

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 μm , 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⁽¹⁾. 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⁽²⁾. 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.

⁽¹⁾ 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.

⁽²⁾ 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. 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.

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.

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⁽³⁾: «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) 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,

⁽³⁾ *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). 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 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 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^(*). 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.

^(*) 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

1	Elettromagnetismo	1
1.1	Le forze elettriche	1
1.2	Campi elettrici e magnetici	3
1.3	Caratteristiche dei campi vettoriali	4
1.4	Le leggi dell'elettromagnetismo	6
1.5	Cosa sono i campi?	9
1.6	L'elettromagnetismo nella scienza e nella tecnica	11
2	Calcolo differenziale dei campi vettoriali	12
2.1	Come capire la fisica	12
2.2	Campi scalari e vettoriali: T e h	13
2.3	Derivate dei campi. Il gradiente	15
2.4	L'operatore ∇	17
2.5	Operazioni con ∇	18
2.6	L'equazione differenziale del flusso di calore	20
2.7	Derivate seconde dei campi vettoriali	21
2.8	Trabocchetti	23
3	Calcolo integrale dei vettori	25
3.1	Integrali dei vettori. L'integrale di linea di $\nabla\psi$	25
3.2	Il flusso di un campo vettoriale	27
3.3	Il flusso uscente da un cubetto. Il teorema di Gauss	29
3.4	Conduzione del calore. L'equazione di diffusione	30
3.5	La circuitazione di un campo vettoriale	33
3.6	La circuitazione intorno a un quadrato. Il teorema di Stokes	34
3.7	Campi con rotore nullo e a divergenza nulla	36
3.8	Riassunto	37
4	Elettrostatica	39
4.1	Statica	39
4.2	Legge di Coulomb. Sovrapposizione degli effetti	40
4.3	Potenziale elettrico	42
4.4	$E = -\nabla\phi$	44
4.5	Il flusso di E	46
4.6	Legge di Gauss. La divergenza di E	49
4.7	Campo di una sfera di carica	50
4.8	Linee di campo e superfici equipotenziali	51

5	Applicazioni della legge di Gauss	53
5.1	L'elettrostatica è la legge di Gauss, più...	53
5.2	Equilibrio in un campo elettrostatico	53
5.3	Equilibrio in presenza di conduttori	54
5.4	Stabilità degli atomi	55
5.5	Il campo di una carica lineare	55
5.6	Singola lamina carica e doppia lamina carica	56
5.7	Sfera carica e guscio sferico carico	57
5.8	Il campo di una carica puntiforme varia esattamente come $1/r^2$?	58
5.9	I campi di un conduttore	61
5.10	Il campo nella cavità di un conduttore	62
6	Il campo elettrico in varie circostanze (1)	64
6.1	Equazioni per il potenziale elettrostatico	64
6.2	Il dipolo elettrico	65
6.3	Osservazioni sulle equazioni vettoriali	67
6.4	Il potenziale del dipolo come un gradiente	68
6.5	L'approssimazione dipolare per una distribuzione arbitraria	70
6.6	I campi dovuti a conduttori carichi	71
6.7	Il metodo delle immagini	72
6.8	Una carica puntiforme vicino a un piano conduttore	73
6.9	Una carica puntiforme vicino a una sfera conduttrice	74
6.10	Condensatori a lastre parallele	76
6.11	Scariche a potenziali elevati	77
6.12	Il microscopio a emissione di campo	78
7	Il campo elettrico in varie circostanze (2)	80
7.1	Metodi per trovare il campo elettrostatico	80
7.2	Campi bidimensionali. Funzioni di variabile complessa	81
7.3	Oscillazioni nei plasmi	84
7.4	Particelle colloidali in un elettrolita	86
7.5	Il campo elettrostatico di una griglia	89
8	Energia elettrostatica	91
8.1	L'energia elettrostatica delle cariche. Sfera uniformemente carica	91
8.2	L'energia elettrostatica di un condensatore. Forze su conduttori carichi	92
8.3	L'energia elettrostatica di un cristallo ionico	95
8.4	L'energia elettrostatica nei nuclei	97
8.5	L'energia nel campo elettrostatico	100
8.6	L'energia elettrostatica di una carica puntiforme	103
9	L'elettricità nell'atmosfera	105
9.1	Il gradiente del potenziale elettrico dell'atmosfera	105
9.2	Correnti elettriche nell'atmosfera	106
9.3	Origine delle correnti elettriche nell'atmosfera	108
9.4	I temporali	109
9.5	Il meccanismo della separazione delle cariche	112
9.6	Il fulmine	115

10	Dielettrici	118
10.1	La costante dielettrica	118
10.2	Il vettore di polarizzazione P	119
10.3	Le cariche di polarizzazione	120
10.4	Le equazioni dell'elettrostatica in presenza di dielettrici	123
10.5	Campi e forze in presenza di dielettrici	124
11	Dentro ai dielettrici	127
11.1	I dipoli molecolari	127
11.2	La polarizzazione elettronica	127
11.3	Molecole polari. Polarizzazione da orientazione	130
11.4	I campi elettrici nelle cavità di un dielettrico	132
11.5	La costante dielettrica dei liquidi. L'equazione di Clausius-Mossotti	133
11.6	I dielettrici solidi	134
11.7	Ferroelettricità. BaTiO_3	135
12	Analogie con l'elettrostatica	139
12.1	Le stesse equazioni hanno le stesse soluzioni	139
12.2	Il flusso di calore. Una sorgente puntiforme vicina a un piano di separazione infinito	140
12.3	La membrana tesa	143
12.4	La diffusione dei neutroni. Una sorgente sferica uniforme in un mezzo omogeneo	145
12.5	Il flusso irrotazionale dei fluidi. Il flusso intorno a una sfera	148
12.6	L'illuminazione uniforme di un piano	151
12.7	La «fondamentale unità» della natura	152
13	Magnetostatica	154
13.1	Il campo magnetico	154
13.2	La corrente elettrica. La conservazione della carica	154
13.3	La forza magnetica su una corrente	156
13.4	Il campo magnetico delle correnti stazionarie. La legge di Ampère	156
13.5	Il campo magnetico di un filo diritto e di un solenoide. Correnti atomiche	158
13.6	La relatività dei campi magnetici ed elettrici	160
13.7	La trasformazione delle correnti e delle cariche	165
13.8	Il principio di sovrapposizione. La regola della mano destra	166
14	Il campo magnetico in varie circostanze	168
14.1	Il potenziale vettore	168
14.2	Il potenziale vettore dovuto a correnti note	171
14.3	Un filo diritto	172
14.4	Un solenoide lungo	173
14.5	Il campo di una piccola spira. Il dipolo magnetico	175
14.6	Il potenziale vettore di un circuito	177
14.7	La legge di Biot e Savart	177
15	Il potenziale vettore	179
15.1	Le forze su una spira di corrente. Energia di un dipolo	179

15.2	Energia meccanica ed elettrica	182
15.3	L'energia delle correnti costanti	184
15.4	Confronto di B e A	185
15.5	Il potenziale vettore e la meccanica quantistica	187
15.6	Ciò che è vero in statica è sbagliato in dinamica	193
16	Correnti indotte	196
16.1	Motori e generatori	196
16.2	Trasformatori e induttanze	199
16.3	Le forze sulle correnti indotte	200
16.4	Elettrotecnica	204
17	Le leggi dell'induzione	207
17.1	La fisica dell'induzione	207
17.2	Eccezioni alla «regola del flusso»	209
17.3	Accelerazione di particelle per mezzo di un campo elettrico indotto. Il betatrone	210
17.4	Un paradosso	212
17.5	Il generatore di corrente alternata	213
17.6	Induttanza mutua	215
17.7	Autoinduzione	217
17.8	Induttanza ed energia magnetica	218
18	Le equazioni di Maxwell	223
18.1	Equazioni di Maxwell	223
18.2	Come funziona il nuovo termine	225
18.3	Tutto sulla fisica classica	227
18.4	Un campo che si propaga	228
18.5	La velocità della luce	231
18.6	Risoluzione delle equazioni di Maxwell. I potenziali e l'equazione delle onde	232
19	Il principio dell'azione minima	236
19.1	Una lezione speciale, quasi parola per parola	236
19.2	Una nota aggiunta dopo la lezione	249
20	Soluzioni delle equazioni di Maxwell nello spazio libero	251
20.1	Onde nello spazio libero; onde piane	251
20.2	Onde tridimensionali	258
20.3	L'immaginazione scientifica	260
20.4	Onde sferiche	262
21	Soluzioni delle equazioni di Maxwell in presenza di correnti e cariche	266
21.1	La luce e le onde elettromagnetiche	266
21.2	Onde sferiche generate da una sorgente puntiforme	267
21.3	La soluzione generale delle equazioni di Maxwell	269
21.4	I campi generati da un dipolo oscillante	270
21.5	I potenziali di una carica in moto. La soluzione generale di Liénard e Wiechert	275

21.6	I potenziali per una carica che si muove a velocità costante. La formula di Lorentz	277
------	--	-----

22 Circuiti in CA 280

22.1	Impedenze	280
22.2	Generatori	284
22.3	Reti di elementi ideali. Regole di Kirchhoff	286
22.4	Circuiti equivalenti	289
22.5	Energia	290
22.6	Una rete a scala	292
22.7	Filtri	293
22.8	Altri elementi circuitali	297

23 Cavità risonanti 299

23.1	Elementi circuitali reali	299
23.2	Un condensatore alle alte frequenze	300
23.3	Una cavità risonante	304
23.4	I modi delle cavità	307
23.5	Cavità e circuiti risonanti	309

24 Guide d'onda 311

24.1	La linea di trasmissione	311
24.2	La guida d'onda rettangolare	314
24.3	La frequenza di taglio	317
24.4	La velocità delle onde guidate	318
24.5	Osservazione di onde guidate	319
24.6	Le guide d'onda come condutture	320
24.7	Modi delle guide d'onda	322
24.8	Un'altra maniera di considerare le onde guidate	323

25 L'elettrodinamica nella notazione relativistica 326

25.1	I quadrivettori	326
25.2	Il prodotto scalare	328
25.3	Il gradiente quadridimensionale	331
25.4	L'elettrodinamica nella notazione quadridimensionale	334
25.5	Il quadripotenziale di una carica in moto	334
25.6	L'invarianza delle equazioni dell'elettrodinamica	335

26 Trasformazioni di Lorentz dei campi 338

26.1	Il quadripotenziale di una carica in moto	338
26.2	I campi di una carica puntiforme a velocità costante	339
26.3	Trasformazione relativistica dei campi	343
26.4	Le equazioni del moto in notazione relativistica	349

27 Energia e impulso dei campi 353

27.1	Conservazione locale	353
27.2	Conservazione dell'energia ed elettromagnetismo	354
27.3	Densità e flusso d'energia nel campo elettromagnetico	355
27.4	L'ambiguità dell'energia del campo	358

27.5	Esempi di flusso d'energia	359
27.6	L'impulso del campo	362
28	Massa elettromagnetica	366
28.1	L'energia del campo di una carica puntiforme	366
28.2	L'impulso del campo di una carica in moto	367
28.3	La massa elettromagnetica	368
28.4	La forza di un elettrone su sé stesso	369
28.5	Tentativi di modificare la teoria di Maxwell	371
28.6	Il campo delle forze nucleari	377
29	Il moto delle cariche nei campi elettrici e magnetici	380
29.1	Moto in un campo uniforme elettrico o magnetico	380
29.2	Analisi secondo l'impulso	380
29.3	Una lente elettrostatica	382
29.4	Una lente magnetica	382
29.5	Il microscopio elettronico	383
29.6	Campi di guida negli acceleratori	384
29.7	Focheggiamento a gradiente alternato	386
29.8	Moto in campi elettrici e magnetici incrociati	387
30	La geometria interna dei cristalli	389
30.1	La geometria interna dei cristalli	389
30.2	Legami chimici nei cristalli	390
30.3	La crescita dei cristalli	391
30.4	I reticoli cristallini	391
30.5	Simmetrie in due dimensioni	393
30.6	Simmetrie in tre dimensioni	395
30.7	La resistenza meccanica dei metalli	396
30.8	Dislocazioni e crescita dei cristalli	398
30.9	Il modello cristallino di Bragg e Nye	398
31	Tensori	416
31.1	Il tensore della polarizzabilità	416
31.2	Trasformazione delle componenti di un tensore	418
31.3	L'ellissoide dell'energia	419
31.4	Altri tensori. Il tensore d'inerzia	422
31.5	Il prodotto vettoriale	423
31.6	Il tensore degli sforzi	424
31.7	Tensori di rango più elevato	427
31.8	Il quadritensore dell'impulso elettromagnetico	428
32	L'indice di rifrazione dei materiali densi	431
32.1	La polarizzazione della materia	431
32.2	Le equazioni di Maxwell in un dielettrico	433
32.3	Onde in un dielettrico	435
32.4	L'indice di rifrazione complesso	438
32.5	L'indice di un miscuglio	439
32.6	Onde nei metalli	441
32.7	Approssimazioni per le basse e per le alte frequenze. Profondità di penetrazione e frequenza del plasma	442

33	La riflessione sulle superfici	445
33.1	Riflessione e rifrazione della luce	445
33.2	Onde nei materiali densi	446
33.3	Le condizioni al contorno	449
33.4	L'onda riflessa e l'onda trasmessa	452
33.5	La riflessione sui metalli	457
33.6	La riflessione totale interna	458
34	Il magnetismo della materia	461
34.1	Diamagnetismo e paramagnetismo	461
34.2	Momenti magnetici e momento angolare	463
34.3	La precessione dei magneti atomici	464
34.4	Il diamagnetismo	465
34.5	Il teorema di Larmor	466
34.6	La fisica classica non prevede né il diamagnetismo né il paramagnetismo	468
34.7	Il momento angolare nella meccanica quantistica	469
34.8	L'energia magnetica degli atomi	471
35	Paramagnetismo e risonanza magnetica	473
35.1	Stati magnetici quantizzati	473
35.2	L'esperienza di Stern e Gerlach	475
35.3	Il metodo di Rabi dei raggi molecolari	476
35.4	Il paramagnetismo dei materiali in massa	479
35.5	Il raffreddamento per smagnetizzazione adiabatica	482
35.6	La risonanza magnetica nucleare	483
36	Ferromagnetismo	486
36.1	Le correnti di magnetizzazione	486
36.2	Il campo H	491
36.3	La curva di magnetizzazione	492
36.4	Induttanze con nucleo di ferro	493
36.5	Elettromagneti	495
36.6	La magnetizzazione spontanea	497
37	Materiali magnetici	503
37.1	La comprensione del ferromagnetismo	503
37.2	Proprietà termodinamiche	507
37.3	La curva d'isteresi	508
37.4	I materiali ferromagnetici	512
37.5	Materiali magnetici particolari	514
38	Elasticità	517
38.1	La legge di Hooke	517
38.2	Deformazioni uniformi	519
38.3	L'asta sotto torsione. Onde di distorsione	522
38.4	La trave inflessa	525
38.5	L'inflessione laterale	528

39	Materiali elastici	531
39.1	Il tensore delle deformazioni	531
39.2	Il tensore dell'elasticità	534
39.3	I moti di un corpo elastico	536
39.4	Il comportamento non elastico	540
39.5	Il calcolo delle costanti elastiche	541
40	Il flusso dell'acqua asciutta	546
40.1	L'idrostatica	546
40.2	Le equazioni del moto	547
40.3	Flusso stazionario. Teorema di Bernoulli	551
40.4	La circuitazione	555
40.5	Linee vorticosi	556
41	Il flusso dell'acqua bagnata	559
41.1	La viscosità	559
41.2	Il flusso viscoso	562
41.3	Il numero di Reynolds	563
41.4	Il flusso trasversale intorno a un cilindro circolare	565
41.5	Il limite per la viscosità tendente a zero	567
41.6	Il flusso di Couette	568
42	Spazio curvo	571
42.1	Spazi curvi in due dimensioni	571
42.2	La curvatura nello spazio tridimensionale	576
42.3	Il nostro spazio è curvo	577
42.4	La geometria nello spazio-tempo	578
42.5	La gravità e il principio di equivalenza	579
42.6	La velocità degli orologi in un campo gravitazionale	579
42.7	La curvatura dello spazio-tempo	582
42.8	Il moto nello spazio-tempo curvo	583
42.9	La teoria di Einstein della gravitazione	585
	Indice analitico	587

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.