

# Gli Autori

## Richard Feynman

Richard P. Feynman è nato nel 1918 a New York e ha conseguito il dottorato nel 1942 alla Princeton University. Malgrado la giovane età ha svolto un ruolo chiave nel Progetto Manhattan, condotto a Los Alamos durante la Seconda guerra mondiale. In seguito Feynman ha insegnato alla Cornell University e al California Institute of Technology. Nel 1965 ha ricevuto il Nobel per la fisica, insieme a Julian Schwinger e Sin-Itiro Tomonaga, per le sue ricerche sull'elettrodinamica quantistica, più di preciso per aver risolto alcune inconsistenze della teoria. Ha inoltre formulato una teoria matematica per spiegare il fenomeno della superfluidità nell'elio liquido. Tempo dopo ha svolto con Murray Gell-Mann ricerche fondamentali sulle interazioni deboli, per esempio sul decadimento beta. Nell'ultima parte della sua vita Feynman ha contribuito in maniera essenziale allo sviluppo della teoria dei quark, elaborando il modello a partoni per descrivere le collisioni di protoni ad alta energia.

Oltre a questi risultati teorici, Feynman ha introdotto in fisica nuove tecniche per calcoli fondamentali e notazioni innovative; una fra tutte, i diagrammi di Feynman, che sono diventati imprescindibili e che, forse più di qualsiasi altro formalismo nella storia recente della scienza, hanno influenzato in profondità la concezione e il calcolo di processi fisici fondamentali.

Feynman aveva grandi doti didattiche. Fra i suoi molti riconoscimenti, era particolarmente orgoglioso della Medaglia Ørsted per l'insegnamento della fisica, assegnatagli nel 1972. *La Fisica di Feynman*, pubblicata originariamente nel 1963, è stata descritta su *Scientific American* come «tosta, ma nutriente e ricca di sapore. Venticinque anni dopo, è ormai il manuale di riferimento tanto per gli insegnanti quanto per i migliori studenti dei primi anni». Per diffondere la comprensione della fisica nel grande pubblico, Feynman ha scritto *La legge fisica e QED: la strana teoria della luce e della materia*. Ha al suo attivo anche diversi testi avanzati divenuti dei classici, e manuali per studenti e ricercatori.

Richard Feynman è stato anche un'attiva figura pubblica. Com'è ben noto, ha fatto parte della commissione che ha indagato sul disastro del Challenger, svolgendo la famo-

sa dimostrazione della fragilità delle guarnizioni O-ring a basse temperature: un esperimento elegante per cui sono bastati un morsetto e un bicchiere d'acqua ghiacciata. È forse meno nota la sua partecipazione, negli anni Sessanta, al California State Curriculum Committee. Incaricato di selezionare i libri di testo per le scuole dello stato, Feynman criticò aspramente il basso livello di quei manuali.

Nessun elenco delle innumerevoli imprese di Feynman in campo scientifico e didattico potrebbe restituire per intero la sua figura. Come ben sanno i suoi lettori, la personalità vivace e sfaccettata di Feynman risalta in tutte le sue opere, anche nei testi più tecnici. Oltre a svolgere ricerca in fisica, in vari momenti della sua vita Feynman ha riparato radio, scassinato serrature, creato opere d'arte, danzato, suonato i bongos e perfino decifrato geroglifici Maya. Era un esempio perfetto di atteggiamento empirico e sempre curioso verso il mondo circostante.

Richard Feynman è morto a Los Angeles il 15 febbraio 1988.

## Robert Leighton

Robert B. Leighton è nato a Detroit nel 1919. Nel corso della sua vita ha svolto ricerche pionieristiche in vari campi della fisica: stato solido, raggi cosmici, fisica solare, fotografia planetaria, astronomia infrarossa, millimetrica e submillimetrica; ha inoltre contribuito alla nascita della moderna fisica delle particelle. Famoso per i suoi innovativi progetti di strumenti scientifici, era anche un insegnante apprezzatissimo: ancor prima di partecipare alla stesura de *La Fisica di Feynman*, ha scritto il manuale di grande successo *Principles of Modern Physics*.

Nei primi anni Cinquanta Leighton ha dato un notevole contributo a dimostrare che il muone decade in un elettrone e due neutrini, e ha realizzato la prima misura dello spettro energetico dell'elettrone risultante. Dopo la scoperta delle particelle strane, Leighton ne ha osservato per primo il decadimento, spiegandone varie proprietà.

Pochi anni dopo Leighton ha inventato gli spettroeliografi a effetto Doppler e a effetto Zeeman. Grazie allo spettroeliografo a effetto Zeeman, insieme ai suoi studenti ha creato una mappa ad altissima risoluzione del campo

magnetico solare, giungendo a scoperte sorprendenti: la «super granulazione», e oscillazioni dell'ordine di cinque minuti nelle velocità superficiali locali del Sole; è così nato il nuovo campo della sismologia solare.

Leighton ha poi progettato e costruito strumenti con cui realizzare immagini più nitide dei pianeti, e ha inaugurato un altro campo di ricerca: l'ottica adattiva. Le immagini dei pianeti a opera di Leighton sono state considerate le migliori fino agli anni Sessanta, quando è iniziata l'era dell'esplorazione spaziale con le sonde.

All'inizio degli anni Sessanta Leighton ha creato un nuovo ed economico telescopio a infrarossi e ha realizzato la prima mappa del cielo a 2,2  $\mu\text{m}$ , individuando così nella nostra galassia un numero sorprendentemente alto di oggetti indistinguibili a occhio nudo perché troppo freddi. A metà degli anni Sessanta ha diretto gli studi sulle immagini nelle missioni Mariner 4, 6 e 7 che il Jet Propulsion Laboratory ha inviato verso Marte. Nello stesso laboratorio, Leighton ha dato un contributo decisivo alla creazione del primo sistema di televisione digitale nello spazio profondo, e ha partecipato alle prime ricerche sull'elaborazione e il miglioramento delle immagini.

Negli anni Settanta Leighton è passato a occuparsi dello sviluppo di antenne grandi ed economiche utilizzabili per l'interferometria millimetrica e l'astronomia submillimetrica. Una volta di più le sue spiccate doti sperimentali hanno aperto un nuovo campo di ricerca, tuttora attivamente studiato con vari telescopi, come l'Owens Valley Radio Observatory in California e l'Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) in Cile.

Robert Leighton è morto il 9 marzo 1997 a Pasadena, in California.

## Matthew Sands

Matthew Sands è nato nel 1919 a Oxford, nel Massachusetts; ha conseguito il Bachelor of Arts alla Clark University nel 1940 e il Master of Arts alla Rice University nel 1941. Durante la Seconda guerra mondiale ha partecipato al Progetto Manhattan, a Los Alamos, occupandosi di elet-

tronica e strumentazione. Dopo la guerra ha contribuito a fondare la Los Alamos Federation of Atomic Scientists, che si opponeva a usi ulteriori delle armi nucleari. Nello stesso periodo ha conseguito il dottorato al MIT, studiando i raggi cosmici sotto la direzione di Bruno Rossi.

Nel 1950 il Caltech ha assunto Sands perché partecipasse alla costruzione di un elettrosincrotrone da 1,5 GeV e ne seguisse il funzionamento. Sands è stato il primo a dimostrare, sul piano teorico e sperimentale, l'importanza degli effetti quantistici negli acceleratori di elettroni.

Dal 1960 al 1966 Sands ha fatto parte della Commission on College Physics e ha supervisionato le riforme nel corso di laurea in fisica del Caltech sfociate nella creazione de *La Fisica di Feynman*. Nello stesso periodo è stato consulente sulle armi nucleari e il disarmo per il President's Science Advisory Committee, la Arms Control and Disarmament Agency e il Department of Defense.

Nel 1963 Sands è diventato vicedirettore per la costruzione e la gestione dello Stanford Linear Accelerator, al laboratorio SLAC, dove si è anche occupato del collisionatore da 3 GeV, Stanford Positron Electron Asymmetric Rings (SPEAR).

Dal 1969 al 1985 Sands è stato professore di fisica alla University of California a Santa Cruz, di cui è anche stato Vice Chancellor for Science dal 1969 al 1972. Nel 1972 l'American Association of Physics Teachers gli ha conferito il Distinguished Service Award. Ha continuato a occuparsi di ricerca con gli acceleratori di particelle anche da professore emerito, fino al 1994. Nel 1998 la American Physical Society ha conferito a Sands il Robert R. Wilson Prize «per i suoi vari contributi alla fisica degli acceleratori e allo sviluppo di collisionatori a protoni e a elettroni-positroni».

Negli anni della pensione Sands ha seguito insegnanti di scienze delle scuole primarie e secondarie di Santa Cruz, aiutandoli a creare attività didattiche in laboratorio e al computer. Ha inoltre curato la pubblicazione dei *Consigli per risolvere i problemi di fisica*, cui ha partecipato nell'*Edizione completa* de *La Fisica di Feynman*.

Matthew Sands è morto il 13 settembre 2014 a Santa Cruz, in California.

# Prefazione a

## ***La Fisica di Feynman - Edizione Millennium***

È passato quasi mezzo secolo da quando Feynman ha tenuto al Caltech il corso di fisica generale da cui sono stati tratti i tre volumi de *La Fisica di Feynman*. In questi cinque decenni la nostra concezione del mondo fisico ha fatto enormi progressi, ma *La Fisica di Feynman* non ha perso di attualità. Grazie agli straordinari metodi didattici e all'intuito fisico di Feynman, le sue lezioni non hanno perso il loro smalto dall'epoca della prima edizione. Principianti ed esperti di fisica le studiano in tutto il mondo; se ne contano almeno una decina di traduzioni, e nella sola lingua inglese ne sono state stampate oltre un milione e mezzo di copie. È forse l'unico testo di fisica ad aver avuto una risonanza tanto vasta e duratura.

Con l'*Edizione Millennium*, *La Fisica di Feynman* entra nell'era dell'editoria elettronica. Grazie alle nuove tecnologie, il testo e le equazioni sono stati espressi in LaTeX, linguaggio elettronico di composizione tipografica, e tutte le figure sono state ricreate con moderni programmi di grafica.

La versione a stampa di questa edizione non ne esce stravolta: è quasi identica agli originali volumi rossi ben noti agli studenti di fisica e apprezzati da decenni. Le differenze principali risiedono nell'ampliamento e miglioramento dell'indice analitico, nella correzione di 885 errori scovati dai lettori nei cinque anni seguenti alla prima ristampa dell'edizione precedente, e nella facilità con cui si potranno apportare correzioni eventualmente segnalate dai lettori futuri. Ne riparlerò più avanti.

### **Ricordi delle lezioni di Feynman**

I tre volumi de *La Fisica di Feynman* sono un vero e proprio trattato di didattica. Sono anche una documentazione storica delle lezioni di fisica generale tenute da Feynman nel 1961-1964, obbligatorie per gli studenti dei primi due anni di tutte le facoltà scientifiche del Caltech.

Mi sono sempre chiesto, e forse anche i lettori, che effetto abbiano avuto le lezioni di Feynman sugli studenti che le hanno frequentate. Nella sua Introduzio-

ne a questi volumi, Feynman era piuttosto pessimista: «non credo che il mio corso abbia avuto molto successo con gli studenti». Matthew Sands, nella sua rievocazione in *Consigli per risolvere i problemi di fisica*, esprime un parere assai più positivo. Per curiosità, nella primavera del 2005 ho contattato a voce o per e-mail un insieme quasi casuale di diciassette studenti che hanno seguito il corso di Feynman negli anni 1961-63 (tra i circa centocinquanta originari), includendone alcuni che l'avevano trovato molto difficile, e altri che l'avevano assimilato senza problemi; studenti di biologia, chimica, ingegneria, geologia, matematica e astronomia, oltre che di fisica.

I ricordi sono forse diventati più rosei col passare degli anni, ma per circa l'80% degli studenti le lezioni di Feynman sono state il clou degli anni universitari. «Era come andare a messa». «Ne uscivi cambiato», era «un'esperienza unica, forse la cosa più importante che mi ha dato il Caltech». «Studiavo biologia, ma le lezioni di Feynman sveltavano su tutti gli altri corsi [...] anche se devo ammettere che all'epoca non riuscivo a risolvere gli esercizi e non li consegnavo quasi mai». «Ero tra gli studenti meno promettenti del corso, ma non ho mai fatto un'assenza. [...] Ricordo bene l'entusiasmo della scoperta trasmesso da Feynman e posso riviverlo ancora oggi. [...] Nelle sue lezioni c'era un [...] coinvolgimento emotivo che probabilmente è andato perso nella versione stampata».

Al contrario, molti studenti hanno ricordi negativi, soprattutto per due ragioni: (1) «Le lezioni non insegnavano a risolvere i problemi. Feynman era troppo abile. Conosceva diversi trucchi e le approssimazioni utilizzabili, rispetto ai principianti poteva avvantaggiarsi di un intuito basato sulla sua esperienza e genialità». Consci di questa lacuna del corso, Feynman e colleghi vi hanno parzialmente rimediato con il materiale incluso nei *Consigli per risolvere i problemi di fisica*: tre lezioni di Feynman sulla risoluzione di problemi e un insieme di esercizi completi di soluzione compilato da Robert B. Leighton e Rochus Vogt. (2) «C'erano aspetti molto frustranti: l'incertezza sul probabile argomento della lezione seguente, la mancanza di un libro di testo o di una bibliografia in qual-

che modo collegata a quanto visto a lezione, e quindi l'impossibilità di leggere qualcosa in anticipo. [...] In aula trovavo le lezioni interessanti e comprensibili, ma diventavano sanscrito una volta fuori [quando cercavo di ricostruirne i dettagli]». Questo problema, naturalmente, è stato risolto grazie ai tre volumi della versione stampata de *La Fisica di Feynman*. Sono poi diventati il libro di testo degli studenti del Caltech per molti anni e a oggi rimangono una delle maggiori eredità di Feynman.

## Storia delle correzioni

*La Fisica di Feynman* è stata prodotta molto rapidamente da Feynman e dai suoi coautori, Robert B. Leighton e Matthew Sands, che hanno sfruttato e poi ampliato le registrazioni audio e le foto della lavagna realizzate durante le lezioni di Feynman<sup>(1)</sup>. Data la velocità a cui hanno lavorato Feynman, Leighton e Sands, era inevitabile che nella prima edizione fossero sfuggiti molti errori. Negli anni seguenti Feynman aveva accumulato lunghe liste di presunti errori, scovati dagli studenti e dai professori del Caltech e dai lettori di tutto il mondo. Negli anni Sessanta e nei primi anni Settanta Feynman ha sottratto del tempo alle sue molteplici attività per controllare gran parte degli errori presunti nei volumi I e II e correggerli nelle edizioni seguenti. Ma poiché il suo senso del dovere ha avuto la peggio rispetto all'eccitazione di fare nuove scoperte, Feynman non è mai arrivato a rivedere gli errori del volume III<sup>(2)</sup>. Dopo la sua morte prematura, nel 1988, alcune liste di errori in tutti e tre i volumi sono state depositate negli archivi del Caltech e completamente dimenticate.

Nel 2002, Ralph Leighton (figlio di Robert Leighton, ormai deceduto, e grande amico di Feynman) mi ha informato dell'esistenza dei vecchi errori e di una nuova lunga lista stilata dal suo amico Michael Gottlieb. Leighton ha proposto che il Caltech pubblicasse una nuova edizione de *La Fisica di Feynman*, correggendo tutti gli errori e accompagnandola a un nuovo volume di materiale supplementare, *Consigli per risolvere i problemi di fisica*, che stava preparando insieme a Gottlieb.

<sup>(1)</sup> Per una descrizione della genesi delle lezioni di Feynman e de *La Fisica di Feynman*, si vedano la prefazione di Feynman e le introduzioni a ciascun volume, la rievocazione di Matthew Sands nei *Consigli per risolvere i problemi di fisica*, e anche la prefazione speciale all'*Edizione commemorativa de La Fisica di Feynman*, scritta nel 1989 da David Goodstein e Gerry Neugebauer e inclusa anche nell'*Edizione completa* del 2005.

<sup>(2)</sup> Nel 1975 ha iniziato a rivedere gli errori del terzo volume, ma preso da altri impegni ha lasciato la cosa a metà, senza apportare correzioni.

Feynman era il mio eroe e uno dei miei amici più cari. Quando ho visto la lista di errori e l'indice del nuovo volume proposto, ho subito accettato di dirigere il progetto per conto del Caltech (la patria accademica di Feynman per tanti anni, cui aveva ceduto tutti i diritti e gli obblighi per *La Fisica di Feynman*, congiuntamente a Leighton e Sands). Dopo un anno e mezzo di lavoro meticoloso da parte di Gottlieb, e una revisione minuziosa di Michael Hartl (un brillante ricercatore post-dottorato del Caltech che ha ricontrollato tutti gli errori e il nuovo volume), nel 2005 è uscita l'*Edizione completa de La Fisica di Feynman*, dove erano stati corretti circa 200 errori, accompagnata dai *Consigli per risolvere i problemi di fisica* di Feynman, Gottlieb e Leighton.

Credevo proprio che quell'edizione sarebbe stata definitiva. Ma non avevo previsto la reazione entusiasta dei lettori di tutto il mondo all'appello di Gottlieb a scovare altri errori e segnalarli al sito che Gottlieb ha creato e continua a curare, *The Feynman Lectures Website*, [www.feynmanlectures.info](http://www.feynmanlectures.info). Nei cinque anni successivi, sono stati segnalati 965 nuovi errori che sono sopravvissuti alla verifica scrupolosa di Gottlieb, Hartl e Nate Bode (un brillante studente di dottorato del Caltech, che ha preso il posto di Hartl nella verifica degli errori per conto del Caltech). Di questi 965 errori assodati, 80 sono stati corretti nella quarta ristampa della versione originale dell'*Edizione completa* (agosto 2006) e i restanti 885 sono stati corretti nella prima ristampa della nuova *Edizione Millennium* (332 nel volume I, 263 nel volume II e 200 nel volume III). Per maggiori informazioni sugli errori, si veda [www.feynmanlectures.info](http://www.feynmanlectures.info).

La ripulitura de *La Fisica di Feynman* dagli errori è chiaramente diventata un'impresa globale, seguita da una vasta comunità di appassionati. A nome del Caltech vorrei ringraziare i cinquanta lettori che hanno dato il proprio contributo dal 2005 a oggi, e i molti altri che lo faranno in futuro. Tutti i nomi sono elencati al seguente indirizzo: [www.feynmanlectures.info/flp\\_errata.html](http://www.feynmanlectures.info/flp_errata.html).

La stragrande maggioranza degli errori rientra in tre categorie: (1) refusi nel testo; (2) refusi ed errori matematici nelle equazioni, tabelle e figure – errori di segno o cifre sbagliate (per esempio un 5 al posto di un 4), elementi mancanti come pedici, segni di sommatoria, parentesi e termini nelle equazioni; (3) riferimenti sbagliati a capitoli, tabelle e figure. Errori di questo genere, benché non particolarmente gravi per i fisici esperti, possono frustrare e confondere i lettori principali cui Feynman aveva destinato il libro: gli studenti.

È notevole che, tra tutti e 1165 gli errori corretti sotto la mia supervisione, quelli che considererei veri e propri errori di fisica siano soltanto una manciata. Un esempio si trova nel paragrafo 5.10 del volume II, dove ora è scritto «[...] distribuzioni statiche di cariche all'interno di un conduttore chiuso *messo a terra* non possono pro-

durre alcun campo [elettrico] all'esterno» (nelle edizioni precedenti mancava la precisazione «messo a terra»). Feynman ha ricevuto la segnalazione di questo errore da vari lettori, fra cui Beulah Elizabeth Cox, studentessa all'università The College of William and Mary, che in un esame aveva fatto affidamento sulla frase sbagliata di Feynman. Nel 1975 Feynman ha scritto a Cox<sup>(3)</sup>: «il suo professore ha ragione a non darle punti, perché la sua risposta è sbagliata – come le ha dimostrato con il teorema di Gauss. Nella scienza bisogna credere alla logica e al ragionamento, non all'autorità. Lei ha quindi letto e inteso il libro correttamente. Io ho commesso un errore; in altre parole, il libro è sbagliato. Probabilmente stavo pensando al caso di una sfera conduttrice messa a terra, o forse al fatto che spostare le cariche in posizioni differenti all'interno di un conduttore non ha alcun effetto su ciò che accade all'esterno. Non so bene come mai, ma ho preso una cantonata; e l'ha presa anche lei, perché mi ha creduto».

## Genesi della nuova Edizione Millennium

Tra il novembre del 2005 e il luglio del 2006, il sito *The Feynman Lectures Website* ([www.feynmanlectures.info](http://www.feynmanlectures.info)) ha ricevuto 340 segnalazioni di errori. La cosa notevole è che in gran parte provenivano da una persona sola: Rudolf Pfeiffer, all'epoca ricercatore post-dottorato in fisica all'università di Vienna. L'editore, Addison Wesley, ha corretto 80 errori ma esitava a procedere per via dei costi: i libri erano stampati in fotolitografia, a partire da immagini fotografiche delle pagine risalenti agli anni Sessanta. Per correggere un errore occorreva rifare la composizione tipografica dell'intera pagina; per evitare l'introduzione di errori nuovi, la pagina veniva ricomposta due volte da persone diverse, poi confrontata e rivista da altri: un sistema davvero costoso, se gli errori da correggere sono centinaia.

Gottlieb, Pfeiffer e Ralph Leighton, frustrati dalla situazione, hanno ideato un progetto per facilitare la correzione di tutti gli errori, mirato anche alla produzione di versioni elettroniche de *La Fisica di Feynman*. Nel 2007 hanno sottoposto la loro idea a me, in quanto rappresentante del Caltech. Ero entusiasta, ma esitante. Dopo aver visto ulteriori dettagli, tra cui un capitolo di prova della versione elettronica, ho consigliato al Caltech di coadiuvare Gottlieb, Pfeiffer e Leighton nella realizzazione pratica della loro idea.

Il progetto è stato approvato da tre successivi direttori della Division of Physics, Mathematics and Astro-

nomy del Caltech – Tom Tombrello, Andrew Lange e Tom Soifer – e i complessi dettagli legali e contrattuali sono stati chiariti dal consigliere del Caltech per la proprietà intellettuale, Adam Cochran. Con la pubblicazione di questa nuova *Edizione Millennium*, il progetto è stato realizzato con successo, malgrado la sua complessità. Più di preciso:

Pfeiffer e Gottlieb hanno convertito in LaTeX tutti e tre i volumi de *La Fisica di Feynman*. Le figure sono state ridisegnate in moderna forma elettronica in India, sotto la guida del traduttore tedesco de *La Fisica di Feynman*, Henning Heinze, a beneficio dell'edizione tedesca. Gottlieb e Pfeiffer hanno concesso l'uso non esclusivo delle loro equazioni in LaTeX nella versione tedesca (pubblicata da Oldenbourg) in cambio dell'uso non esclusivo delle figure di Heinze nella versione inglese dell'*Edizione Millennium*. Pfeiffer e Gottlieb hanno controllato scrupolosamente tutto il testo e le equazioni in LaTeX e tutte le figure ridisegnate, apportando le correzioni necessarie. Per conto del Caltech, io e Nate Bode abbiamo fatto controlli a campione sul testo, le equazioni e le figure; siamo stati piacevolmente sorpresi di non trovare alcun errore. Pfeiffer e Gottlieb sono stati di una precisione e accuratezza incredibili. Pfeiffer e Gottlieb hanno incaricato John Sullivan della Huntington Library di digitalizzare le foto della lavagna delle lezioni di Feynman del 1962-64, e la George Blood Audio di digitalizzare le registrazioni delle letture – con l'incoraggiamento e il sostegno finanziario di Carver Mead, professore del Caltech, l'assistenza logistica di Shelley Erwin, archivista del Caltech, e l'assistenza legale di Cochran.

Le questioni legali non erano di poco conto: il Caltech aveva autorizzato Addison Wesley a pubblicare l'edizione stampata negli anni Sessanta, la versione audio delle lezioni di Feynman e una variante di un'edizione elettronica negli anni Novanta. All'inizio del nuovo millennio, tramite una serie di acquisizioni, i diritti per la stampa erano stati trasferiti al gruppo editoriale Pearson, mentre quelli per le versioni audio ed elettronica erano stati trasferiti al gruppo editoriale Perseus. Cochran, con l'aiuto di Ike Williams, un legale specializzato nell'editoria, è riuscito a riunificare tutti questi diritti sotto l'egida di Perseus/Basic Books, rendendo possibile la nuova *Edizione Millennium*.

## Ringraziamenti

Desidero ringraziare a nome del Caltech le persone che hanno reso possibile l'*Edizione Millennium*. In particolare quelle che, come già accennato, hanno svolto un ruolo essenziale: Ralph Leighton, Michael Gottlieb, Tom Tombrello, Michael Hartl, Rudolf Pfeiffer, Henning Heinze, Adam Cochran, Carver Mead, Nate Bode,

<sup>(3)</sup> *Deviazioni perfettamente ragionevoli dalle vie battute*: le lettere di Richard Feynman, a cura di Michelle Feynman, traduzione di Franco Ligabue (Adelphi, Milano, 2006), p. 244.

Shelley Erwin, Andrew Lange, Tom Soifer, Ike Williams e i cinquanta lettori che hanno inviato correzioni (elencati su [www.feynmanlectures.info](http://www.feynmanlectures.info)). Ringrazio anche Michelle Feynman (figlia di Richard Feynman) per i consigli e l'instancabile sostegno, Alan Rice del Caltech per i consigli e l'aiuto dietro le quinte, Stephan Puchegger e Calvin Jackson per aver consigliato e assistito Pfeiffer nella conversione de *La Fisica di Feynman* in LaTeX, Michael Figl, Manfred Smolik e Andreas Stangl per di-

scussioni sulla correzione degli errori; infine, Perseus/Basic Books e (per le edizioni precedenti) Addison Wesley.

KIP S. THORNE

Feynman Professor of Theoretical Physics, Emeritus  
California Institute of Technology

Ottobre 2010

## Le risorse multimediali

All'indirizzo [online.universita.zanichelli.it/feynman](http://online.universita.zanichelli.it/feynman) sono disponibili i link per consultare il **testo originale in lingua inglese** messo a disposizione dal California Institute of Technology.

Inoltre, chi acquista il libro può scaricare gratuitamente l'**ebook**, seguendo le istruzioni presenti nel sito sopra

indicato. L'ebook si legge con l'applicazione *Booktab*, che si scarica gratis da AppStore (sistemi operativi Apple) o da Google Play (sistemi operativi Android).

Per accedere alle risorse protette è necessario registrarsi su [myzanichelli.it](http://myzanichelli.it) inserendo la **chiave di attivazione** personale contenuta nel libro.

# Prefazione alla prima edizione italiana

Il corso di lezioni di Feynman riscosse fin dal suo apparire numerosi giudizi positivi. Colpiva, nel libro, la freschezza del linguaggio, un linguaggio più «parlato» che «scritto», l'originalità dell'esposizione, ma soprattutto l'acume critico e la profondità con cui i diversi argomenti venivano presentati. Dal punto di vista didattico si trattava in molti casi di un modo nuovo e moderno di insegnare la fisica. Raramente, di fronte ad argomenti complessi, Feynman scende al compromesso di semplificare la materia, ma in generale, affronta le difficoltà, anche se con rara abilità riesce a farle sembrare più facili.

Per il lettore privo di una buona conoscenza della lingua inglese, le difficoltà del linguaggio si aggiungono alle difficoltà di comprensione dei concetti esposti. Per questo

crediamo di aver fatto opera gradita ai lettori italiani accettando il non facile compito di traduzione. Il libro esce nell'edizione italiana in una versione bilingue, con testo originale a fronte<sup>(\*)</sup>. La traduzione è quindi necessariamente letterale, oltre il limite di eleganza e di scorrevolezza che una traduzione più libera avrebbe permesso. In questo modo crediamo di aver rispettato totalmente lo spirito con cui è stato scritto il libro, libro che riteniamo particolarmente utile per ampliare la preparazione di fisica generale, per il colloquio di cultura generale e per la preparazione di esami di concorso.

E. CLEMENTEL, S. FOCARDI, L. MONARI

Bologna, maggio 1968

## Bibliografia italiana e siti web

Freeman Dyson, *Turbare l'universo*, Bollati Boringhieri, Torino, 2010: è la bellissima autobiografia di questo geniale fisico-matematico inglese. In un capitolo di questo libro, magistrale dal punto di vista narrativo, viene raccontato come Feynman elaborò la teoria dei diagrammi, per la quale vinse il premio Nobel, attraverso la sua descrizione di uomo e di scienziato.

Lawrence M. Krauss, *L'uomo dei quanti. La vita e la scienza di Richard Feynman*, Codice Edizioni, Torino, 2011: il ritratto originale ed emozionante dell'uomo che è diventato una vera e propria leggenda per un'intera generazione di scienziati.

### ***Volumi di Richard Feynman disponibili in edizione italiana***

*La legge fisica*, Bollati Boringhieri, Torino, 1993: raccolta di conferenze su cosa è la fisica e come funziona.

D.L. Goodstein, J.R. Goodstein, *Il moto dei pianeti intorno al sole*, Zanichelli, Bologna, 1997: raccolta delle lezioni in cui Feynman analizza le leggi del moto dei pianeti seguendo le orme di Newton e utilizzando solo strumenti geometrici semplici (fuori catalogo).

James Gleick, *Genio, la vita e la scienza di Richard Feynman*, Garzanti, Milano, 1994 e 1998: la più completa biografia finora pubblicata. Presenta una minuziosa ricerca delle fonti e un'accurata ricostruzione dell'ambiente in cui Feynman si trovò a vivere e a operare (fuori catalogo).

*Sei pezzi facili*, Adelphi, Milano, 2000: raccolta di alcune introduzioni tratte dai primi capitoli de *La Fisica di Feynman*.

*Il piacere di scoprire*, Adelphi, Milano, 2002: una raccolta di saggi vari, tra i quali la relazione con cui Feynman dimostrò che il disastro dello Space Shuttle Challenger, nel 1986, fu causato da una semplice guarnizione di gomma.

*Sei pezzi meno facili*, Adelphi, Milano, 2004: raccolta di altre introduzioni su argomenti di fisica quantistica.

*Deviazioni perfettamente ragionevoli dalle vie battute*, Adelphi, Milano, 2006: una raccolta di lettere rese disponibili dalla figlia Michelle, con i destinatari più disparati: eminenti scienziati, ma anche ammiratori, studenti, gente comune. Lettere che confermano la leggendaria versatilità di Feynman e la sua anticonformistica vocazione dialettica.

<sup>(\*)</sup> Per questa edizione, come indicato a pag. X, il testo inglese è disponibile tra le risorse multimediali.

«*Sta scherzando Mr. Feynman!*» *Vita e avventure di uno scienziato curioso*, Zanichelli, Bologna, 2007: racconto di una vita piena di eventi incredibili, resi possibili da un impasto unico di acuta intelligenza, curiosità irrefrenabile, costante scetticismo e radicato umorismo.

«*Che t'importa di ciò che dice la gente?*» *Altre avventure di uno scienziato curioso*, Zanichelli, Bologna, 2007: il testamento spirituale di Feynman, redatto, nel suo ultimo anno di vita, assieme all'amico Ralph Leighton.

*Il senso delle cose*, Adelphi, Milano, 2010: raccolta di tre conferenze sulla natura della scienza, sui rapporti tra la scienza, la religione e la politica, e sull'impatto della scienza nella società.

*QED, la strana teoria della luce e della materia*, Adelphi, Milano, 2010: raccolta di lezioni in cui, senza far uso della matematica, spiega la teoria quantistica dei campi. Un vero *coup de theatre*.

*Le battute memorabili di Feynman*, Adelphi, Milano, 2017: idee, intuizioni, battute, riflessioni raccolte dalla figlia Michelle tra carte personali, registrazioni di conferenze, lezioni e interviste del padre, a testimonianza di un'insaziabile curiosità e di una intelligenza analitica giocosa e spietata.

R.B. Leighton, M.L. Sands, *La Fisica di Feynman*, edizione completa, Zanichelli, Bologna, 2007. La raccolta delle *Feynman Lectures on Physics*, il cosiddetto Libro Rosso della fisica, già edita in Italia da Masson. Incredibile a dirsi, esiste in commercio anche la registrazione su CD del sonoro originale delle lezioni per poterle ascoltare dalla voce di Feynman.

**Per i più volenterosi segnaliamo:**

R. Feynman, A. Hibbs, *Quantum Mechanics and Path Integrals*, Mc Graw-Hill, New York, 1965: uno dei testi cardine della letteratura scientifica, solo per addetti ai lavori.

**www.caltech.edu** È il sito del California Institute of Technology, l'università dove Feynman ha insegnato per decenni; la sua cattedra è attualmente ricoperta da Kip Thorne. Questo sito è ricchissimo di materiale su Feynman, e comprende anche una ricca sezione fotografica e le sue pubblicazioni scientifiche.

**www.feynman.com** e **www.richard-feynman.net** Sono i siti (quasi) ufficiali su Feynman creati da appassionati cultori del personaggio. Rappresentano la partenza ideale per ulteriori ricerche su Feynman, grazie anche al *web ring* a lui dedicato.



# Introduzione di Feynman

Queste sono le lezioni di fisica che ho tenuto negli ultimi due anni agli studenti del secondo corso e alle matricole del Caltech (California Institute of Technology). Le lezioni naturalmente non sono ripetute parola per parola – sono state pubblicate, talvolta ampliando talvolta riassumendo l'argomento. Le lezioni formano soltanto una parte del corso completo. L'intero gruppo di 180 studenti si riuniva in una grande aula due volte la settimana per ascoltare queste lezioni, e poi si divideva in piccoli gruppi di 15 o 20 studenti nelle sezioni per le ripetizioni sotto la guida di un assistente. In più vi era una sessione di laboratorio una volta alla settimana.

Lo scopo particolare che cercavamo di raggiungere con queste lezioni era di conservare l'interesse degli studenti più entusiasti e più svegli provenienti dalle scuole superiori e ammessi al Caltech. Essi hanno appreso quanto sia interessante ed eccitante la fisica – la teoria della relatività, la meccanica quantistica e altre idee moderne. Al termine dei due anni dei nostri precedenti corsi parecchi studenti si sentivano scoraggiati perché venivano loro presentate ben poche idee affascinanti. Essi dovevano studiare piani inclinati, elettrostatica e così via, e dopo due anni questo era proprio avvilente. Il problema era se si potesse o no fare un corso che salvasse lo studente più bravo e più interessato mantenendo il suo entusiasmo.

Le presenti lezioni non intendono essere in alcun modo una rassegna, ma sono molto serie. Pensai di indirizzarle al migliore della classe e di fare in modo, se possibile, che persino lo studente più intelligente fosse incapace di comprendere completamente tutto il contenuto delle lezioni – suggerendo di applicare idee e concetti in varie direzioni estranee alla linea maestra di applicazione. Per questa ragione comunque ho cercato costantemente di rendere tutta l'esposizione la più esatta possibile, per mettere in rilievo ogni caso in cui equazioni e idee si adattavano al campo della fisica, e come – quando si fosse andati più a fondo – sarebbero state modificate le cose. Pensavo anche che per



questi studenti era importante indicare che cosa essi – se sufficientemente intelligenti – avrebbero dovuto essere in grado di dedurre da quanto già detto, e che cosa veniva introdotto come componente nuovo. Quando entravano in ballo nuove idee cercavo o di dedurle, se erano deducibili, oppure di spiegare che si trattava di una nuova idea che non aveva alcun rapporto con cose già imparate e che non si poteva dimostrare – ma semplicemente aggiungere.

All'inizio di queste lezioni ho supposto che gli studenti conoscessero già dalla scuola superiore cose quali l'ottica geometrica, semplici concetti di chimica e così via. D'al-

tronde non mi è parso che vi fosse una qualsiasi ragione di fare le lezioni con un determinato ordine, nel senso che non avrei potuto far menzione di qualcosa finché non fossi stato pronto a discuterla nei particolari. C'erano da fare cenni a molti argomenti senza una discussione completa. Queste discussioni più complete sarebbero venute in seguito, quando la preparazione fosse stata più avanzata. Esempi ne sono le discussioni sull'induttanza e sui livelli energetici, che vengono dapprima presentati in modo molto qualitativo e sono in seguito sviluppati più completamente.

Nello stesso tempo in cui mi indirizzavo allo studente più attivo, volevo anche curarmi dello studente per il quale le impennate e le applicazioni collaterali sono semplicemente causa di disorientamento e dal quale non ci si può affatto aspettare che impari la maggior parte della materia della lezione. Per tale studente ho voluto che vi fosse almeno un nucleo centrale, o spina dorsale della materia, che egli potesse comprendere. Anche se non poteva capire tutto nella lezione avevo la speranza che non se ne sarebbe innervosito. Non mi aspettavo che capisse tutto, ma soltanto i lineamenti centrali e più diretti. Occorre naturalmente una certa intelligenza da parte sua per vedere quali siano i teoremi e le idee fondamentali, e quali siano le questioni secondarie e le applicazioni più avanzate che egli potrà capire soltanto negli anni seguenti.

Nel presentare queste lezioni vi era una seria difficoltà. Nel modo in cui il corso veniva fatto, non vi era alcuna reazione degli studenti per indicare, a chi le presentava, se le lezioni venivano bene assimilate. Questa è indubbiamente una difficoltà molto seria, e io non so quanto buone in realtà fossero le lezioni stesse. L'intera cosa fu essenzialmente un esperimento. E se dovessi ripeterlo non lo rifarei allo stesso modo – spero di non doverlo ripetere! Penso tuttavia che l'esperimento si risolvesse – per quanto concerne la fisica – del tutto soddisfacentemente nel primo anno.

Nel secondo anno io non fui altrettanto soddisfatto. Nella prima parte del corso, che tratta dell'elettricità e del magnetismo, non riuscii a trovare alcun modo realmente unico o diverso di presentarla – nessun modo che fosse particolarmente più eccitante del modo solito di presentazione. Così non penso di aver fatto molto nelle lezioni sull'elettricità e il magnetismo. Alla fine del secondo anno avevo pensato originariamente di proseguire, dopo l'elettricità e il magnetismo, facendo alcune lezioni in più sulle proprietà dei materiali, ma principalmente per parlare di cose quali i modi fondamentali, le soluzioni dell'equazione di diffusione, i sistemi vibranti, le funzioni ortogonali, ... sviluppando i primi stadi di quelli che comunemente sono detti «i metodi matematici della fisica». In retrospettiva penso che se dovessi rifare il corso tornerei all'idea originale. Ma poiché non era in progetto che io dovessi ripetere tali lezioni, fu suggerito che poteva essere una buona idea cercare di dare un'introduzione alla meccanica quantistica – cosa che il lettore troverà nel terzo volume.

È perfettamente chiaro che gli studenti che vogliono specializzarsi in fisica possono attendere fino al terzo anno per la meccanica quantistica. D'altra parte si arguiva che parecchi degli studenti del corso studiano fisica come fondamento ai loro interessi primari in altri campi. E il modo solito di trattare la meccanica quantistica rende tale soggetto quasi inaccessibile per la grande maggioranza degli studenti, perché essi devono spendere tanto tempo per impararla. Eppure nelle sue applicazioni effettive – specialmente in quelle più complesse di ingegneria elettrotecnica e di chimica – l'intero meccanismo della trattazione mediante le equazioni differenziali non è in realtà usato. Così ho cercato di descrivere i principi della meccanica quantistica in un modo che non richiedesse che uno già conoscesse la matematica delle equazioni differenziali a derivate parziali. Anche per un fisico penso che sia una cosa interessante il presentare la meccanica quantistica così a rovescio – per diverse ragioni che risulteranno chiare dalle lezioni stesse. Tuttavia penso che l'esperimento, per quanto riguarda la meccanica quantistica, non sia stato un completo successo – in gran parte per il fatto che in realtà non ho avuto tempo sufficiente verso la fine (avrei dovuto avere, per esempio, tre o quattro lezioni in più per trattare con maggior completezza argomenti quali le bande di energia e la dipendenza spaziale delle ampiezze). Inoltre, non avevo mai presentato prima l'argomento in questo modo, per cui la mancanza di una risposta era partico-

larmente grave. Credo ora che la meccanica quantistica debba essere presentata in un tempo successivo. Può darsi che un giorno abbia la possibilità di rifarla. Allora la farò bene.

La mancanza di lezioni sul come risolvere i problemi dipende dal fatto che vi erano sezioni preposte a tale compito. Benché abbia svolto tre lezioni del primo anno su come risolvere i problemi, esse non sono incluse qui. Vi era anche una lezione sulla guida inerziale, che era certamente appropriata dopo la lezione sui sistemi rotanti, ma che è stata sfortunatamente omessa. La quinta e la sesta lezione sono in realtà dovute a Matthew Sands, essendo io fuori città.

Il problema, naturalmente, è quanto bene sia riuscito questo esperimento. Il mio punto di vista – che però non sembra essere condiviso dalla maggior parte delle persone che hanno lavorato con gli studenti – è pessimista. Io non penso di aver fatto molto bene nei riguardi degli studenti. Se osservo come la maggioranza di loro ha affrontato i problemi agli esami, penso che il sistema abbia fallito. Naturalmente i miei amici mi sottolineano che vi erano una o due dozzine di studenti che – sorprendentemente – capirono quasi tutto in tutte le lezioni e che furono attivissimi nel lavorare col materiale e nell'affrontare parecchi punti con entusiasmo e interesse. Queste persone hanno ora, io credo, una preparazione di base di prima classe in fisica e sono, dopo tutto, quelli ai quali avevo cercato di indirizzarmi. Ma allora, «Il potere dell'insegnamento è raramente di molta efficacia tranne che in quelle felici situazioni dove è quasi superfluo» (Gibbons).

Pure, non volevo lasciare indietro completamente alcuno studente come forse ho fatto. Penso che un modo di aiutare di più gli studenti sarebbe di dedicare un lavoro più intenso allo sviluppo di un insieme di problemi atti a illustrare alcune delle idee delle lezioni. I problemi offrono una buona opportunità di allargare la materia delle lezioni e di rendere più realistiche, più complete e più salde nella mente le idee che sono state esposte.

Penso, tuttavia, che non esista alcuna soluzione a questo problema dell'istruzione oltre a quella di rendersi conto che il miglior insegnamento può essere realizzato soltanto quando vi sia un rapporto individuale e diretto fra uno studente e un buon insegnante – una situazione in cui lo studente discute le idee, riflette sulle cose, conversa sulle cose. È impossibile imparare molto, presenziando semplicemente a una lezione, o anche risolvendo semplicemente i problemi che vengono assegnati. Ma nei nostri tempi dobbiamo insegnare a un così gran numero di studenti che dobbiamo cercare di trovare un qualche surrogato della situazione ideale. Forse le mie lezioni possono dare un certo contributo. Forse in qualche piccolo posto dove vi siano docenti singoli per i singoli studenti, essi possono avere qualche ispirazione o qualche idea dalle lezioni. Forse essi si divertiranno meditandole – o proseguendo nello sviluppo di qualche idea.

RICHARD P. FEYNMAN

Giugno 1963

# Indice

<b>1</b>	<b>Comportamento quantistico</b>	1
1.1	Meccanica atomica	1
1.2	Un esperimento con pallottole	2
1.3	Un esperimento con onde	3
1.4	Un esperimento con elettroni	4
1.5	Interferenza delle onde elettroniche	6
1.6	Osservazione degli elettroni	7
1.7	Principi base della meccanica quantistica	10
1.8	Il principio di indeterminazione	11
<b>2</b>	<b>Relazione tra il punto di vista ondulatorio e quello corpuscolare</b>	13
2.1	Ampiezza d'onda di probabilità	13
2.2	Misure di posizione e di impulso	14
2.3	Diffrazione dai cristalli	17
2.4	Le dimensioni di un atomo	18
2.5	I livelli d'energia	20
2.6	Conseguenze di natura filosofica	21
<b>3</b>	<b>Ampiezza di probabilità</b>	24
3.1	Leggi di combinazione delle ampiezze	24
3.2	Interferenza da due fenditure	28
3.3	Diffusione da un cristallo	30
3.4	Particelle identiche	33
<b>4</b>	<b>Particelle identiche</b>	37
4.1	Particelle di Bose e particelle di Fermi	37
4.2	Stati di due particelle di Bose	39
4.3	Stati con $n$ particelle di Bose	42
4.4	Emissione e assorbimento di fotoni	43
4.5	Lo spettro del corpo nero	45
4.6	L'elio liquido	48
4.7	Il principio di esclusione	49
<b>5</b>	<b>Spin uno</b>	53
5.1	Filtraggio degli atomi con un apparecchio di Stern-Gerlach	53

5.2	Esperimenti con atomi filtrati	57
5.3	Filtri di Stern-Gerlach in serie	59
5.4	Stati di base	60
5.5	Interferenza delle ampiezze	62
5.6	L'armamentario della meccanica quantistica	65
5.7	Passaggio a una base diversa	67
5.8	Altri casi	70
<b>6</b>	<b>Spin un mezzo</b>	<b>71</b>
6.1	Trasformazione delle ampiezze	71
6.2	Trasformazione a un sistema di coordinate ruotato	73
6.3	Rotazioni intorno all'asse $z$	76
6.4	Rotazioni di $180^\circ$ e di $90^\circ$ intorno all'asse $y$	80
6.5	Rotazioni intorno all'asse $x$	83
6.6	Rotazioni arbitrarie	84
<b>7</b>	<b>La dipendenza delle ampiezze dal tempo</b>	<b>87</b>
7.1	Atomi in quiete. Stati stazionari	87
7.2	Moto uniforme	89
7.3	Energia potenziale. Conservazione dell'energia	92
7.4	Forze. Il limite classico	96
7.5	La «precessione» di una particella a spin un mezzo	97
<b>8</b>	<b>La matrice hamiltoniana</b>	<b>101</b>
8.1	Ampiezze e vettori	101
8.2	Decomposizione dei vettori di stato	103
8.3	Quali sono gli stati di base dell'universo?	106
8.4	Come gli stati cambiano col tempo	108
8.5	La matrice hamiltoniana	110
8.6	La molecola di ammoniaca	112
<b>9</b>	<b>Il maser ad ammoniaca</b>	<b>116</b>
9.1	Gli stati di una molecola di ammoniaca	116
9.2	La molecola in un campo elettrico stazionario	120
9.3	Transizioni in un campo dipendente dal tempo	125
9.4	Transizioni alla risonanza	127
9.5	Transizioni lontano dalla risonanza	129
9.6	L'assorbimento della luce	130
<b>10</b>	<b>Altri sistemi a due stati</b>	<b>133</b>
10.1	Lo ione di idrogeno molecolare	133
10.2	Forze nucleari	138
10.3	La molecola di idrogeno	140
10.4	La molecola del benzene	143
10.5	Coloranti	144
10.6	L'hamiltoniana di una particella a spin un mezzo in un campo magnetico	145
10.7	L'elettrone con spin in un campo magnetico	148

<b>11</b>	<b>Ancora sui sistemi a due stati</b>	151
11.1	Le matrici di spin di Pauli	151
11.2	Le matrici di spin come operatori	155
11.3	La soluzione delle equazioni per i sistemi a due stati	158
11.4	Gli stati di polarizzazione del fotone	159
11.5	Il mesone K neutro	163
11.6	Generalizzazione ai sistemi a $N$ stati	171
<b>12</b>	<b>La struttura iperfine dell'idrogeno</b>	176
12.1	Stati di base per un sistema di due particelle a spin un mezzo	176
12.2	L'hamiltoniana per lo stato fondamentale dell'atomo di idrogeno	178
12.3	I livelli di energia	182
12.4	L'effetto Zeeman	184
12.5	Gli stati in un campo magnetico	188
12.6	La matrice di proiezione per lo spin uno	191
<b>13</b>	<b>Propagazione in un reticolo cristallino</b>	194
13.1	Stati di un elettrone in un reticolo unidimensionale	194
13.2	Stati di energia definita	197
13.3	Stati che dipendono dal tempo	200
13.4	L'elettrone in un reticolo tridimensionale	201
13.5	Altri possibili stati in un reticolo	203
13.6	Diffusione da parte delle imperfezioni di un reticolo	204
13.7	Cattura da parte di un'imperfezione del reticolo	206
13.8	Ampiezze di diffusione e stati legati	207
<b>14</b>	<b>Semiconduttori</b>	209
14.1	Elettroni e lacune nei semiconduttori	209
14.2	Semiconduttori impuri	213
14.3	L'effetto Hall	215
14.4	Giunzioni a semiconduttori	217
14.5	La giunzione a semiconduttore come raddrizzatore	219
14.6	Il transistor	220
<b>15</b>	<b>L'approssimazione a particelle indipendenti</b>	223
15.1	Onde di spin	223
15.2	Due onde di spin	227
15.3	Particelle indipendenti	228
15.4	La molecola del benzene	230
15.5	Ancora un po' di chimica organica	233
15.6	Altri usi di questa approssimazione	235
<b>16</b>	<b>Dipendenza delle ampiezze dalla posizione</b>	237
16.1	Ampiezze in una dimensione	237
16.2	La funzione d'onda	241
16.3	Stati di impulso definito	243
16.4	Normalizzazione degli stati in $x$	245

16.5	L'equazione di Schrödinger	248
16.6	Livelli energetici quantizzati	250
<b>17</b>	<b>Simmetria e leggi di conservazione</b>	<b>254</b>
17.1	Simmetria	254
17.2	Simmetria e leggi di conservazione	257
17.3	Leggi di conservazione	260
17.4	Luce polarizzata	263
17.5	La disintegrazione della particella $\Lambda^0$	265
17.6	Sommario delle matrici di rotazione	270
<b>18</b>	<b>Il momento angolare</b>	<b>272</b>
18.1	Radiazione di dipolo elettrico	272
18.2	Diffusione della luce	274
18.3	Annichilimento del positronio	276
18.4	Matrice di rotazione per uno spin qualsiasi	281
18.5	Misura di uno spin nucleare	286
18.6	Composizione dei momenti angolari	287
18.7	Nota aggiuntiva 1: deduzione della matrice di rotazione	294
18.8	Nota aggiuntiva 2: conservazione della parità nell'emissione di un fotone	297
<b>19</b>	<b>L'atomo di idrogeno e il sistema periodico degli elementi</b>	<b>299</b>
19.1	L'equazione di Schrödinger per l'atomo di idrogeno	299
19.2	Soluzioni a simmetria sferica	300
19.3	Stati con dipendenza angolare	305
19.4	La soluzione generale per l'idrogeno	309
19.5	Le funzioni d'onda dell'idrogeno	312
19.6	Il sistema periodico	314
<b>20</b>	<b>Operatori</b>	<b>319</b>
20.1	Operazioni e operatori	319
20.2	Energie medie	321
20.3	L'energia media di un atomo	324
20.4	L'operatore di posizione	326
20.5	L'operatore dell'impulso	328
20.6	Il momento angolare	332
20.7	Variazione dei valori medi con il tempo	334
<b>21</b>	<b>L'equazione di Schrödinger in un ambito classico: un seminario sulla superconduttività</b>	<b>337</b>
21.1	L'equazione di Schrödinger in presenza di un campo magnetico	337
21.2	L'equazione di continuità per le probabilità	339
21.3	Due tipi d'impulso	341
21.4	Il significato della funzione d'onda	342
21.5	La superconduttività	343
21.6	L'effetto Meissner	345
21.7	Quantizzazione del flusso	347
21.8	La dinamica della superconduttività	349
21.9	La giunzione di Josephson	351

## APPENDICE • Capitoli dal volume 2

---

<b>34</b>	<b>Il magnetismo della materia</b>	361
<b>34.1</b>	Diamagnetismo e paramagnetismo	361
<b>34.2</b>	Momenti magnetici e momento angolare	363
<b>34.3</b>	La precessione dei magneti atomici	364
<b>34.4</b>	Il diamagnetismo	365
<b>34.5</b>	Il teorema di Larmor	366
<b>34.6</b>	La fisica classica non prevede né il diamagnetismo né il paramagnetismo	368
<b>34.7</b>	Il momento angolare nella meccanica quantistica	369
<b>34.8</b>	L'energia magnetica degli atomi	371
<b>35</b>	<b>Paramagnetismo e risonanza magnetica</b>	373
<b>35.1</b>	Stati magnetici quantizzati	373
<b>35.2</b>	L'esperienza di Stern e Gerlach	375
<b>35.3</b>	Il metodo di Rabi dei raggi molecolari	376
<b>35.4</b>	Il paramagnetismo dei materiali in massa	379
<b>35.5</b>	Il raffreddamento per smagnetizzazione adiabatica	382
<b>35.6</b>	La risonanza magnetica nucleare	383
	<b>Indice analitico</b>	387

---

### Le risorse multimediali

---

All'indirizzo

**online università zanichelli/feynman** <<http://online.universita.zanichelli.it/feynman>>

sono disponibili i link per consultare il **testo originale in lingua inglese** messo a disposizione dal California Institute of Technology.

Inoltre, chi acquista il libro può scaricare gratuitamente l'**ebook**, seguendo le istruzioni presenti nel sito sopra indicato. L'ebook si legge con l'applicazione *Booktab*, che si scarica gratis da AppStore (sistemi operativi Apple) o da Google Play (sistemi operativi Android).

Per accedere alle risorse protette è necessario registrarsi su **myzanichelli** <<http://myzanichelli.it>> inserendo la **chiave di attivazione** personale contenuta nel libro.

