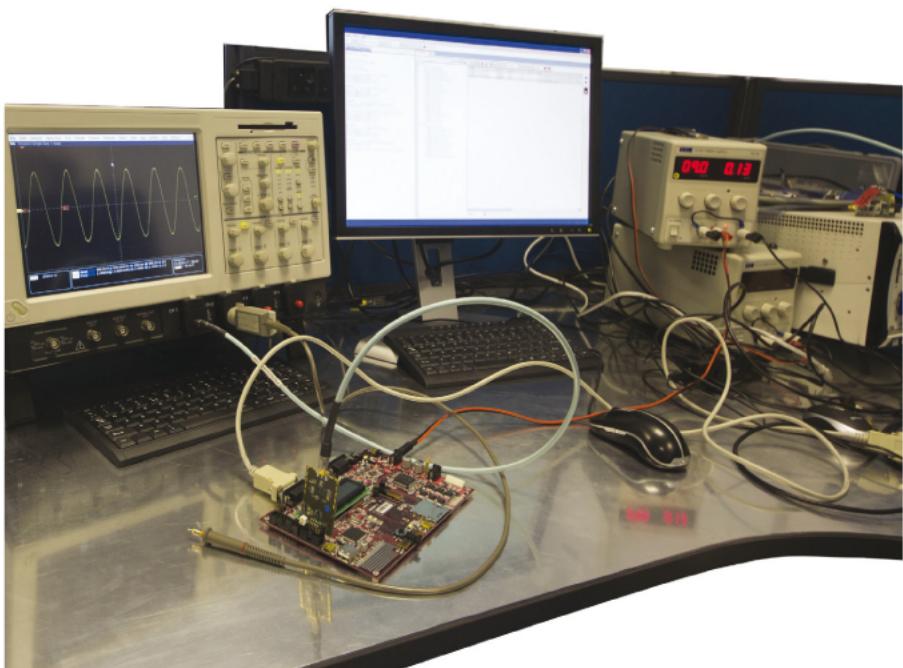


# IL LABORATORIO DI FISICA II

Circuiti elettrici - Elettromagnetismo



Vincenzo Canale · Paolo Iengo

II Edizione



versione Ebook





# Accedi ai contenuti digitali

**Espandi le tue risorse**  
un libro che **non pesa**  
e si **adatta** alle dimensioni  
del **tuoi lettore!**



Utilizza il codice personale contenuto nel riquadro per registrarti al sito **edisesuniversita.it** e accedere alla **versione digitale** del testo e al **materiale didattico**.

Scopri il tuo **codice personale** grattando delicatamente la superficie

Il volume NON può essere venduto, né restituito, se il codice personale risulta visibile.  
L'accesso al materiale didattico sarà consentito per 18 mesi.

Per attivare i **servizi riservati**, collegati al sito **edisesuniversita.it** e segui queste semplici istruzioni

## Se sei registrato al sito

- clicca su *Accedi al materiale didattico*
- inserisci e-mail e password
- inserisci le ultime 4 cifre del codice ISBN, riportato in basso a destra sul retro di copertina
- inserisci il tuo **codice personale** per essere reindirizzato automaticamente all'area riservata

## Se non sei già registrato al sito

- clicca su *Accedi al materiale didattico*
- registrati al sito o autenticati tramite facebook
- attendi l'e-mail di conferma per perfezionare la registrazione
- torna sul sito **edisesuniversita.it** e segui la procedura già descritta per *utenti registrati*



Ulteriori materiali e strumenti didattici sono accessibili dalla propria **area riservata** secondo la procedura indicata nel frontespizio.

Dalla sezione **materiali e servizi** della tua area riservata potrai accedere a:

- **Ebook:** versione digitale del testo in formato epub, standard dinamico che organizza il flusso di testo in base al dispositivo sul quale viene visualizzato. Fruibile mediante l'applicazione gratuita Bookshelf, consente una visualizzazione ottimale su lettori e-reader, tablet, smartphone, iphone, desktop, Android, Apple e Kindle Fire.

L'accesso ai contenuti digitali sarà consentito per **18 mesi**

# IL LABORATORIO DI FISICA II

## CIRCUITI ELETTRICI ELETTRONAUTISMO

II Edizione

---

**Vincenzo Canale · Paolo Iengo**



Vincenzo Canale - Paolo Iengo

**Il laboratorio di FISICA II**

**Circuiti elettrici - Elettromagnetismo**

II Edizione

Copyright © 2021 EdiSES Edizioni S.r.l.–Napoli

9 8 7 6 5 4 3 2 1 0  
2026 2025 2024 2023 2022 2021

*Le cifre sulla destra indicano il numero e l'anno dell'ultima ristampa effettuata*

*A norma di legge è vietata la riproduzione, anche parziale, del presente volume o di parte di esso con qualsiasi mezzo.*

*L'Editore*

*L'Editore ha effettuato quanto in suo potere per richiedere il permesso di riproduzione del materiale di cui non è titolare del copyright e resta comunque a disposizione di tutti gli eventuali aventi diritto*

*Stampato presso:*

Print Sprint S.r.l. – Napoli

*per conto della*

EdiSES Edizioni S.r.l. – Piazza Dante, 89 – Napoli

**[www.edisesuniversita.it](http://www.edisesuniversita.it)**

**[assistenza.edises.it](http://assistenza.edises.it)**

ISBN 978 88 3623 0655

---

I curatori, l'editore e tutti coloro in qualche modo coinvolti nella preparazione o pubblicazione di quest'opera hanno posto il massimo impegno per garantire che le informazioni ivi contenute siano corrette, compatibilmente con le conoscenze disponibili al momento della stampa; essi, tuttavia, non possono essere ritenuti responsabili dei risultati dell'utilizzo di tali informazioni e restano a disposizione per integrare la citazione delle fonti, qualora incompleta o imprecisa.

Realizzare un libro è un'operazione complessa e, nonostante la cura e l'attenzione poste dagli autori e da tutti gli addetti coinvolti nella lavorazione dei testi, l'esperienza ci insegna che è praticamente impossibile pubblicare un volume privo di imprecisioni. Saremo grati ai lettori che vorranno inviarci le loro segnalazioni e/o suggerimenti migliorativi sulla piattaforma [assistenza.edises.it](http://assistenza.edises.it)

# Autori

Vincenzo Canale si è formato nell'Università La Sapienza di Roma ed è professore ordinario di fisica sperimentale all'Università di Napoli Federico II. La sua attività didattica si svolge negli insegnamenti di laboratorio e di fisica moderna per i corsi di studio in Fisica e Matematica. La sua attività di ricerca riguarda la fisica subnucleare, per la quale egli partecipa ad esperimenti presso il CERN di Ginevra.

Paolo Iengo si è formato nell'Università Federico II di Napoli. Il suo campo di ricerca è la fisica subnucleare sperimentale, con particolare riguardo ai rilevatori di particelle e all'analisi statistica dei dati. Per questa attività egli ha ottenuto incarichi di ricerca presso il CERN di Ginevra ed il CNRS in Francia; attualmente è ricercatore presso la sezione di Napoli dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare.

# Indice

## Prefazioni

<b>1 Le grandezze elettriche, i circuiti e i loro componenti</b>	<b>17</b>
1.1 Le principali grandezze elettriche . . . . .	17
1.1.1 La carica, il campo e il potenziale elettrico . . . . .	17
1.1.2 La corrente elettrica . . . . .	21
1.1.3 La conservazione della carica elettrica . . . . .	22
1.2 I circuiti elettrici e i loro componenti principali . . . . .	24
1.2.1 La rappresentazione dei circuiti elettrici . . . . .	24
1.2.2 I dispositivi bipolari e la loro curva caratteristica . . . . .	26
1.2.3 La resistenza elettrica e i resistori . . . . .	29
1.2.4 I condensatori o capacitori . . . . .	35
1.2.5 L'induttanza e gli induttori . . . . .	39
1.2.6 Ulteriori esempi di bipoli elettrici passivi . . . . .	41
1.2.7 Le sorgenti energetiche: generatori di tensione e corrente . . . . .	43
1.3 Le incertezze sulle misure delle grandezze elettriche . . . . .	45
1.3.1 Incertezza standard e incertezza <i>allargata</i> . . . . .	45
1.3.2 Incertezze sulle misure con strumenti analogici . . . . .	46
1.3.3 Incertezze sulle misure con strumenti digitali . . . . .	47
1.3.4 Incertezze sui valori dei componenti . . . . .	47
1.3.5 Effetto della correlazione nella stima delle incertezze . . . . .	48
1.4 Esercizi . . . . .	50
<b>2 I circuiti in regime stazionario</b>	<b>51</b>
2.1 Reti elettriche in regime stazionario . . . . .	51
2.1.1 I generatori di tensione e corrente in regime stazionario . . . . .	52
2.1.2 Le leggi di Kirchoff . . . . .	61
2.1.3 Risoluzione elementare dei circuiti in corrente continua . . . . .	62
2.1.4 Energetica dei circuiti in regime stazionario . . . . .	69
2.2 Le misure elettriche in regime stazionario . . . . .	73
2.2.1 Il multimetro analogico a bobina mobile . . . . .	73

2.2.2	Il multmetro digitale	81
2.2.3	Perturbazioni introdotte dagli strumenti in corrente continua	82
2.3	Studio sperimentale di circuiti in regime stazionario	87
2.3.1	Misura della curva caratteristica di un bipolo	87
2.3.2	Misure di resistenza con il metodo volt-amperometrico	89
2.3.3	Misure di resistenza con il ponte di Wheatstone	92
2.3.4	Misura della resistenza interna di un generatore di tensione	97
2.3.5	Il partitore di tensione multi-stadio e la linea resistiva	98
2.3.6	Misura della carica e scarica di un condensatore	102
2.4	Esercizi	105
<b>3</b>	<b>Circuiti in regime quasi-stazionario</b>	<b>109</b>
3.1	Leggi dei circuiti in regime quasi-stazionario	109
3.2	Regime libero, forzato e transitorio	114
3.3	I segnali elettrici in regime quasi-stazionario	116
3.3.1	Principali caratteristiche dei segnali elettrici	116
3.3.2	I principali segnali in regime quasi-stazionario	118
3.3.3	Lo sviluppo in serie di Fourier dei segnali periodici	121
3.4	L'oscilloscopio per la misura dei segnali variabili	124
3.4.1	Principio di funzionamento dell'oscilloscopio analogico	124
3.4.2	Principio di funzionamento degli oscilloscopi digitali	128
3.4.3	Modalità operative dell'oscilloscopio	129
3.5	Esercizi	134
<b>4</b>	<b>Circuiti in regime sinusoidale</b>	<b>137</b>
4.1	Il regime sinusoidale nel caso quasi-stazionario	137
4.1.1	La notazione complessa per le grandezze elettriche sinusoidali	138
4.1.2	Il concetto di impedenza complessa in regime sinusoidale	139
4.1.3	Energetica dei circuiti in regime sinusoidale	145
4.1.4	Il quadripolo lineare in regime sinusoidale	149
4.2	Le misure elettriche in regime sinusoidale	152
4.2.1	Strumenti di misura in regime sinusoidale	152
4.2.2	Misure di impedenze in regime sinusoidale	155
4.2.3	I generatori di segnali in regime quasi-stazionario	156
4.2.4	Analisi sperimentale dei circuiti in regime sinusoidale	157
4.3	Studio dei principali circuiti in regime sinusoidale	160
4.3.1	I filtri RC e RL	160
4.3.2	Il partitore di tensione compensato	165
4.3.3	Circuiti selettori di banda	169
4.3.4	Circuiti risonanti	175
4.4	Esercizi	188

<b>5 Circuiti in regime impulsivo</b>	<b>193</b>
5.1 Studio della risposta al <i>gradino</i> di tensione . . . . .	193
5.1.1 Il segnale a gradino, l'impulso e l'onda quadra . . . . .	193
5.1.2 Soluzione generale dei circuiti tramite la risposta al gradino . . . . .	195
5.1.3 Variazioni delle grandezze elettriche per segnali <i>impulsivi</i> . . . . .	196
5.2 Circuiti integratori . . . . .	197
5.2.1 Circuito R-C . . . . .	197
5.2.2 Circuito L-R . . . . .	201
5.2.3 Filtro passa basso come circuito integratore . . . . .	202
5.3 Circuiti derivatori . . . . .	205
5.3.1 Circuito C-R . . . . .	205
5.3.2 Circuito R-L . . . . .	208
5.3.3 Filtro passa alto come circuito derivatore . . . . .	208
5.4 Circuiti oscillanti . . . . .	211
5.4.1 Circuito R-L-C serie . . . . .	211
5.4.2 Circuito R-L-C parallelo . . . . .	218
5.4.3 Studio della risposta R-L-C all'impulso esponenziale . . . . .	220
5.5 Ulteriori esempi di circuiti in regime impulsivo . . . . .	224
5.5.1 Il partitore di tensione compensato in regime impulsivo . . . . .	224
5.5.2 Circuiti selettori di banda in regime impulsivo . . . . .	225
5.5.3 Combinazione R-L-C . . . . .	229
5.6 Analisi sperimentale di un generico sistema lineare . . . . .	230
5.6.1 Sistemi del primo ordine . . . . .	230
5.6.2 Sistemi del secondo ordine . . . . .	231
5.6.3 Sistemi di ordine $n > 2$ . . . . .	231
5.7 Esercizi . . . . .	232
<b>6 La trasmissione dei segnali</b>	<b>235</b>
6.1 L'equazione di propagazione dei segnali elettrici . . . . .	235
6.1.1 L'equazione telegrafica . . . . .	235
6.1.2 La soluzione in regime stazionario e sinusoidale . . . . .	237
6.1.3 Le soluzioni in regime transitorio . . . . .	245
6.2 Le principali linee di trasmissione . . . . .	246
6.2.1 La linea bifilare . . . . .	246
6.2.2 Il cavo coassiale . . . . .	247
6.2.3 La linea a nastri paralleli . . . . .	247
6.3 Caratteristiche della propagazione dei segnali . . . . .	249
6.3.1 La proprietà delle linea ideale di trasmissione . . . . .	249
6.3.2 Effetti dispersivi sulle linee reali . . . . .	253
6.4 Esperienze sulla propagazione dei segnali elettrici . . . . .	254
6.4.1 Realizzazione di una linea a nastri paralleli . . . . .	255

6.4.2	Misure delle caratteristiche di propagazione dei segnali . . . . .	256
6.4.3	Messa in evidenza delle frequenze caratteristiche della linea . . . . .	258
6.5	Esercizi . . . . .	260
<b>7</b>	<b>Analisi delle reti lineari</b>	<b>263</b>
7.1	Teoremi generali per l'analisi delle reti lineari . . . . .	263
7.1.1	Il principio di sovrapposizione . . . . .	263
7.1.2	I teoremi di Thevenin e Norton . . . . .	265
7.1.3	Il teorema di Millmann . . . . .	267
7.2	Analisi delle reti in regime stazionario o sinusoidale . . . . .	269
7.2.1	Analisi delle correnti dei rami . . . . .	270
7.2.2	Metodo delle tensioni dei nodi . . . . .	271
7.2.3	Metodo delle correnti di maglia . . . . .	274
7.2.4	Scelta del metodo di risoluzione delle reti elettriche . . . . .	276
7.2.5	Estensione al regime sinusoidale . . . . .	276
7.3	Analisi delle reti in regime variabile col metodo della trasformata di Laplace .	277
7.3.1	Definizione e proprietà della trasformata di Laplace . . . . .	277
7.3.2	Impedenza simbolica dei principali componenti circuituali . . . . .	280
7.3.3	Applicazione elementare del metodo della TL . . . . .	282
7.4	Quadripoli lineari . . . . .	285
7.4.1	Definizioni e caratteristiche dei quadripoli . . . . .	285
7.4.2	Rappresentazione matriciale dei quadripoli lineari . . . . .	286
7.4.3	Impedenze dei quadripoli . . . . .	290
7.4.4	Adattamento di impedenza dei quadripoli . . . . .	293
7.5	Analisi in frequenza delle reti lineari . . . . .	296
7.5.1	Misura dello spettro di Fourier di alcuni segnali periodici . . . . .	296
7.5.2	Integrale e trasformata di Fourier . . . . .	305
7.5.3	Analisi dei sistemi lineari tramite la trasformata di Fourier . . . . .	311
7.5.4	Campionamento e restituzione dei segnali . . . . .	318
7.6	Esercizi . . . . .	326
<b>8</b>	<b>Semiconduttori e diodi</b>	<b>331</b>
8.1	I semiconduttori . . . . .	331
8.1.1	La corrente nei semiconduttori . . . . .	334
8.1.2	Semiconduttori drogati . . . . .	336
8.2	Il diodo a semiconduttore . . . . .	339
8.2.1	La giunzione $p - n$ . . . . .	339
8.2.2	Curva caratteristica del diodo . . . . .	343
8.2.3	Diodi con funzioni speciali . . . . .	347
8.3	Esempi di circuiti con il diodo . . . . .	350
8.4	Esercizi . . . . .	359

<b>9 Il transistor a semiconduttore</b>	<b>361</b>
9.1 Il transistor bipolare a giunzione (BJT) . . . . .	362
9.1.1 Struttura del dispositivo e principi di funzionamento . . . . .	362
9.1.2 Le caratteristiche tensione-corrente in condizioni statiche (DC) . . . . .	369
9.1.3 Il transistor BJT come amplificatore . . . . .	375
9.1.4 Le configurazioni basilari degli amplificatori a transistor BJT . . . . .	383
9.1.5 I circuiti di polarizzazione del transistor BJT . . . . .	387
9.1.6 Ulteriori esempi di circuiti con transistor BJT . . . . .	390
9.2 Transistor ad effetto di campo . . . . .	395
9.3 Cenni sui circuiti stampati e integrati . . . . .	398
9.4 Esercizi . . . . .	400
<b>10 Complementi sui fenomeni circuituali</b>	<b>403</b>
10.1 Fenomenologia della conduzione elettrica . . . . .	403
10.1.1 Le diverse forme di corrente elettrica . . . . .	404
10.1.2 Il modello classico di Drude e la legge di Ohm . . . . .	406
10.1.3 La struttura microscopica a bande e la conducibilità nei solidi . . . . .	409
10.2 Elettrodinamica in regime quasi stazionario . . . . .	414
10.2.1 Regime quasi stazionario e mezzi conduttori . . . . .	414
10.2.2 Fenomeni d'induzione: correnti di Foucault ed effetto Kelvin . . . . .	416
10.2.3 Fenomeni di capacità in regime quasistazionario . . . . .	420
10.3 Circuiti elettrici accoppiati . . . . .	423
10.3.1 Esempio di circuiti accoppiati in regime sinusoidale . . . . .	423
10.3.2 Esempio di circuiti accoppiati in regime impulsivo . . . . .	426
10.3.3 Formulazione matriciale e coordinate normali . . . . .	431
10.3.4 Ulteriori modi di accoppiamento fra i circuiti . . . . .	432
10.3.5 Accoppiamento di N circuiti . . . . .	434
<b>11 Compendio di elettromagnetismo (estensione online)</b>	<b>445</b>
11.1 Elementi di elettrostatica . . . . .	445
11.1.1 Definizione del campo elettrico e sue proprietà . . . . .	445
11.1.2 Il problema dell'elettrostatica . . . . .	451
11.1.3 Verifiche sperimentali dell'elettrostatica . . . . .	466
11.2 Elementi di magnetostatica . . . . .	472
11.2.1 Il campo magnetico e le sue proprietà . . . . .	472
11.2.2 Azioni magnetiche sui circuiti percorsi da corrente . . . . .	486
11.2.3 Il moto delle cariche nel campo elettro-magnetico . . . . .	493
11.2.4 Il magnetismo nella materia . . . . .	504
11.3 Elementi di induzione elettromagnetica . . . . .	517
11.3.1 Le leggi dell'induzione elettromagnetica . . . . .	517
11.3.2 Esperienze sull'induzione elettromagnetica . . . . .	525

11.3.3 Induzione propria e mutua dei circuiti elettrici . . . . .	539
11.3.4 I dispositivi elettromeccanici . . . . .	549
11.4 Elementi di elettrodinamica . . . . .	553
11.4.1 Le equazioni di Maxwell nel vuoto . . . . .	553
11.4.2 La soluzione delle equazioni di Maxwell con i potenziali . . . . .	556
11.4.3 Energia, impulso e momento angolare del campo e.m. . . . .	559
11.4.4 Le onde elettromagnetiche e l'irraggiamento . . . . .	564
11.5 Le unità di misura delle grandezze elettriche . . . . .	570
11.5.1 Il Sistema Internazionale per le misure elettromagnetiche . . . . .	570
11.5.2 Il sistema di Gauss per le misure elettromagnetiche . . . . .	572
11.5.3 Conversione SI-G per le misure elettromagnetiche . . . . .	572
<b>Bibliografia</b>	<b>577</b>
<b>A Risultati matematici</b>	<b>581</b>
A.1 I numeri complessi . . . . .	581
A.2 Risoluzione di equazioni differenziali lineari . . . . .	583
A.3 Calcolo differenziale e integrale in più dimensioni . . . . .	585
A.4 Campi vettoriali . . . . .	587
A.4.1 Sistemi di coordinate . . . . .	587
A.4.2 Superficie orientate e angolo solido . . . . .	590
A.4.3 Operazioni integrali e differenziali con i vettori . . . . .	592
A.5 L'analisi di Fourier . . . . .	595
A.5.1 Le serie di Fourier di funzioni periodiche . . . . .	595
A.5.2 La trasformata di Fourier (TF) . . . . .	597
A.6 La trasformata di Laplace . . . . .	603
<b>B Richiami di metrologia e di analisi statistica dei dati</b>	<b>609</b>
B.1 La misura di una grandezza con la sua incertezza . . . . .	609
B.1.1 Gli strumenti e loro caratteristiche . . . . .	609
B.1.2 Incertezze nelle misure delle grandezze fisiche . . . . .	616
B.1.3 Misure indirette e propagazione delle incertezze . . . . .	621
B.2 Richiami di analisi statistica delle incertezze casuali . . . . .	623
B.2.1 I campioni casuali e le statistiche campionarie . . . . .	623
B.2.2 Le distribuzioni delle fluttuazioni casuali . . . . .	624
B.2.3 La valutazione dell'incertezza statistica . . . . .	635
B.2.4 La propagazione delle incertezze statistiche . . . . .	638
B.2.5 La stima dei parametri di una dipendenza funzionale . . . . .	640

<b>C Soluzioni degli esercizi (estensione on-line)</b>	<b>647</b>
C.1 Soluzioni degli esercizi del capitolo 1 . . . . .	647
C.2 Soluzioni degli esercizi del capitolo 2 . . . . .	650
C.3 Soluzioni degli esercizi del capitolo 3 . . . . .	659
C.4 Soluzioni degli esercizi del capitolo 4 . . . . .	664
C.5 Soluzioni degli esercizi del capitolo 5 . . . . .	670
C.6 Soluzioni degli esercizi del capitolo 6 . . . . .	676
C.7 Soluzioni degli esercizi del capitolo 7 . . . . .	679
C.8 Soluzioni degli esercizi del capitolo 8 . . . . .	701
C.9 Soluzioni degli esercizi del capitolo 9 . . . . .	702



# Prefazione alla seconda edizione

Questa nuova edizione presenta, rispetto alla precedente, diverse novità che nascono dall’esperienza didattica degli autori. L’impianto generale è stato adeguato per rendere l’opera più facilmente adattabile allo sviluppo temporale dei principali corsi di laboratorio di fisica del secondo anno dei corsi di laurea scientifici come Fisica, Matematica e Chimica.

Nel particolare abbiamo deciso di adeguarci all’approccio più frequente che consiste nell’introdurre rapidamente le principali grandezze fisiche elettriche, la differenza di potenziale e la corrente, per potere sviluppare approfonditamente la fenomenologia e l’esperimentazione dei circuiti elettrici. Tuttavia per non snaturare completamente l’impostazione iniziale dell’opera, abbiamo riproposto lo sviluppo dei fondamenti dell’elettromagnetismo in un compendio sui fenomeni elettromagnetici disponibile online. Lungi da volere sostituire un testo classico, questa trattazione è comunque ricca di spunti, osservazioni e note originali, tratte dall’esperienza personale degli autori. Inoltre come vi si trovano diverse esperienze particolarmente significative per evidenziare il contenuto fisico dei fenomeni elettromagnetici.

Il corpo principale propone lo studio dei circuiti elettrici seguendo lo sviluppo naturale (regime stazionario, regime sinusoidale e regime impulsivo); vi sono discusse tutte le esperienze classiche di un corso sui circuiti elettrici e la strumentazione necessaria. Alcuni approfondimenti fenomenologici e realizzazioni sperimentalistiche originali, distribuite fra i diversi capitoli nella precedente edizione, sono state raggruppati in un unico capitolo di complementi sui fenomeni circuituali. Oramai in molti corsi di studio i dispositivi a semiconduttori (e.g. diodi e transistor a giunzione) vengono presentati al secondo anno, in maniera funzionale per l’uso nei circuiti. Per questo abbiamo dedicato due brevi capitoli a questi argomenti cercando di insistere sul contenuto fisico, sebbene in modo semplificato, piuttosto che sulle tematiche più squisitamente elettroniche come la caratterizzazione degli amplificatori. Alla fine di ogni capitolo sono stati introdotti un ragionevole numero di esercizi per consentire allo studente di verificare il grado di apprendimento.

Il testo è completato da alcune appendici, la prima riporta i risultati matematici necessari per le trattazioni teoriche. La seconda riprende in maniera sintetica la problematica della metrologia e dell’analisi dei dati; mentre l’ultima, disponibile nell’estensione online, contiene le soluzioni svolte degli esercizi. Riguardo alle notazioni, unità di misura e bibliografia abbiamo proseguito sulla linea delle precedente edizione.

# Prefazione alla prima edizione

Questo libro costituisce la naturale continuazione del precedente testo [27], pubblicato da uno degli autori (V.C.). In questo secondo volume si affrontano le tematiche dell'elettricità e del magnetismo. Come nel volume precedente si pone l'accento sulla parte sperimentale dell'insegnamento della Fisica. Il testo verte su esperienze di elettromagnetismo, principalmente sui circuiti elettrici, e dunque si adatta ai programmi di un corso di laboratorio del secondo anno per studenti delle lauree in Fisica, Matematica e Chimica. Per gli studenti degli ultimi due corsi di laurea diversi argomenti si adattano meglio ad un corso di Complementi di Fisica.

Per motivi di praticità si è generalmente portati, nei testi di laboratorio, a fornire una descrizione *disaccoppiata* dei fenomeni elettrici. La parte circuitale risulta abbastanza sconnessa da quella della fenomenologia (campi, ecc...). Abbiamo cercato di compensare questa impostazione, sbagliata a nostro avviso, con alcuni capitoli sugli aspetti fondamentali dell'elettromagnetismo come i campi elettrici e magnetici; in diversi casi vi si trovano anche alcune esperienze particolarmente significative per evidenziare il contenuto fisico dei fenomeni (come per esempio nel caso dell'induzione elettromagnetica).

Naturalmente il corpo principale del testo verte sullo studio dei circuiti elettrici, partendo dal caso stazionario, passando per il regime sinusoidale e finendo con lo studio dei fenomeni transitori. Diverse esperienze sono quelle classiche, immancabili in un corso di laboratorio (filtri, risonanza, ecc...), ma ci sono anche alcune realizzazioni piuttosto originali (per esempio l'analizzatore spettrale, i sistemi di oscillatori accoppiati o la linea di trasmissione) che permettono di sviluppare approfondimenti e interessanti analogie con altri settori della Fisica.

Un intero capitolo è stato dedicato all'analisi delle reti lineari; partendo da quelle elettriche si è giunti fino alla presentazione più generale dei sistemi lineari e della loro analisi in frequenza con la trasformata di Fourier. Naturalmente lo scopo non è quello di fornire una trattazione esauriente, che lo studente ritroverà in corsi più avanzati, ma piuttosto quello di evidenziare il contenuto fisico del problema, e stimolare l'interesse degli studenti più intraprendenti. A questo proposito nel testo si trovano, in diversi punti, alcuni riferimenti a tematiche di ricerca attuali con gli opportuni riferimenti bibliografici.

Il libro è completato da alcune appendici; la prima verte sugli aspetti strumentali e

si presentano gli strumenti tipici del laboratorio (oscilloscopio e multmetro). La seconda riporta i risultati matematici necessari per le trattazioni teoriche. Un'ultima appendice affronta invece diversi approfondimenti di natura fenomenologica che vengono raramente discussi nei normali testi pur avendo una grande importanza sia concettuale che applicativa.

Riguardo la bibliografia abbiamo preferito inserire i riferimenti direttamente nel corpo del testo invece di un elenco finale scorrelato dagli argomenti; questa scelta ricalca quella della letteratura scientifica e l'idea è quella di stimolare puntualmente l'interesse del lettore. Le opere citate, pur riflettendo i gusti degli autori, sono varie, moderne e comprendono testi che seguono le diverse impostazioni didattiche (italiana, anglosassone e francese) con lo scopo di farne scoprire le differenze e i rispettivi pregi. Alcune opere sono dei grandi classici del campo e vi sono anche alcuni riferimenti agli articoli originali con lo scopo di iniziare qualche lettore alla letteratura scientifica avanzata. I riferimenti alla rete informatica sono abbastanza limitati poiché, in generale, gli studenti già dominano facilmente questa interessante fonte di informazione.

Il problema delle notazioni è sempre abbastanza complesso in un testo scientifico; abbiamo adottato le notazioni matematiche attualmente più diffuse in letteratura (grassetto per le grandezze vettoriali, ecc...) e la rappresentazione numerica che usa la virgola per separare la parte intera da quella decimale. Come tradizione in elettricità, si è scelto il simbolo  $j$  per l'unità immaginaria onde evitare possibili confusioni con la corrente  $i$ . Per la rappresentazione complessa di una grandezza  $A$  abbiamo seguito la tradizionale notazione  $\hat{A}$ ; per le altre grandezze fisiche si è adottata una notazione che riducesse al minimo le ambiguità al prezzo di sacrificare qualche consolidata abitudine (per esempio  $\rho$  è la densità di carica e dunque per la resistività usiamo  $\eta$ ). Le unità di misura sono quelle del Sistema Internazionale tranne nelle rare occasioni in cui, come consuetudine in elettrotecnica, si usano unità speciali (per esempio per distinguere le varie forme di potenza elettrica).

# Capitolo 1

## Le grandezze elettriche, i circuiti e i loro componenti

### 1.1 Le principali grandezze elettriche

In questo paragrafo descriveremo le principali grandezze elettriche rilevanti per lo studio dei circuiti, la descrizione sarà estremamente succinta e per i necessari approfondimenti rimandiamo sia alla bibliografia ([1]), sia al paragrafo ??.

#### 1.1.1 La carica, il campo e il potenziale elettrico

##### La carica elettrica

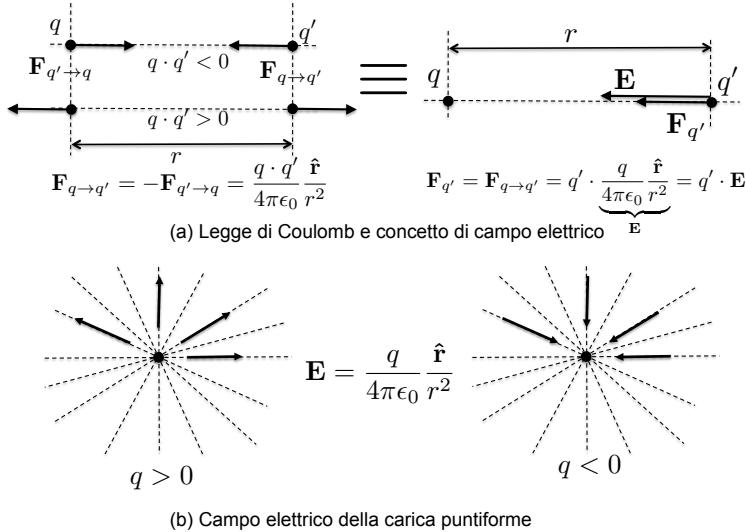
Tutti i fenomeni elettrici e magnetici che osserviamo sono riconducibili ad una nuova grandezza fisica, chiamata carica elettrica  $q$ , di valori sia positivi che negativi, la cui unità di misura nel Sistema Internazionale è il Coulomb (C). La legge fondamentale, schematizzata in figura 1.1(a), che regola le interazioni tra cariche puntiformi<sup>1</sup> va sotto il nome di legge di Coulomb e stabilisce che due cariche  $q$  e  $q'$  si attraggono o si respingono (a seconda del segno delle cariche) con una forza che è direttamente proporzionale al prodotto delle cariche e inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza  $r$ . La direzione del vettore  $\mathbf{F}$  corrisponde alla retta congiungente le posizioni di  $q$  e  $q'$ , pertanto la forza elettrica si scrive:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q q'}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (1.1)$$

dove  $\epsilon_0$  è detta costante dielettrica del vuoto e vale  $\epsilon_0 = 8,854187817\ldots \cdot 10^{-12} \text{C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$ .

---

<sup>1</sup>Per corpo puntiforme si intende sempre, in Fisica, corpi le cui dimensioni spaziali siano trascurabili nei confronti delle distanze tipiche in gioco nell'esperimento considerato.



**Figura 1.1:** La forza di Coulomb e il concetto di campo elettrico

Per le interazioni fra le cariche risulta sperimentalmente verificato il principio di sovrapposizione, secondo il quale la presenza di cariche ulteriori non altera l'interazione tra due singole cariche. Se abbiamo un sistema di  $n$  cariche  $q_1, q_2 \dots q_n$ , la forza che si esercita sulla carica  $i$ -esima è:

$$\mathbf{F}_i = \sum_{j \neq i}^n \frac{q_i q_j}{4\pi\epsilon_0 r_{ij}^2} \hat{\mathbf{r}}_{ij} \quad (1.2)$$

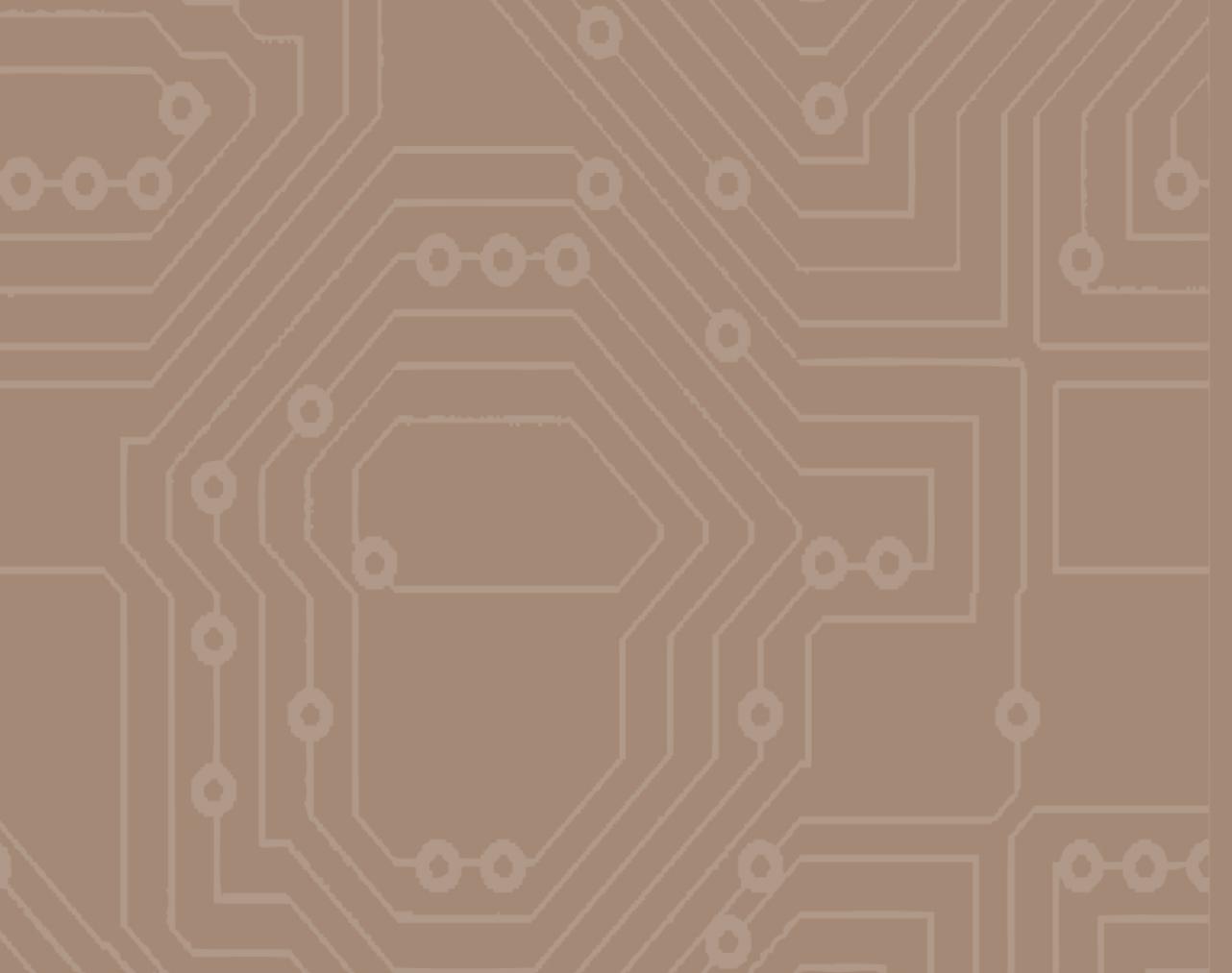
Sappiamo oggi che la carica elettrica è una caratteristica intrinseca delle particelle elementari che compongono la materia; la carica dell'elettrone è la più piccola carica elettrica osservabile e il suo valore è detto carica *elementare* e vale  $q_e = -1,602176487(40) \cdot 10^{-19} \text{ C}$  [42]; approfondiremo questa tematica nel paragrafo 11.1.3. Infine, la carica elettrica è una grandezza quantizzata nel senso che è possibile realizzare solo cariche elettriche il cui valore sia multiplo intero di quella elementare. Tuttavia, dato il valore estremamente piccolo della carica elementare, in quasi tutti i fenomeni macroscopici la carica elettrica può essere considerata una grandezza *continuità*.

## Il campo e il potenziale elettrico

Consideriamo di nuovo la legge di Coulomb (1.1) e sostituiamo la carica  $q'$  con una nuova carica  $q''$ , il modulo della forza di Coulomb sarà ora:

$$F'' = \frac{q q''}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (1.3)$$





€ 26,00

