

Ugo Gasparini • Martino Margoni • Franco Simonetto

# Fisica

Elettromagnetismo e Onde

**PICCIN**

Opera coperta dal diritto d'autore - Tutti i diritti sono riservati

Questo testo contiene materiale, testi ed immagini, coperto da copyright e non può essere copiato, riprodotto, distribuito, trasferito, noleggiato, licenziato o trasmesso in pubblico, venduto, prestato a terzi, in tutto o in parte, o utilizzato in alcun altro modo o altrimenti diffuso, se non previa espressa autorizzazione dell'editore.

Qualsiasi distribuzione o fruizione non autorizzata del presente testo, così come l'alterazione delle informazioni elettroniche, costituisce una violazione dei diritti dell'editore e dell'autore e sarà sanzionata civilmente e penalmente secondo quanto previsto dalla L. 633/1941 e ss.mm.

In copertina: Torre della Specola (foto di Francesca Benetello), dal 1777 sede dell'antico Osservatorio Astronomico dell'Università di Padova istituito per volere del Senato della Repubblica di Venezia. In basso, il passaggio di una particella subatomica elettricamente carica ("muone" cosmico con velocità prossima alla velocità della luce) ricostruita dall'esperimento Compact Muon Solenoid (CMS) installato a circa 100 metri sotto il suolo presso il Large Hadron Collider (LHC) del CERN di Ginevra (immagine: CERN, per gentile concessione), e deflessa dall'intenso campo magnetico all'interno del rivelatore. A fianco della Torre, il segnale della prima onda gravitazionale osservato nel Settembre 2015 dagli interferometri della collaborazione internazionale LIGO (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory), negli Stati Uniti (immagine: Caltech/MIT/LIGO Lab).

ISBN 978-88-299-3195-8

Stampato in Italia

---

© 2021, Piccin Nuova Libreria S.p.A., Padova  
www.piccin.it

# — Autori

**Ugo Gasparini**, Professore Ordinario di Fisica Sperimentale presso il Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Padova, svolge attività di ricerca nell'ambito della Fisica delle particelle elementari. Ha lavorato in esperimenti sulla diffusione anelastica di adroni presso il Centro Europeo per le Ricerche Nucleari (CERN) di Ginevra, e successivamente alla progettazione e messa in opera di esperimenti al "Large Electron-Positron collider" (LEP) e al "Large Hadron Collider" (LHC) del CERN; nell'ambito di quest'ultimo, tuttora svolge attività di analisi dati orientata alle ricerche di processi di nuova fisica.

**Martino Margoni**, Professore Associato nel settore della Fisica Sperimentale delle Interazioni Fondamentali, lavora presso il Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Padova. Ha fatto parte di collaborazioni internazionali in vari esperimenti operanti su acceleratori di alta energia occupandosi principalmente di Fisica dei quark pesanti. È stato coordinatore del gruppo di Ricerca sulla Fisica del quark beauty nella collaborazione "Compact Muon Solenoid" (CMS) del CERN di Ginevra.

**Franco Simonetto** è Professore Ordinario di Fisica Generale presso il Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Padova, dove è titolare dei corsi di "Fisica Generale II" nel corso di Laurea in Fisica e "Subnuclear Physics" nel corso di Laurea in Physics. È stato membro delle collaborazioni scientifiche "European Hybrid Spectrometer" e DELPHI al CERN e Babar presso lo Stanford Linear Accelerator, occupandosi principalmente dello studio della asimmetria tra materia e antimateria. Attualmente continua i suoi studi come membro della collaborazione CMS al CERN.



# — Prefazione

Quest'opera si propone come testo per i corsi di Fisica Generale per gli studenti delle Scuole di Scienze e di Ingegneria. A vari anni dall'entrata in vigore della riforma universitaria e a seguito delle esperienze consolidate nell'insegnamento della Fisica come "materia di base", anche con alterne vicende circa l'opportuno grado di complessità e approfondimento da impartire negli insegnamenti dei primi anni delle lauree triennali, riteniamo utile proporre quest'opera, articolata in due volumi. Gli argomenti trattati sono quelli classici degli insegnamenti dei corsi di Fisica I e Fisica II (aventi denominazioni spesso differenti e diversi valori dei crediti formativi ad essi assegnati) presenti negli ordinamenti dei Corsi di Studio delle Scuole sopra citate: la Meccanica Classica, la Termodinamica, l'Elettromagnetismo e i Fenomeni ondulatori, con l'inclusione, nel Secondo Volume, di parti significative inerenti alla Fisica Atomica, alla struttura della materia e alla Teoria della Relatività, che ormai non possono essere tralasciate anche a livello di un corso di base.

L'intento dell'opera è quello di fornire un "percorso principale" di studio, preservando in esso il necessario grado di rigore ed esaustività che riteniamo irrinunciabile in un corso universitario a carattere prettamente scientifico-ingegneristico, che il docente possa adattare alle esigenze specifiche del suo insegnamento, arricchendolo con i numerosi esempi ed approfondimenti proposti e chiaramente evidenziati nel testo. In particolare gli esempi sono proposti in maniera tale da stimolare e sviluppare l'attitudine dello studente al ragionamento, fornendo inizialmente uno spunto e una traccia di possibile soluzione del problema posto, e solo al termine di ogni capitolo dando una soluzione completa dello stesso. In tali esempi spesso ci si richiama a situazioni fisiche realistiche, operando e discutendo le approssimazioni/semplificazioni necessarie per rendere il problema affrontabile, in questo di nuovo cercando di stimolare le capacità di ragionamento e di spirito critico del discente. In maniera complementare sono inoltre proposti degli approfondimenti che se da un lato arricchiscono dal punto di vista culturale lo studio da parte dello studente più motivato, dall'altro contribuiscono a meglio comprendere gli argomenti svolti, talora anticipando in modo il più possibile semplice ed autoconsistente argomenti tradizionalmente affrontati in corsi più avanzati. Infine, al termine di ogni capitolo sono offerti vari esercizi, di complessità e difficoltà confrontabili con quelle usualmente proposte nelle prove scritte d'esame; la soluzione sinteticamente svolta contribuisce ulteriormente alla comprensione degli aspetti applicativi della materia.

U. Gasparini, M. Margoni, F. Simonetto

# — Indice generale

---

<b>Introduzione</b>	<b>XI</b>
---------------------	-----------

---

<b>Capitolo 1 Forza elettrica e campo elettrostatico</b>	<b>1</b>
1. Introduzione	1
2. Interazione tra cariche a riposo	2
3. Proprietà della forza elettrostatica	7
4. Il campo elettrico	13
<i>Esercizi</i>	21
<i>Soluzioni degli esercizi</i>	23

---

<b>Capitolo 2 Le equazioni di Maxwell per il campo elettrostatico</b>	<b>25</b>
1. Introduzione	25
2. La legge di Gauss e il flusso del campo elettrostatico	25
3. Espressione locale della legge di Gauss	33
4. La circuitazione del campo elettrostatico	35
5. Espressione locale della legge della circuitazione	37
6. Condizioni di continuità del campo elettrostatico attraverso una superficie carica	38
7. Riepilogo	39
<i>Esercizi</i>	40
<i>Soluzioni degli esercizi</i>	41

---

<b>Capitolo 3 Potenziale elettrostatico ed energia elettrostatica</b>	<b>43</b>
1. Introduzione	43
2. Energia elettrostatica e potenziale elettrostatico	43
3. Campo e potenziale elettrico	45
4. Sviluppo del potenziale in termini di multipolo	51
5. Densità di energia elettrostatica	58
6. Equazioni di Poisson e di Laplace. Teorema di Earnshaw	61
<i>Esercizi</i>	66
<i>Soluzioni degli esercizi</i>	68

---

<b>Capitolo 4 Campi elettrici nella materia. Conduttori e dielettrici</b>	<b>71</b>
1. Introduzione	71
2. Conduttori	71

3. L'induzione elettrostatica. Conduttori	72
4. Pressione elettrostatica	77
5. Schermo elettrostatico e gabbia di Faraday	77
6. Sistemi di conduttori	79
7. Collegamenti in serie e parallelo di condensatori	82
8. Energia elettrostatica di un condensatore	84
9. Dielettrici	85
10. Equazione di Gauss in presenza dei dielettrici	93
11. Un campo ausiliario: lo spostamento elettrico	94
12. Il campo elettrico entro un dielettrico cavo	94
13. Energia elettrostatica nei mezzi polarizzati	95
14. Meccanismi di polarizzazione.	
Relazione tra polarizzazione e polarizzabilità	97
<i>Soluzioni degli Esempi</i>	98
<i>Esercizi</i>	103
<i>Soluzioni degli esercizi</i>	106

---

## Capitolo 5 Correnti elettriche 111

1. Introduzione	111
2. Proprietà della carica elettrica	111
3. Corrente elettrica ed equazione di continuità	113
4. Forza elettromotrice e generatori di tensione	115
5. Correnti nel vuoto. Valvola termoionica	119
6. La legge di Ohm	120
7. Processo di carica e scarica di un condensatore	132
<i>Soluzioni degli Esempi</i>	134
<i>Esercizi</i>	135
<i>Soluzioni degli esercizi</i>	137

---

## Capitolo 6 Magnetismo 141

1. Introduzione	141
2. La forza di Lorentz e il campo magnetico	143
3. Particella in moto in un campo magnetico uniforme.	
Pulsazione di ciclotrone	145
4. Forza sui circuiti elettrici: la seconda legge elementare di Laplace	151
5. Momento della forza magnetica su circuiti chiusi.	
Momento di dipolo magnetico	155
<i>Esercizi</i>	160
<i>Soluzioni degli esercizi</i>	161

---

## Capitolo 7 Le equazioni di Maxwell per il campo magnetostatico 165

1. Introduzione	165
2. Sorgenti del campo magnetico: la prima legge elementare di Laplace	165
3. Forze tra fili conduttori percorsi da corrente	170
4. Le equazioni di Maxwell per il campo magnetostatico	173
<i>Soluzioni degli Esempi</i>	184
<i>Esercizi</i>	185
<i>Soluzioni degli esercizi</i>	186

---

<b>Capitolo 8 Induzione elettromagnetica</b>	<b>189</b>
1. Introduzione	189
2. La legge di Faraday-Henry-Lenz	189
3. Applicazioni della legge di Faraday-Henry-Lenz: freni, motori, generatori elettromagnetici	199
4. Conclusione	205
<i>Soluzioni degli Esempi</i>	205
<i>Esercizi</i>	207
<i>Soluzioni degli esercizi</i>	208

---

<b>Capitolo 9 Circuiti accoppiati ed energia magnetica</b>	<b>213</b>
1. Introduzione	213
2. Autoinduzione	213
3. Circuiti accoppiati e coefficiente di mutua induzione	222
4. Circuito <i>RLC</i>	227
<i>Soluzioni degli Esempi</i>	233
<i>Esercizi</i>	233
<i>Soluzioni degli esercizi</i>	234

---

<b>Capitolo 10 Magnetismo nella materia</b>	<b>237</b>
1. Introduzione	237
2. Campi magnetici nella materia. Fenomenologia	237
3. Il vettore magnetizzazione. Relazione con le correnti di magnetizzazione	239
4. Il campo ausiliario <i>H</i>	242
5. Suscettività e permeabilità magnetica	243
6. Energia magnetica in un mezzo magnetizzato	245
7. Rifrazione delle linee di campo all'interfaccia tra due differenti mezzi lineari	246
8. Ferromagnetismo. Ciclo d'isteresi	248
9. Meccanismi di magnetizzazione	251
<i>Soluzioni degli Esempi</i>	253
<i>Esercizi</i>	254
<i>Soluzioni degli esercizi</i>	254

---

<b>Capitolo 11 Il campo elettromagnetico</b>	<b>257</b>
1. Introduzione	257
2. Manca qualcosa?	257
3. Campi elettrici e magnetici nel vuoto e onde elettromagnetiche	261
4. Relazioni tra <i>E</i> e <i>B</i> in un'onda elettromagnetica	263
5. Energia, quantità di moto e momento angolare del campo elettromagnetico	264
6. Il teorema di Poynting	265
7. Quantità di moto associata al campo elettromagnetico. Pressione di radiazione	267
8. Momento angolare associato al campo elettromagnetico	269
9. I potenziali del campo elettromagnetico	271
10. Conclusione	273

<i>Soluzioni degli Esempi</i>	274
<i>Esercizi</i>	274
<i>Soluzioni degli esercizi</i>	275

---

## Capitolo 12 L'equazione delle onde 277

1. Struttura dell'equazione d'onda	277
2. Soluzioni fattorizzabili: onde stazionarie	278
3. Soluzioni non fattorizzabili: propagazione delle onde	281
4. Sovrapposizioni di due onde. Risonanze. Battimenti	285
5. Onde in più dimensioni	292
6. Ampiezza ed intensità di un'onda	294
7. Onde longitudinali e trasversali. Polarizzazione	296
8. Evoluzione del fronte d'onda. Teorema di Kirchhoff, principio di Huygens-Fresnel	298
9. Effetto Doppler, onde d'urto	300
<i>Soluzioni degli Esempi</i>	303
<i>Esercizi</i>	304
<i>Soluzioni degli esercizi</i>	304

---

## Capitolo 13 La radiazione elettromagnetica 307

1. Lo spettro della radiazione elettromagnetica	307
2. Sorgenti della radiazione elettromagnetica	312
3. Onde elettromagnetiche nei materiali	323
4. Leggi della riflessione e della rifrazione	329
<i>Esercizi</i>	338
<i>Soluzioni degli esercizi</i>	341

---

## Capitolo 14 Fenomeni di interferenza e diffrazione 347

1. Introduzione	347
2. Interferenza tra due sorgenti coerenti	348
3. Diffrazione	359
4. Conclusione: l'ottica geometrica reinterpretata secondo le leggi d'interferenza	362
<i>Esercizi</i>	363
<i>Soluzioni degli esercizi</i>	365

---

## Capitolo 15 Cenni di teoria della relatività ristretta 369

1. Introduzione	369
2. I postulati della Relatività Ristretta. Dilatazione dei tempi e contrazione delle lunghezze	372
3. Implicazioni per il campo elettromagnetico	375
4. Le trasformazioni di Lorentz. Quadri-vettori	380
5. Invarianti relativistici	383
6. Trasformazione delle velocità. La quadrivelocità	383
7. Dinamica relativistica	384
<i>Soluzioni degli Esempi</i>	390
<i>Esercizi</i>	390
<i>Soluzioni degli esercizi</i>	392

<b>Appendice A Gradiente, divergenza, rotore</b>	<b>395</b>
1. Gradiente di una funzione scalare	395
2. Flusso di un campo vettoriale attraverso una superficie	397
3. Divergenza di un campo vettoriale e teorema della divergenza	398
4. Rotore di un campo vettoriale e teorema di Stokes	401
5. L'operatore laplaciano	404

---

<b>Appendice B L'angolo solido</b>	<b>407</b>
------------------------------------	------------

---

<b>Appendice C La distribuzione <math>\delta</math> di Dirac</b>	<b>409</b>
--	------------

---

<b>Appendice D Il metodo dei vettori rotanti</b>	<b>413</b>
1. Circuito <i>RLC</i> serie	414
2. Interferenza tra molte sorgenti	415

---

<b>Indice analitico</b>	<b>417</b>
-------------------------	------------

# — Introduzione

“DON’T PANIC”

*D. Adams, “The Hitchhiker’s Guide to the Galaxy”*

Il Secondo Volume di quest’opera copre gli argomenti che tradizionalmente sono oggetto dei programmi del secondo corso di Fisica in genere seguito dagli studenti dei corsi di laurea di Fisica, Ingegneria, Matematica. Essi riguardano l’Elettromagnetismo e le Onde.

L’**Elettromagnetismo**, cui sono dedicati i **Capitoli da 1 a 11**, studia le interazioni elettromagnetiche tra corpi elettricamente carichi; nei primi sette capitoli vengono descritti i *fenomeni elettrici e magnetici in situazioni statiche*, ossia nelle quali non si hanno variazioni nel tempo delle grandezze fisiche sorgenti dei campi elettrici e magnetici. In tali situazioni questi fenomeni appaiono come indipendenti, e le equazioni che li descrivono sono tra loro disaccoppiate. Nei Capitoli da 8 a 11 si affronta lo studio di ciò che accade quando cariche e correnti elettriche variano nel tempo, mettendo in evidenza la profonda interdipendenza dei campi elettrici e magnetici variabili nel tempo e come si debba quindi parlare inclusivamente di *interazione elettromagnetica* e di *fenomeni elettromagnetici*, arrivando alla predizione e alla scoperta delle *onde elettromagnetiche*. Nei **Capitoli da 12 a 14** si studiano i **fenomeni ondulatori**, con particolare riguardo appunto alle onde elettromagnetiche, alla loro propagazione nello spazio vuoto e alla loro interazione con la materia, discutendo, nel Capitolo 13, alcune proprietà della radiazione che portarono agli inizi del secolo scorso alla formulazione della teoria dei quanti di luce e, successivamente, della Meccanica Quantistica (oggetto dei corsi di Fisica più avanzati). Nel Capitolo 14 vengono discussi in dettaglio i fenomeni dell’interferenza e della diffrazione, propri del comportamento ondulatorio. Infine, il **Capitolo 15** è dedicato ad introdurre le nozioni basilari della teoria della **Relatività Ristretta** sviluppata da Albert Einstein agli albori del Novecento, cui più volte si fa cenno nei capitoli precedenti come naturale sbocco della teoria elettrodinamica compendiate nelle equazioni di Maxwell, la cui predizione dell’invarianza della velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche rispetto a diversi sistemi di riferimento porta necessariamente ad una profonda revisione dei concetti di tempo e spazio, quale appunto emerge dalla teoria einsteiniana.

