sulla quale esso è scritto; egli è scritto in lingua matematica.

Per comprendere la valenza di quest'affermazione è utile far riferimento a una famosa lettera che Galileo scrisse a Fortunio Liceti. Questi si auto-dichiarava scienziato e medico, anche se nell'Enciclopedia Treccani è classificato come filosofo e medico. Per cogliere appieno questa differenza, ossia il ritenersi scienziato piuttosto che filosofo, riportiamo alcuni stralci della missiva. La lettera fu scritta da Galileo in Arcetri nel gennaio del 1641 e inviata a Liceti che all'epoca viveva a Bologna. Galileo scrive:

Però quanto a questo capo, Eccel.mo mio Signore, può, per mia oppinione, ritrarsi dal volere, o con testi o con autorità d'Aristotele, cercare di persuadere dottrina troppo manifestamente falsa: e per intendere e farsi possessore della scienza astronomica bisogna studiare altri che Aristotele, dalli scritti del quale non si comprende che egli ne possedesse niente più di quello che ne intenda ogni ben semplice huomo.

Questo passaggio della lettera è veramente importante perché ad Aristotele è attribuito il giusto ruolo. Infatti, se si fa riferimento alla "scienza astronomica", Aristotele non è dissimile dalla gente comune, con convinzioni e opinioni che nulla hanno a che vedere con la scienza. Pertanto, sebbene in ambito filosofico Aristotele debba essere ritenuto a giusta ragione un gigante, per ciò che concerne l'ambito scientifico egli può ritenersi membro di diritto della cerchia della gente comune. Questo concetto è espresso dettagliatamente nell'ultima parte della lettera:

Ma di questo non è tempo di discorrerne a lungo al presente; concluderò solamente, che havendo V.S. Eccel.ma per suo scopo il voler mantenere per vero ogni detto di Aristotele, e sostenere che le esperienze non mostrino cosa alcuna che ad Aristotele sia stata incognita, ella fa quello che molti altri Peripatetici insieme forse far non potrebbero; e quando la filosofia fosse quella che ne i libri di Aristotele è contenuta, V.S. per mio parere sarebbe il maggior filosofo del mondo, tanto mi par che ella habbia alle mani et in pronto tutti i luoghi di quello.

Dopo quest'affermazione Galileo conclude:

Ma io veramente stimo, il libro della filosofia esser quello che perpetuamente ci sta aperto innanzi a gli occhi; ma perché è scritto in caratteri diversi da quelli del nostro alfabeto, non può esser da tutti letto: e sono i caratteri di tal libro triangoli, quadrati, cerchi, sfere, con, piramidi et altre figure matematiche, atissime per tal lettura.

La natura è dunque scritta tramite un alfabeto matematico, per cui i segreti che essa nasconde possono essere penetrati da chi ne conosce il linguaggio. Appare, dunque, rilevante impossessarsi dell'alfabeto opportuno. Tutto ciò non è patrimonio universale e della semplice gente¹.

1. Per onestà intellettuale, è opportuno notare che Aristotele stesso riteneva che la matematica rappresentasse il giusto mezzo per indagare l'universo. Il suo approccio allo studio del mondo era però assolutamente assiomatico senza mediazione della matematica.

A questo punto, può sembrare che la matematica rappresenti la *condicio sine qua non* indagare il mondo. Non è proprio così; o meglio è parzialmente vero. Per chiarire la distinzione tra la matematica in quanto tale e la matematica come linguaggio della natura, è utile far riferimento alla seguente frase del fisico P.M.A. Dirac:

La matematica è solo uno strumento, ed è bene imparare a impadronirsi delle idee fisiche senza far riferimento alla forma matematica.

Questa affermazione in pratica stabilisce che per un fisico la matematica è un mezzo, lo strumento di indagine, e non già il fine, che invece è la prerogativa e il ruolo del matematico.

Stabilito lo strumento, una domanda sorge ora spontanea: perché studiare fisica? A questa domanda proverò a rispondere utilizzando due frasi di eminenti scienziati. Cercherò dapprima di spiegare perché è utile e piacevole studiare le scienze in generale, per poi focalizzare la risposta alla fisica in particolare. H. Poincaré affermava che:

Uno scienziato degno di questo nome prova lavorando la stessa impressione di un artista; la gioia che gli dà il suo lavoro è altrettanto grande e della medesima natura.

Allora, a prescindere dalla disciplina scientifica, sia essa fisica, biologia, chimica, il ricercatore è equiparato ad un artista che è artefice del proprio lavoro, prova gioia e piacere in quello che fa, e si compiace dei risultati ottenuti. Per capire invece la motivazione che porta allo studio della fisica, riporto qui una frase del fisico S. Weinberg:

Una delle più tenaci speranze dell'uomo è quella di scoprire poche e semplici leggi generali che possano spiegare la varietà e complessità della natura, così come essa ci appare e, se possibile, che possano farci comprendere perché le cose, attorno e dentro a noi, sono fatte così.

È qui evidente, ancora una volta, una finalità estetica ossia ridurre a poche leggi generali la descrizione della natura, unitamente ad un progetto naturalmente ambizioso. Ridurre a poche relazioni semplici il comportamento di tutto ciò che ci circonda non è semplice ma è la finalità ultima di ogni fisico. Per esempio, Maxwell è riuscito a riassumere in quattro equazioni la descrizione di tutti i fenomeni di natura elettrica, magnetica ed elettromagnetica. Le predette equazioni sono, infatti, in grado di descrivere il comportamento delle cariche elettriche in quiete o in moto (correnti elettriche), ma anche di spiegare la propagazione e il comportamento delle onde elettromagnetiche che sono alla base di tutte le strumentazioni elettroniche che ci circondano. Questo programma così ambizioso è ancora incompleto e, certamente,

rappresenta una sfida della ricerca in fisica dei prossimi anni. La difficoltà di completare il progetto consiste nel fatto che lo studio dei fenomeni naturali avviene su tutte le scale, dalle dimensioni subatomiche alle galassie. Questa complessità di fenomenologia rappresenta la difficoltà principale verso l'unificazione delle leggi. Naturalmente, il banco di prova di ogni approccio consiste nella verifica delle conseguenze delle relazioni ricavate. Infatti, i fenomeni cui ci riferiamo sono tutti descritti da grandezze fisiche misurabili. La determinazione delle leggi è quindi un processo che procede per retroazioni successive perché non sono note le regole del gioco della natura, dobbiamo intuirle osservando ciò che ci circonda. Questo processo che apparentemente sembrerebbe limitare la portata culturale della ricerca in generale e della fisica in particolare, in realtà rappresenta la ricchezza dello studio scientifico. Infatti, il processo che prende le mosse da quanto sopra definito *retroazioni per passi successivi* può essere visto, equivalentemente, come un processo senza fine al quale tutti possono partecipare e contribuire. La ricerca non ha e non può avere fine: nuovi orizzonti, nuove prospettive, nuove teorie, nuovi fatti da spiegare si aprono in continuazione nel mondo della fisica, conducendoci alla consapevolezza di poter contribuire a questa sfida.

La ricerca scientifica mette continuamente in luce fenomeni nuovi e inattesi. Ciò accade perché la comunità scientifica prende coscienza di un'anomalia, di un problema che sfida gli assunti centrali del paradigma e che costringe la comunità degli scienziati a sostituire il vecchio paradigma con un altro. Gli scienziati, di fronte alla massa di rompicapo che non riescono a risolvere con l'applicazione di quel paradigma, mettono in dubbio i principi fino a quel momento seguiti e accettati come "dogmi", e vanno alla ricerca di un paradigma nuovo. Non può esserci confronto tra i due paradigmi, perché, secondo il quadro teorico, muta il significato attribuito alle osservazioni empiriche e agli esperimenti che dovrebbero confermare o falsificare il modello in questione. I tempi di una rivoluzione possono anche essere lunghissimi, ma quando essa avviene, è come se si entrasse in un nuovo mondo. Occorre riformulare tutto: concetti-base, metodi, problemi. Il passaggio da un paradigma all'altro segna, altresì, una trasformazione del modo di vedere le cose. I dati che si hanno a disposizione sono magari gli stessi di prima, eppure sono interpretati in modo diverso, cioè sono posti in una relazione diversa da quella precedente. Il nuovo paradigma affermatosi viene progressivamente esteso a ogni disciplina e ad ogni campo del sapere, determinando un nuovo periodo di "scienza normale": fino al momento in cui anche tale paradigma genererà anomalie e rompicapi, e solleciterà la sua sostituzione. Il passaggio dalla fisica classica alla fisica moderna (relativistica, quantistica e/o quantistica relativistica) avviene nello scenario ora rappresentato.

In queste note descriveremo alcuni elementi di fisica moderna, concentrandoci sugli aspetti concettuali e paradigmatici, in una descrizione