

P. Mazzoldi • M. Nigro • C. Voci

Fisica

Elettromagnetismo e Onde

III Edizione

a cura di
R.C. Iotti
G. Barbero



Accedi all'ebook e ai contenuti digitali

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

▼
**COLLEGATI AL SITO
EDISESUNIVERSITA.IT**

▼
**ACCESSI AL
MATERIALE DIDATTICO**

▼
**SEGUICI LE
ISTRUZIONI**

Utilizza il codice personale contenuto nel riquadro per registrarti al sito **edisesuniversita.it** e attivare la tua **area riservata**. Potrai accedere alla **versione digitale** del testo e a ulteriore **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 email 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'email 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.
- **Software di simulazione:** un vastissimo database di quesiti a risposta multipla per effettuare esercitazioni sull'**intero programma** o su **argomenti specifici**.

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

P. Mazzoldi · M. Nigro · C. Voci

FISICA

VOLUME II

Elettromagnetismo e Onde

TERZA EDIZIONE

Edizione a cura di R.C. Iotti, G. Barbero

Politecnico di Torino



P. Mazzoldi · M. Nigro · C. Voci
FISICA – Volume II – Elettromagnetismo e Onde – III Edizione
a cura di R.C. Iotti, G. Barbero

Copyright @ 2021, 1998, 1991 EdiSES Edizioni S.r.l. – Napoli

9 8 7 6 5 4 3 2 1 0
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.

Fotocomposizione: domabook di Massimo Di Grazia – Napoli

Stampato presso la
Tipografia Sograte S.r.l. – Zona Ind. Regnano – Città di Castello (PG)

per conto della
EdiSES Edizioni S.r.l. – Piazza Dante Alighieri, 89 – Napoli

www.edisesuniversita.it
assistenza.edises.it

ISBN 978 88 3623 030 3

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

PREFAZIONE ALLA TERZA EDIZIONE

Le fasi di riedizione sono inevitabili nella vita di ogni buon libro di testo. Ne testimoniano e al tempo stesso ne stimolano la vitalità. La prima edizione dei due volumi di “Fisica” di Paolo Mazzoldi, Massimo Nigro e Cesare Voci, allora docenti già da diversi anni di corsi di Fisica generale presso la Facoltà di Ingegneria dell’Università degli Studi di Padova, viene pubblicata da EdiSES nel 1991 e subito accolta con grande interesse e apprezzamento a livello nazionale. Dopo una seconda edizione, nel 1998, e numerose ristampe, gli autori hanno iniziato, diversi anni fa, un’opera di revisione e aggiornamento, senza poterla purtroppo portare a termine. È toccato a noi, su invito della casa editrice, concludere il loro lavoro sul secondo volume. Il materiale era molto: andava rivisto, riorganizzato e ridimensionato per ritrovare l’equilibrio di un testo completo, rigoroso e allo stesso tempo maneggevole. Abbiamo cercato di farlo in modo da ottenere un risultato che mantenesse il più possibile l’identità e l’impianto originali dell’opera, immedesimandoci negli autori che purtroppo non avevamo avuto il piacere di conoscere personalmente. Dove ciò non è avvenuto è stato perché, sulla base della nostra esperienza di docenti, soprattutto in questi ultimi anni di grandi cambiamenti nel sistema universitario italiano, abbiamo ritenuto più opportune modifiche e interventi che migliorassero la fruibilità attuale dell’opera.

Gli argomenti trattati nei due volumi di “Fisica” (volume I Meccanica e Termodinamica, volume II Elettromagnetismo e Onde) fanno parte del programma degli insegnamenti di Fisica generale in Scuole universitarie e Facoltà di Ingegneria e di Scienze matematiche, fisiche e naturali. Il presente volume, in particolare, tratta l’elettromagnetismo classico e l’ottica, geometrica e ondulatoria. Gli argomenti dei vari capitoli sono introdotti partendo dalla descrizione di esperimenti e vengono poi formalizzati in termini matematici via via più generali e rigorosi.

Rispetto alla precedente edizione, i cambiamenti principali nella struttura del testo sono stati motivati dall’intenzione di mantenere la complementarietà con il primo volume, evitando le ridondanze soprattutto negli aspetti generali dei fenomeni ondulatori.

Il volume inizia con un’analisi dell’interazione elettrostatica in termini di campo dapprima nel vuoto, Capitoli 1, 2 e 3, e poi in presenza di conduttori, Capitolo 4, e di mezzi polarizzabili, Capitolo 5. Alla corrente elettrica, con particolare riguardo ai regimi stazionari e quasi stazionari, è dedicato il Capitolo 6. Nel Capitolo 7 viene introdotto il campo magnetostatico e ne vengono discussi gli effetti sulle cariche in moto. Le correnti elettriche come sorgenti di campo magnetico sono oggetto del Capitolo 8, mentre il Capitolo 9 presenta e descrive le proprietà dei materiali dia-, para- e ferromagnetici. L’analisi dei campi elettrici e magnetici in regime dinamico nel vuoto e nella materia è contenuta nel Capitolo 10, dove sono presentate e discusse le equazioni di Maxwell. I circuiti elettrici in regime alternato sono trattati nel Capitolo 11. Lo studio delle onde elettromagnetiche nel vuoto, con particolare attenzione alle onde piane, è presentato nel Capitolo 12. All’ottica, geometrica e fisica, sono dedicati i Capitoli 13, 14, 15 e 16. Il Capitolo 17 è dedicato alla propagazione delle onde elettromagnetiche nei mezzi materiali. I Capitoli 18 e 19, infine, trattano il tema della crisi della fisica classica e della transizione alle basi della fisica moderna, con particolare riferimento alla meccanica quantistica e alle sue implicazioni metodologiche e pratiche.

La veste grafica di questa nuova edizione è senz’altro cambiata rispetto alla precedente. Le figure sono state rifatte in quadricromia; nuove figure e immagini sono state aggiunte. Come conclusione di ogni capitolo sono stati inseriti un Riepilogo dei concetti e dei risultati principali in esso contenuti e un elenco di Quesi-

ti utili a verificare la comprensione e a stimolare la riflessione su quanto appreso. Numerosi restano sia gli Esempi, risolti in dettaglio all'interno dei vari capitoli, che i Problemi, proposti alla fine degli stessi e la cui soluzione è riportata in Appendice. Particolare cura è stata dedicata all'individuazione dei refusi e alla loro correzione. Sono state infine aggiunte quattro Appendici: le prime due presentano i complementi matematici utili per un'analisi formale dei campi, la terza riporta le indicazioni per la soluzione e il risultato finale di tutti gli esercizi proposti, la quarta contiene una tabella delle principali costanti fisiche secondo l'ultima ridefinizione del Sistema Internazionale, entrata in vigore il 20 Maggio 2019.

Per non appesantire l'edizione cartacea, alcuni contenuti opzionali e aggiuntivi, sotto forma di paragrafi, esempi e note, sono ora consultabili in formato digitale negli Ulteriori approfondimenti in ebook, a cui si accede collegandosi al sito www.edisesuniversita.it e seguendo la procedura indicata nella prima pagina del libro. Lungo il testo la numerazione di tali contenuti è preceduta dalla lettera E.

Durante il nostro lavoro sul testo abbiamo avuto occasione di confrontarci con diversi colleghi; vogliamo ricordare Marzia Nardi e Miguel Onorato dell'Università degli Studi di Torino, Michele Livan e Daniela Rebuzzi dell'Università degli Studi di Pavia, Fabrizio Giorgis, Francesco Raffa e Giovanni Ummarino del Politecnico di Torino, che ringraziamo per la disponibilità e l'attenzione dimostrata. Ringraziamo Francesco Michelotti e Stefano Atzeni, curatori della nuova edizione del primo volume, per le varie e stimolanti occasioni di confronto avute. Infine, desideriamo esprimere un ringraziamento particolare a Massimo Nigro, per la fiducia che ci ha riservato e l'entusiasmo con cui ha accolto i nostri interventi più incisivi.

Abbiamo posto grande attenzione nella stesura di questa nuova edizione. Nonostante questo, potrebbero essere rimasti dei refusi o delle imprecisioni; siamo fin da ora grati a quanti vorranno segnalarcene la presenza, unitamente ai loro commenti e alle loro osservazioni.

Torino, Luglio 2021

Rita Claudia IOTTI, Giovanni BARBERO
Politecnico di Torino

INDICE GENERALE

CAPITOLO 1

Forza elettrostatica. Campo elettrostatico

1.1	Cariche elettriche. Isolanti e conduttori	1
	<i>Elettroscopio a foglie</i>	3
1.2	Struttura elettrica della materia	4
	<i>Induzione elettrostatica</i>	6
1.3	Misura delle cariche elettriche. Legge di Coulomb	7
	<i>Forma vettoriale della legge di Coulomb</i>	10
1.4	Campo elettrostatico	12
1.5	Campo elettrostatico prodotto da una distribuzione continua di cariche	16
1.6	Linee di forza del campo elettrostatico	21
1.7	Moto di una carica in un campo elettrostatico. Esperienza di Rutherford	23
	<i>Esperienza di Rutherford</i>	24
1.8	Commenti conclusivi	26
	Riepilogo	28
	Quesiti	28
	Problemi	29
	Ulteriori approfondimenti in ebook del Capitolo 1	70
E1.1	Determinazione della carica elementare. Esperienza di Millikan	
E1.2	Esperienza di Rutherford: derivazione dell'equazione 1.38	

CAPITOLO 2

Lavoro elettrico. Potenziale elettrostatico

2.1	Lavoro della forza elettrica. Tensione, potenziale	33
2.2	Calcolo del potenziale elettrostatico	36
2.3	Energia potenziale elettrostatica	40
2.4	Moto di una carica nel campo elettrostatico. Conservazione dell'energia	42
	<i>Modello atomico di Bohr-Sommerfeld</i>	47
2.5	Campo elettrostatico come gradiente del potenziale elettrostatico	49
2.6	Superfici equipotenziali	54
2.7	Rotore di un campo vettoriale. Teorema di Stokes. Applicazione al campo elettrostatico ..	56
2.8	Dipolo elettrico	59
2.9	Potenziale di un sistema di cariche nell'approssimazione di dipolo	62
2.10	Forza su un dipolo elettrico	65

<i>Dipolo elettrico in campo elettrico non uniforme</i>	67
<i>Interazione tra dipoli</i>	69
Riepilogo	70
Quesiti	71
Problemi	72

Ulteriori approfondimenti in ebook del Capitolo 2

E2.1	Visualizzazione delle linee di forza
E2.2	Interazione tra dipoli in geometrie particolari

CAPITOLO 3

Legge di Gauss

3.1	Flusso del campo elettrostatico. Legge di Gauss	75
3.2	Dimostrazione della legge di Gauss	77
3.3	Alcune applicazioni e conseguenze della legge di Gauss	80
3.4	Campo elettrostatico nell'intorno di uno strato superficiale di carica	86
3.5	Legge di Gauss in forma differenziale. Divergenza di un campo vettoriale	87
	<i>Campi vettoriali solenoidali</i>	89
3.6	Equazioni di Maxwell per l'elettrostatica. Equazioni di Poisson e di Laplace	90
3.7	Commenti conclusivi	92
	Riepilogo	93
	Quesiti	94
	Problemi	94

CAPITOLO 4

Conduttori. Energia elettrostatica

4.1	Conduttori in equilibrio	97
4.2	Capacità di un conduttore isolato	100
4.3	Conduttore cavo. Schermo elettrostatico	102
	<i>Conduttori cavi con all'interno cariche elettriche</i> ..	103
4.4	Sistemi di conduttori	108
4.5	Condensatori	110
4.6	Collegamento di condensatori	113
	<i>Condensatori in parallelo</i>	113
	<i>Collegamento in serie</i>	114
4.7	Energia del campo elettrostatico	116
4.8	Energia potenziale elettrostatica di un sistema di cariche	119

4.9	Forza tra le armature di un condensatore. Pressione elettrostatica	123
4.10	Metodo delle cariche immagini	127
	Riepilogo	131
	Quesiti	132
	Problemi	133
	Ulteriori approfondimenti in ebook del Capitolo 4	0
E4.1	Induzione elettrostatica su una sfera conduttrice: calcolo del campo	
E4.2	Funzioni armoniche. Problema di Dirichlet	
	Esempio E4.1 <i>Quadrupolo elettrostatico</i>	

CAPITOLO 5

Dielettrici

5.1	Costante dielettrica	137
5.2	Polarizzazione dei dielettrici	140
5.3	Campo elettrostatico prodotto da un dielettrico polarizzato	142
5.4	Campo elettrostatico all'interno di un dielettrico polarizzato	145
5.5	Equazioni generali dell'elettrostatica in presenza di dielettrici. Vettore induzione dielettrica	146
5.6	Dipendenza della polarizzazione dal campo elettrostatico. Dielettrici isotropi e anisotropi ..	149
5.7	Discontinuità dei campi sulla superficie di separazione tra due dielettrici	151
	<i>Definizione operativa del campo elettrostatico e dell'induzione dielettrica</i>	153
5.8	Campi elettrostatici all'interno di cavità in un dielettrico polarizzato	157
5.9	Energia elettrostatica nei dielettrici	157
5.10	Meccanismi di polarizzazione nei dielettrici isotropi	162
	<i>Polarizzazione elettronica in un gas</i>	162
	<i>Polarizzazione per orientamento nei gas</i>	163
5.11	Costante dielettrica dei liquidi. Equazione di Clausius-Mossotti	167
	Riepilogo	169
	Quesiti	170
	Problemi	170
	Ulteriori approfondimenti in ebook del Capitolo 5	0
	Esempio E5.1 <i>Costante dielettrica dell'azoto</i>	
	Esempio E5.2 <i>Suscettività elettrica del vapor d'acqua</i>	
E5.1	Cenno ai meccanismi di polarizzazione nei solidi	

CAPITOLO 6

Corrente elettrica

6.1	Conduzione elettrica	175
6.2	Corrente elettrica	177

6.3	Legge di conservazione della carica. Regime di corrente stazionaria	180
6.4	Modello classico della conduzione elettrica. Legge di Ohm	182
6.5	Legge di Ohm per i conduttori metallici. Resistenza elettrica. Effetto Joule	185
	<i>Effetti termici</i>	187
	<i>Potenza. Effetto Joule</i>	188
	<i>Materiali superconduttori</i>	190
6.6	Resistori in serie e in parallelo	191
	<i>Resistori in serie</i>	191
	<i>Resistori in parallelo</i>	192
6.7	Forza elettromotrice	193
	<i>Campo elettromotore di un generatore</i>	194
6.8	Generatore Van de Graaf	198
6.9	Carica e scarica di un condensatore attraverso un resistore	199
	<i>Carica di un condensatore</i>	199
	<i>Scarica di un condensatore</i>	201
6.10	Leggi di Kirchhoff per le reti elettriche	203
6.11	Calcolo della resistenza di conduttori tridimensionali	207
	Riepilogo	208
	Quesiti	210
	Problemi	211
	Ulteriori approfondimenti in ebook del Capitolo 6	0
E6.1	Conduttori non ohmici	
E6.2	Forza elettromotrice nel generatore di Van de Graaf	
	Nota E6.1 <i>Defibrillatore medico</i>	
E6.3	Alcuni circuiti particolari in corrente continua	
	Esempio E6.1 <i>Scale di un amperometro e di un voltmetro</i>	
E6.4	Conduzione elettrolitica	
	Nota E6.2 <i>Pressione osmotica</i>	
E6.5	Pile e accumulatori	

CAPITOLO 7

Campo magnetico. Forza magnetica

7.1	Primi fatti sperimentali sull'interazione magnetica	217
	<i>Elettricità e magnetismo</i>	219
7.2	Linee del campo magnetico. Legge di Gauss per il campo magnetico	221
	<i>Campo elettrostatico e campo magnetico</i>	223
7.3	Forza magnetica su una carica in moto. Moto di una particella carica in campo magnetico ..	225
	<i>Moto in un campo magnetico uniforme, $\theta = \pi/2$</i> ..	227
	<i>Moto in un campo magnetico uniforme, θ generico</i> ..	229
7.4	Forza magnetica su un conduttore percorso da corrente	230
7.5	Momenti meccanici su circuiti piani. Principio di equivalenza di Ampère	233

Espressioni di forza, momento e lavoro tramite il flusso magnetico 239

7.6 Effetto Hall 241

7.7 Esempi di moti di particelle cariche in campo magnetico uniforme 243

Spettrometri di massa 244

Selettore di velocità. Spettrometro di Bainbridge 246

Ciclotrone 247

Riepilogo 249

Quesiti 250

Problemi 251

Ulteriori approfondimenti in ebook del Capitolo 7 

Nota E7.1 *Bottiglia magnetica, fasce di Van Allen e vento solare*

E7.1 Spettrometro di Thomson

E7.2 Esperienza di Bucherer

E7.3 Effetti relativistici

Esempio E7.3 *Ciclotrone per particelle α*

CAPITOLO 9

Proprietà magnetiche della materia

9.1 Osservazioni sperimentali. Magnetizzazione della materia 283

9.2 Permeabilità magnetica e suscettività magnetica 285

Sostanze diamagnetiche 287

Sostanze paramagnetiche 287

Sostanze ferromagnetiche 288

9.3 Correnti amperiane e magnetizzazione 288

9.4 Equazioni generali della magnetostatica. Il campo H 292

9.5 Sostanze ferromagnetiche. Ciclo d'isteresi 297

9.6 Discontinuità dei campi sulla superficie di separazione tra due mezzi magnetizzati. Campi all'interno di una cavità 299

9.7 Confronto tra le leggi dell'elettrostatica e della magnetostatica in mezzi omogenei indefiniti 303

Mezzi lineari omogenei 304

9.8 Circuiti magnetici 305

9.9 Elettromagneti. Magneti permanenti 309

Magnete permanente a C 312

Magnete permanente cilindrico 313

9.10 Teoria microscopica del magnetismo nella materia 315

Riepilogo 316

Quesiti 317

Problemi 317

Ulteriori approfondimenti in ebook del Capitolo 9 

Esempio E9.1 *Quadrupolo magnetico*

E9.1 Poli magnetici

E9.2 Correnti elettriche e momenti magnetici atomici

Esempio E9.2 *Corrente orbitale nell'atomo d'idrogeno*

Esempio E9.3 *Momento magnetico di una sfera carica in rotazione*

E9.3 Precessione di un atomo in campo magnetico

E9.4 Diamagnetismo e paramagnetismo da un punto di vista classico

Esempio E9.4 *Stima della suscettività magnetica del rame*

Esempio E9.5 *Suscettività magnetica di una sostanza paramagnetica*

E9.5 Il magnetismo secondo la meccanica quantistica

E9.6 Cenno alla teoria del ferromagnetismo

CAPITOLO 10

Campi elettrici e magnetici variabili nel tempo

10.1 Introduzione 321

Forza elettromotrice di un campo elettrico 322

Flusso del campo magnetico 322

CAPITOLO 8

Sorgenti del campo magnetico. Legge di Ampère

8.1 Campo magnetico prodotto da una corrente 255

Campo magnetico prodotto da una carica in moto 257

8.2 Calcoli di campi magnetici prodotti da circuiti particolari 258

Filo rettilineo indefinito. Legge di Biot-Savart 258

Spira circolare 260

Interazione mutua dipolo magnetico-dipolo magnetico 262

Solenoide rettilineo 263

8.3 Azioni elettrodinamiche tra circuiti percorsi da corrente 266

8.4 Legge di Ampère 269

8.5 Proprietà del campo magnetostatico nel vuoto 274

Discontinuità del campo magnetico 275

8.6 Relatività dei campi elettrici e magnetici 276

Riepilogo 277

Quesiti 278

Problemi 279

Ulteriori approfondimenti in ebook del Capitolo 8 

E8.1 Confronto tra campo elettrostatico e magnetostatico di distribuzioni lineari

Nota E8.1 *Campo magnetico terrestre*

Esempio E8.1 *Legge di Ampère per una spira*

Esempio E8.2 *Effetti geometrici della corrente sul campo magnetico di un solenoide rettilineo*

E8.3 Trasformazione relativistica dei campi

10.2	Legge di Faraday dell'induzione elettromagnetica.	323	Serie RLC	386
	Legge di Lenz.	325	Impedenza.....	386
10.3	Origine fisica della forza elettromotrice indotta	326	Elementi in parallelo. Ammettenza	388
	Moto traslatorio di un conduttore in un campo magnetico	327	Parallelo RL	388
	Campi elettrici indotti da variazioni temporali di campo magnetico	330	Parallelo RC	388
10.4	Applicazioni della legge di Faraday.....	331	Parallelo LC	389
	Attrito elettromagnetico. Generatori.....	331	Parallelo RLC.....	389
	Generatore di corrente sinusoidale.....	333	11.4 Potenza in regime alternato	391
	Motori elettrici	335	11.5 Trasformatore ideale	393
	Correnti di Foucault.....	337	Riepilogo.....	395
10.5	Legge di Felici. Misure di campo magnetico ..	338	Quesiti.....	396
10.6	Autoinduzione	339	Problemi	397
10.7	Energia magnetica	343	Ulteriori approfondimenti in ebook del Capitolo 11	⌚
	Energia magnetica in presenza di materiali magnetici.....	346	E11.1 Metodo simbolico per circuiti in corrente alternata	
10.8	Induzione mutua	349	Esempio E11.1 Calcolo di impedenze e ammettenze	
10.9	Energia magnetica di circuiti accoppiati	352	Esempio E11.2 Circuito in alternata con due maglie	
10.10	Corrente di spostamento. Legge di Ampère-Maxwell.	356	E11.2 Alcune applicazioni	
10.11	Equazioni di Maxwell.....	360	Esempio E11.3 Trasformatore	
	Riepilogo.....	363	Esempio E11.4 Bilancio di potenza in un trasformatore	
	Quesiti.....	364	E11.3 Generatori e motori	
	Problemi	366		
	Ulteriori approfondimenti in ebook del Capitolo 10	⌚		
E10.1	Betatron			
Nota E10.1	Un magnete superconduttore per esperimenti di fisica subnucleare			
E10.2	Pressione magnetica. Forze su corpi magnetizzati			
E10.3	Energia magnetica di n circuiti accoppiati			
CAPITOLO 11				
Oscillazioni elettriche. Correnti alternate				
11.1	Oscillazioni smorzate in un circuito <i>RLC</i>	373	12.1 Onde elettromagnetiche piane	401
	Circuito LC in serie	374	Pacchetti d'onde.....	406
	Circuito RLC in serie.....	376	Propagazione di un'onda elettromagnetica in un dielettrico trasparente	409
11.2	Oscillazioni permanenti in un circuito <i>RLC</i>	378	12.2 Polarizzazione delle onde elettromagnetiche piane.....	411
	Risonanza	378	12.3 Energia di un'onda elettromagnetica piana. Vettore di Poynting	414
	Risonanza	380	12.4 Quantità di moto di un'onda elettromagnetica piana. Pressione di radiazione	419
11.3	Circuiti in corrente alternata. Impedenza	382	Ulteriori precisazioni su energia e quantità di moto di un'onda elettromagnetica	421
	Resistore R.....	382	12.5 Onde elettromagnetiche piane, sferiche, cilindriche	423
	Induttore L	382	12.6 Radiazione elettromagnetica prodotta da un dipolo elettrico oscillante	430
	Condensatore C	383	Dipolo magnetico oscillante	434
	Collegamento in serie	384	Cenni sull'irraggiamento di una carica accelerata	434
	Serie RL	384	12.7 Radiazione emessa dagli atomi. Diffusione della luce	435
	Serie RC	385	Diffusione della luce	438
	Serie LC	385	12.8 Spettro delle onde elettromagnetiche	440
	Ulteriori approfondimenti in ebook del Capitolo 12	⌚	Riepilogo.....	445

E12.1 Irraggiamento: applicazioni della formula di Larmor
Esempio E12.1 <i>Irraggiamento di un protone in un Van de Graaf</i>
Nota E12.1 <i>I grandi acceleratori del CERN: Centro Europeo Ricerche Nucleari di Ginevra</i>
E12.2 Effetto Doppler. Effetto Čerenkov
Esempio E12.2 <i>Velocità di una galassia</i>
E12.3 Velocità della luce

CAPITOLO 13

Riflessione e rifrazione delle onde

13.1 Introduzione	449
13.2 Teorema di Kirchhoff. Principio di Huygens-Fresnel	450
13.3 Leggi della riflessione e della rifrazione	453
<i>Riflessione e rifrazione della luce</i>	455
13.4 Intensità delle onde elettromagnetiche riflesse e rifratte. Formule di Fresnel	458
<i>Intensità riflessa e rifratta per onde polarizzate nel piano di incidenza</i>	459
<i>Intensità riflessa e rifratta per onde polarizzate ortogonalmente al piano di incidenza</i>	461
<i>Incidenza normale alla superficie di separazione</i>	463
<i>Intensità riflessa e rifratta. Caso generale</i>	465
<i>Angolo di Brewster. Polarizzazione per riflessione</i>	469
13.5 Propagazione di un'onda piana elettromagnetica in un mezzo anisotropo. Birifrangenza	473
<i>Lastra a facce piane e parallele</i>	474
13.6 Applicazioni della birifrangenza	474
<i>Cristalli dicroici</i>	475
<i>Polarizzatori e analizzatori</i>	475
<i>Lamine di ritardo</i>	479
<i>Polarizzazione cromatica</i>	482
13.7 Birifrangenza elettrica, magnetica e meccanica	484
13.8 Attività ottica	485
<i>Effetto Faraday</i>	487
Riepilogo	488
Quesiti	489
Problemi	491
Ulteriori approfondimenti in ebook del Capitolo 13	500
E13.1 Arcobaleno	
E13.2 Riflessione e rifrazione di onde elastiche	
Esempio E13.1 <i>Analisi polarimetrica della luce riflessa</i>	
E13.3 Rifrazione anomala. Fotoelasticità	

CAPITOLO 14

Ottica geometrica

14.1 Leggi della riflessione e della trasmissione	497
14.2 Definizioni e convenzioni	499
14.3 Specchi	501
<i>Specchio sferico convesso</i>	504
<i>Specchio piano</i>	506
<i>Ingrandimento longitudinale degli specchi</i>	506
14.4 Diottri	507
<i>Diottro piano</i>	510
14.5 Lenti	511
<i>Lenti semplici sottili</i>	511
<i>Ingrandimento longitudinale di una lente</i>	514
<i>Lenti spesse. Sistemi diottrici centrati</i>	515
14.6 Dispersione. Prisma	520
14.7 Princípio di Fermat	521
Riepilogo	523
Quesiti	524
Problemi	524

Ulteriori approfondimenti in ebook del Capitolo 14

Nota E14.1 *Forma dell'immagine della luce Čerenkov*

E14.1 Aberrazioni

E14.2 Occhio umano

Esempio E14.1 *Accomodamento dell'occhio emmetropo*

E14.3 Strumenti ottici

Esempio E14.2 *Lente d'ingrandimento*

Esempio E14.3 *Microscopio composto*

Nota E14.2 *Oggetti virtuali*

CAPITOLO 15

Interferenza

15.1 Somma di onde. Fenomeni di interferenza. Sorgenti coerenti e incoerenti	529
<i>Metodo dei vettori rotanti, fasori</i>	530
<i>Metodo simbolico</i>	532
15.2 Interferenza prodotta da due sorgenti di onde sferiche	532
<i>Interferenza da sorgenti incoerenti</i>	535
<i>Onde hertziane</i>	535
<i>Onde sonore</i>	536
15.3 Interferenza di due onde luminose. Esperimento di Young	537
<i>Esperimento di Young</i>	538
<i>Cammino ottico</i>	545
<i>Lenti e specchi</i>	545
15.4 Interferenza prodotta da N sorgenti di onde coerenti	546
15.5 Interferenza della luce su lamine sottili	551
<i>Calcolo dell'intensità della luce riflessa</i>	553

<i>Strati antiriflettenti</i>	555
<i>Cuneo sottile</i>	557
<i>Anelli di Newton</i>	557
15.6 Onde elettromagnetiche stazionarie. Esperienza di Hertz	558
15.7 Onde stazionarie tridimensionali	561
Riepilogo	562
Quesiti	563
Problemi	564

Ulteriori approfondimenti in ebook del Capitolo 15

E15.1 Misura della velocità del suono. Tubo di Quincke	0
E15.2 Applicazioni del metodo di Young	
E15.3 Frange di eguale inclinazione. Interferometro di Michelson	
E15.4 Interferenza con riflessioni e trasmissioni multiple	
Esempio E15.1 <i>Interferometro di Fabry-Pérot</i>	

CAPITOLO 16

Difrazione

16.1 Fenomeni di diffrazione di Fraunhofer e di Fresnel	567
<i>Difrazione di Fresnel</i>	568
<i>Difrazione di Fraunhofer</i>	568
16.2 Diffrazione da una fenditura rettilinea	568
16.3 Diffrazione da un foro circolare e da parte di un disco opaco	572
<i>Difrazione di Fraunhofer da un disco opaco</i>	574
16.4 Limite di risoluzione delle lenti	576
16.5 Reticolo di diffrazione	577
16.6 Potere dispersivo e potere risolutivo di un reticolo di diffrazione e di un prisma	581
<i>Reticolo di diffrazione</i>	581
<i>Potere dispersivo di un reticolo</i>	582
<i>Potere risolutivo di un reticolo</i>	582
<i>Dispersione e potere risolutivo di un prisma</i>	584
16.7 Spettroscopia con il reticolo di diffrazione	586
<i>Spettri di assorbimento</i>	588
16.8 Fenomeni di diffrazione di Fresnel	589
<i>Difrazione da un foro circolare</i>	592
<i>Reticolo zonato di Soret</i>	594
<i>Difrazione da un disco opaco</i>	594
<i>Difrazione da un ostacolo piano</i>	596
16.9 Olografia	597
16.10 Diffrazione dei raggi X	598
Riepilogo	599
Quesiti	601
Problemi	602

Ulteriori approfondimenti in ebook del Capitolo 16

E16.1 Potere separatore di un cannocchiale	0
E16.2 Potere separatore di un microscopio	

E16.3 Potere separatore dell'occhio umano, acuità visiva	
Esempio E16.1 <i>Potere separatore dell'occhio umano</i>	
E16.4 Ologramma	
E16.5 Spettrogrammi	

CAPITOLO 17

Propagazione di onde elettromagnetiche nei materiali

17.1 Propagazione di un'onda elettromagnetica in un dielettrico	607
<i>Modello classico dell'atomo sottoposto all'azione di un campo elettrico armonico</i>	607
<i>Propagazione di un'onda elettromagnetica in un dielettrico trasparente</i>	609
<i>Dispersione della luce</i>	614
<i>Velocità di gruppo</i>	615
17.2 Onde elettromagnetiche nei conduttori	618
<i>Ionosfera</i>	620
17.3 Riflessione su una superficie metallica	622
17.4 Radiazione di cavità	624
Riepilogo	627
Quesiti	628
Problemi	628

Ulteriori approfondimenti in ebook del Capitolo 17

E17.1 Cavità risonanti. Guide d'onda	0
Nota E17.1 <i>Campo elettromagnetico in una guida d'onda rettangolare</i>	

CAPITOLO 18

Proprietà corpuscolari e ondulatorie della radiazione e della materia

18.1 Legge di Planck	629
18.2 Effetto fotoelettrico	633
18.3 Effetto Compton. Produzione di coppie	637
<i>Produzione di coppie</i>	640
<i>Coefficiente di assorbimento</i>	641
<i>Aspetto ondulatorio e aspetto corpuscolare della radiazione</i>	642
18.4 Righe spettrali. Modello di Bohr. Livelli energetici	642
<i>Livelli energetici atomici</i>	646
<i>Ionizzazione</i>	647
<i>Raggi X caratteristici</i>	648
<i>Emissione ed assorbimento di fotoni da atomi</i>	
<i>Laser</i>	649
18.5 Onde materiali. Relazione di de Broglie	651
18.6 Princípio di complementarietà. Princípio di indeterminazione	653
<i>Esperienza della doppia fenditura con fotoni</i>	654

<i>Esperienza della doppia fenditura con elettroni</i>	655
<i>Principio di indeterminazione</i>	656
<i>Conseguenze del principio di indeterminazione</i>	658
<i>Costante di Planck</i>	659
18.7 Funzione d'onda di una particella. Equazione di Schrödinger.	661
Riepilogo	664
Quesiti	666
Problemi	667
Ulteriori approfondimenti in ebook del Capitolo 18	⌚
E18.1 Radiazione termica	
E18.2 Legge di Kirchhoff	
E18.3 Corpo nero	
Esempio E18.1 <i>Sferetta all'interno di una cavità</i>	
Esempio E18.2 <i>Radiazione solare</i>	
E18.4 Statistica di Bose-Einstein	
Nota E18.1 <i>Radiazione elettromagnetica cosmica di fondo</i>	
Nota E18.2 <i>Analisi PIXE</i>	
Nota E18.3 <i>Alcune formule utili</i>	

CAPITOLO 19

Proprietà degli elettroni nei solidi

19.1 Struttura atomica	671
<i>Atomo di idrogeno</i>	671
<i>Struttura degli atomi con più elettroni</i>	673
<i>Osservazioni sulla tavola periodica</i>	678
19.2 Legami nelle molecole e nei solidi. Bande di energia	680
<i>Molecole poliatomiche</i>	683
<i>Solidi ionici</i>	686
<i>Solidi covalenti</i>	686
<i>Solidi metallici</i>	687
<i>Solidi molecolari</i>	687
<i>Bande di energia</i>	688
19.3 Modello dell'elettrone libero in un solido	689
<i>Paramagnetismo dei metalli</i>	693
19.4 Gas di elettroni all'interno di un reticolo cristallino.	694
19.5 Conduttori e isolanti. Semiconduttori	697
<i>Semiconduttori intrinseci</i>	697
<i>Semiconduttori estrinseci</i>	699
<i>Giunzione p-n</i>	702

19.6 Supercondutività	704
<i>Effetto Meissner</i>	705
Riepilogo	707
Quesiti	708

Ulteriori approfondimenti in ebook del Capitolo 19 ⌚

E19.1 Potenziale interno del conduttore

Nota E19.1 *Determinazione di eV_0*

E19.2 Modello teorico della superconduttività

Nota E19.2 *Effetto Hall quantistico*

APPENDICE A

Operazioni di gradiente, rotore, divergenza e laplaciano

A.1 Sistemi di coordinate di uso frequente	A.709
<i>Coordinate cartesiane</i>	A.709
<i>Coordinate polari sferiche</i>	A.709
<i>Coordinate cilindriche</i>	A.709
A.2 Gradiente di un campo scalare: ∇V	A.710
A.3 Rotore di un campo vettoriale: $\nabla \times \mathbf{E}$	A.711
A.4 Divergenza di un campo vettoriale: $\nabla \cdot \mathbf{E}$	A.713
<i>Campi solenoidali</i>	A.715
A.5 Laplaciano di un campo scalare: $\nabla^2 V$	A.716

APPENDICE B

Potenziale vettore del campo magnetico. Equazione dei potenziali vettore e scalare

B.1 Potenziale vettore del campo magnetico	B.719
B.2 Equazioni per i potenziali vettore e scalare	B.723

APPENDICE C

Guida alla risoluzione dei problemi. Risultati numerici

C.727

Ulteriori approfondimenti in ebook. ⌚

APPENDICE D

Principali costanti fisiche

D.777

Indice analitico I.779

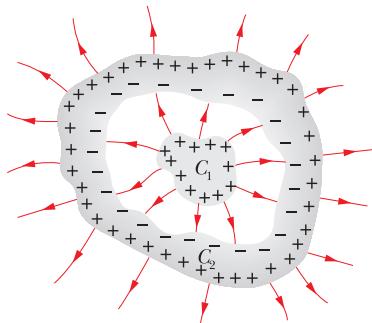


Figura 4.15 Linee di campo di un sistema di due conduttori in condizione di **induzione elettrostatica completa**. Vista in sezione.

Il campo elettrostatico all'interno della cavità è determinato dal valore di q , dalla posizione di C_1 e dalla forma geometrica delle due superfici affacciate. Però, fissato q , all'esterno l'effetto è sempre lo stesso, qualunque siano forma e posizione. Infatti possiamo dire che l'*informazione* sulla situazione interna potrebbe passare all'esterno solo attraverso un campo elettrostatico che penetrasse nel conduttore C_2 : ma questo non è possibile per la proprietà dei conduttori in equilibrio di avere campo elettrostatico nullo all'interno. Al limite si può portare C_1 a contatto con C_2 , con il che le cariche $+q$ e $-q$ si elidono, ma all'esterno non cambia nulla: questo fatto, la cui verifica sperimentale vedremo tra breve, ci fa anche capire che la distribuzione della carica $-q$ sulla faccia interna di C_2 è sempre tale che, sommando l'effetto della carica q di C_1 , il campo elettrostatico dovuto alle cariche nella cavità è nullo all'esterno della cavità.

Analogamente, se variamo la carica sulla superficie esterna oppure variamo la sua distribuzione, ad esempio avvicinando al conduttore un altro corpo carico, cambia il campo elettrostatico all'esterno, ma la distribuzione di carica sulla superficie esterna di C_2 è sempre tale da dare campo elettrostatico nullo all'interno di C_2 e quindi non può alterare il campo locale esistente nella cavità. Come osservato prima, ciò potrebbe avvenire se un campo elettrostatico penetrasse dall'esterno nella massa del conduttore, ma la possibilità è esclusa dalle proprietà di un conduttore in equilibrio.

Pertanto finché lo spazio interno e lo spazio esterno non sono comunicanti:

il conduttore cavo costituisce uno schermo elettrostatico perfetto tra spazio interno e spazio esterno.

Una verifica sperimentale dell'azione di schermo perfetto di un conduttore cavo è la seguente; si introduce, figura 4.16a, una sferetta conduttrice con carica $+q$ supportata da un filo isolante dentro una cavità conduttrice con apertura molto piccola (pozzo di Faraday) e si misura con un elettroscopio collegato alla superficie esterna la carica indotta, che risulta essere $+q$, figura 4.16b. Se muoviamo la sferetta carica all'interno della cavità, facendo variare in tal modo il campo elettro-

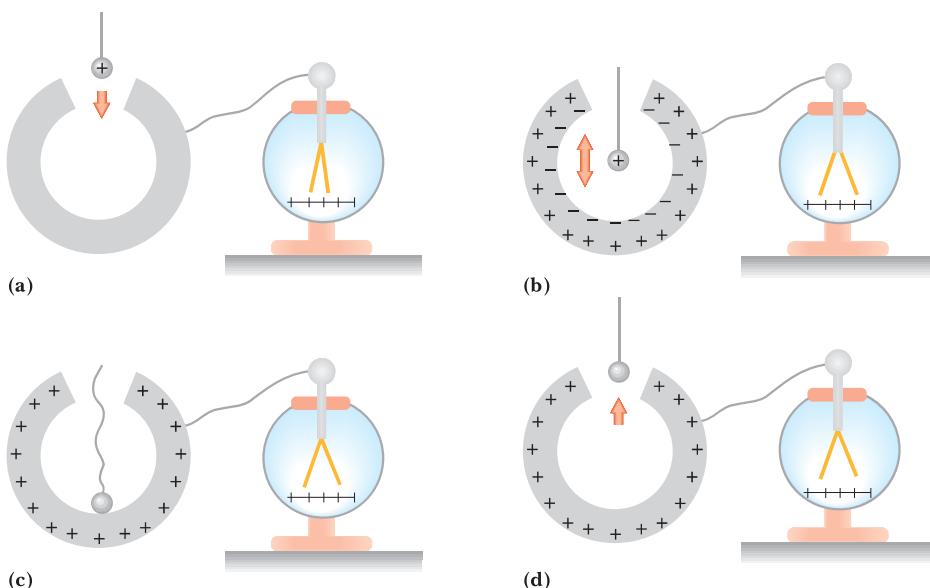


Figura 4.16 Esperimento sull'induzione completa tra due conduttori isolati.

statico all'interno e la distribuzione di carica sulla parete interna della cavità, l'elettroscopio *non segnala* alcuna variazione, nemmeno se caliamo la carica fino a toccare il fondo, figura 4.16c. Estraendo infine la sferetta, figura 4.16d, l'elettroscopio rimane carico. Successivamente poniamo un elettroscopio carico all'interno della cavità, figura 4.17, che esternamente può essere carica o scarica e avviciniamo un corpo carico in modo da variare la distribuzione della carica esterna: si osserva che la deviazione dell'elettroscopio rimane inalterata. In effetti un conduttore cavo scherma lo spazio interno dallo spazio esterno nei due sensi.

Non è necessario che lo schermo sia compatto: esso può avere delle piccole aperture o una struttura a rete; la presenza di queste discontinuità non si avverte a distanze grandi rispetto alle loro dimensioni.

Gli schermi elettrostatici trovano applicazione in laboratorio quando si devono eseguire determinate misure elettrostatiche o più in generale, quando si vuole schermare una strumentazione da disturbi elettromagnetici esterni: in effetti, anche in caso di campi variabili, si ha un'azione di schermo, pur se non completamente efficiente. Una rete metallica, ben collegata conduttrivamente alla terra, inserita nei muri di un edificio lo scherma dalle scariche atmosferiche.

È interessante ricordare che l'azione di schermo elettrostatico venne scoperta da Franklin nel 1755 e completamente verificata da Faraday nella prima metà dell'ottocento; già nel 1773, dodici anni prima che venisse effettuato l'esperimento di Coulomb, Cavendish dedusse dalle proprietà di schermo sperimentate in laboratorio che l'esponente della legge, detta poi di Coulomb, doveva essere $n = 2 \pm 0.02$. In effetti gli esperimenti di precisione per la misura dell'esponente di r nella legge di Coulomb continuano a basarsi sulla verifica dell'azione di schermo elettrostatico, come mostrato in figura 4.18. Si fa variare tramite un generatore G il potenziale del conduttore esterno cavo e si misura la differenza di potenziale tra il conduttore esterno e quello interno, che deve rimanere costante durante la prova. Dagli scostamenti di V dalla costanza si deducono gli scostamenti da 2 dell'esponente n di r . Gli esperimenti più recenti (1971) danno $n - 2 = (2.7 \pm 3.1) \cdot 10^{-16}$, migliorando notevolmente il risultato di Cavendish sopra citato, $n - 2 \approx 2 \cdot 10^{-2}$, e quello di Maxwell (1873), $n - 2 \approx 10^{-5}$, ottenuti con lo stesso metodo.

La figura 4.19a mostra le linee di campo all'interno di due strisce di conduttore, sagomate in modo da riprodurre, con una certa approssimazione, un pozzo di Faraday piano ai capi delle quali è applicata una differenza di potenziale: si osserva che all'esterno non ci sono linee di forza, $\mathbf{E} = 0$; la figura 4.19b mostra il

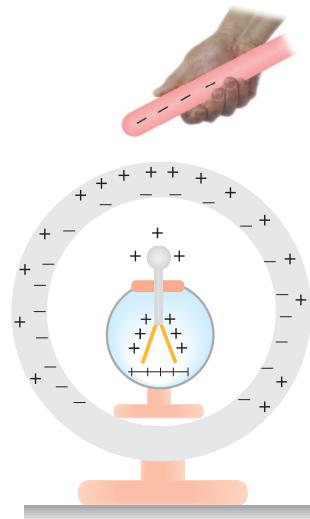


Figura 4.17 Elettroscopio carico all'interno di una cavità schermato dalle perturbazioni elettriche esterne.

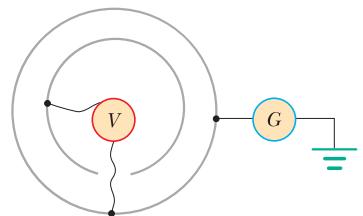


Figura 4.18 Schema di un esperimento per la determinazione precisa dell'esponente della distanza r della legge di Coulomb.

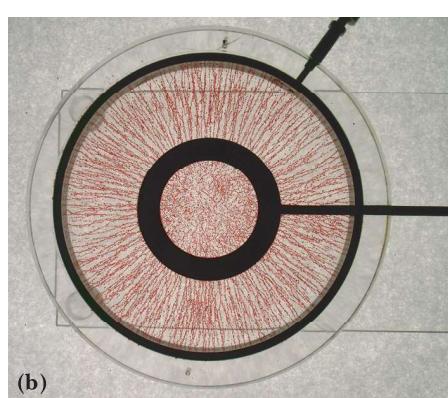
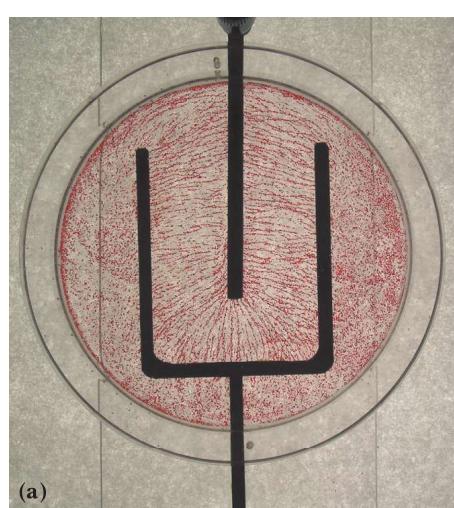


Figura 4.19 Linee di campo in un pozzo di Faraday piano (a) e tra due conduttori cavi concentrici (b).

campo elettrostatico prodotto da due anelli conduttori concentrici ai quali è applicata una differenza di potenziale: si osserva che nella cavità del conduttore interno non ci sono linee di forza, $\mathbf{E} = 0$.

ESEMPIO 4.4 Due conduttori sferici concentrici

Un conduttore sferico di raggio R_1 è al centro di un conduttore sferico cavo di raggio interno R_2 e raggio esterno R_3 , figura 4.20. Una carica $+q$ è depositata sul conduttore interno. a) Calcolare campo e potenziale elettrostatico in funzione di r , distanza dal centro. Studiare i casi particolari in cui: b) si colleghino i due conduttori oppure c) si ponga a potenziale elettrostatico zero quello esterno.

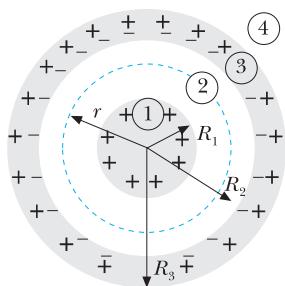


Figura 4.20

Soluzione a) In equilibrio abbiamo la carica $+q$ sulla superficie di raggio R_1 , $-q$ sulla superficie di raggio R_2 e $+q$ sulla superficie di raggio R_3 . Per simmetria la carica è distribuita uniformemente su ciascuna superficie (ma naturalmente con densità diverse), il campo è radiale e la sua intensità e il potenziale elettrostatico sono funzioni solo di r .

Utilizziamo i risultati già noti per una distribuzione sferica di carica, esempio 3.1, e sommiamo i contributi delle tre distribuzioni in base al principio di sovrapposizione, con i risultati riportati nella tabella e mostrati nella figura 4.21.

Osserviamo che per $r \geq R_2$ gli effetti delle cariche $+q$ su R_1 e $-q$ su R_2 si elidono, per cui tra R_2 e R_3 il campo è nullo e oltre R_3 è dovuto solo alla carica esterna.

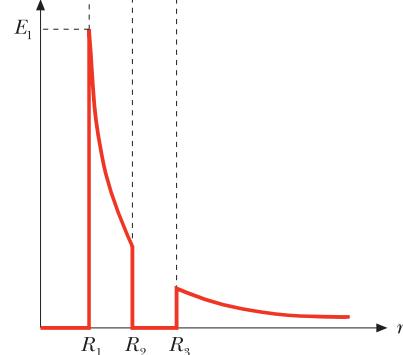
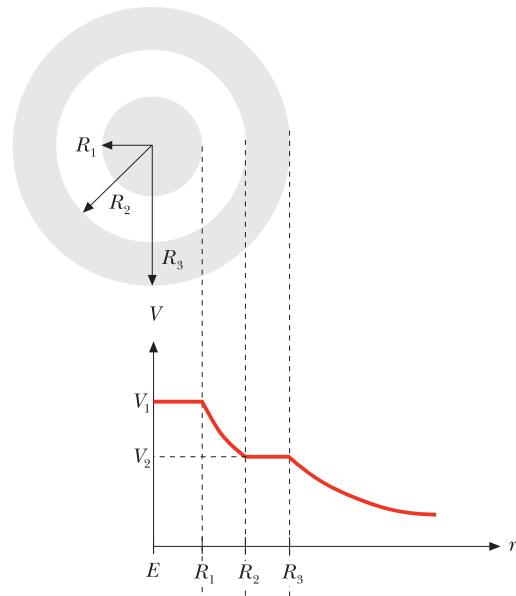


Figura 4.21

	$V(r)$	$E(r)$
1) $0 \leq r \leq R_1$	$\frac{q}{4\pi\epsilon_0 R_1} - \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R_2} + \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R_3} = V_1$	$0 + 0 + 0 = 0$
2) $R_1 \leq r \leq R_2$	$\frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} - \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R_2} + \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R_3}$	$\frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} + 0 + 0 = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$
3) $R_2 \leq r \leq R_3$	$\frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} - \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} + \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R_3} = V_2$	$\frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} - \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} + 0 = 0$
4) $R_3 \leq r$	$\frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} - \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} + \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}$	$\frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} - \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} + \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$

In particolare la differenza di potenziale tra i due conduttori è

$$V_1 - V_2 = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right), \quad (4.8)$$

determinata dal valore della carica interna e dei raggi.

b) Se collegiamo i due conduttori, figura 4.22, la carica all'interno si annulla, i primi due addendi nelle espressioni di $V(r)$ e di $E(r)$ nella tabella sono nulli: siamo nella condizione del conduttore cavo, senza cariche nel suo interno, il cui potenziale elettrostatico vale $V = q/4\pi\epsilon_0 R_3$, che genera all'esterno lo stesso campo e lo stesso potenziale elettrostatico di prima. Lo spazio esterno è schermato dalle variazioni di campo che avvengono all'interno.

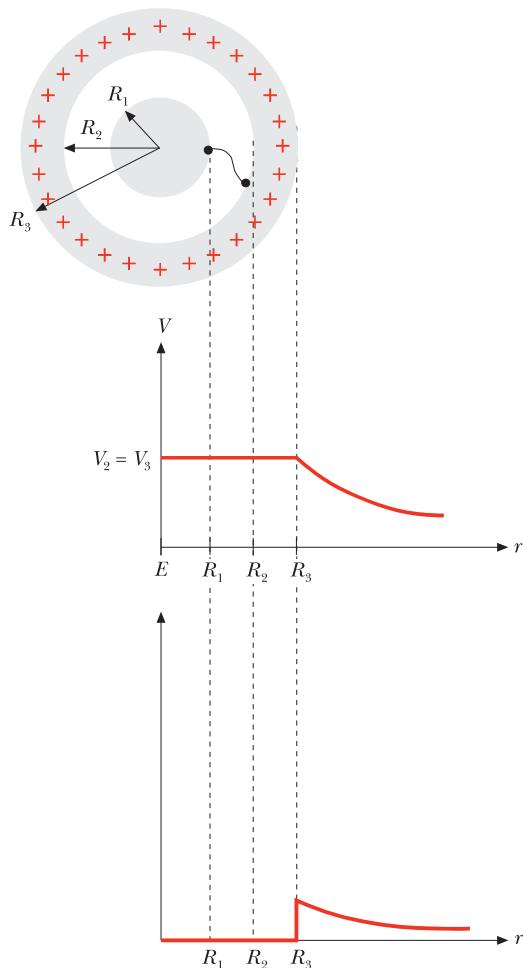


Figura 4.22

c) Supponiamo infine di collegare la superficie esterna del conduttore cavo a terra, figura 4.23; la carica q viene neutralizzata e quindi sono ora i terzi addendi nelle espressioni di $V(r)$ e di $E(r)$ nella tabella ad essere identicamente nulli. All'esterno il campo elettrostatico è nullo, all'interno il campo elettrostatico è rimasto lo stesso ovunque. Il potenziale elettrostatico invece cambia: esso diminuisce ovunque della quantità $q/4\pi\epsilon_0 R_3$, ma questo fatto non produce alcun effetto in quanto non cambiano le differenze di potenziale, ovvero il campo che è il gradiente del potenziale.

Nei grafici che rappresentano $E(r)$ e $V(r)$, il potenziale elettrostatico nel terzo caso è semplicemente spostato verso il basso rispetto al primo caso: è cambiato il valore di riferimento, ma non la distribuzione (prima $V(\infty) = 0$, dopo $V(R_3) = 0$).

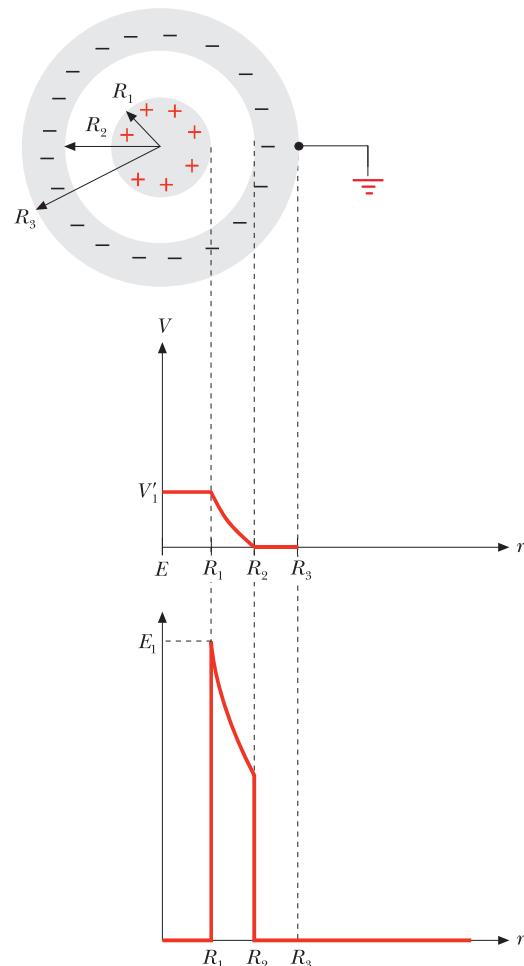


Figura 4.23

4.4 Sistemi di conduttori

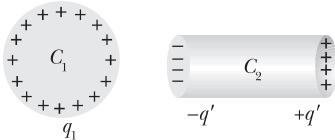


Figura 4.24 Induzione elettrostatica di C_1 su C_2 .

Riprendiamo in esame il conduttore isolato carico del paragrafo 4.2, per il quale abbiamo definito la capacità secondo (4.2), dipendente dalla forma e dalle dimensioni del conduttore. Se a questo conduttore, figura 4.24, che chiamiamo C_1 e su cui si trova la carica q_1 , avviciniamo un altro conduttore C_2 scarico, sulla parte di C_2 più vicina a C_1 compare una carica $-q'$ e sulla parte più lontana la carica q' , per effetto dell'induzione elettrostatica, che in questo caso diciamo incompleta, in quanto non tutte le linee di forza che partono da C_1 finiscono su C_2 .

Il potenziale elettrostatico di C_1 si porta ad un valore V_1 inferiore al valore che avrebbe in assenza di C_2 in quanto esso viene diminuito dalla presenza della carica negativa $-q'$ più di quanto venga aumentato da q' , che è più lontana. Come risulta aumenta la capacità di C_1 , rapporto tra carica e potenziale.

Questo caso è un aspetto particolare del caso più generale, costituito da un sistema di n conduttori fissi racchiusi entro un conduttore, il cui potenziale elettrostatico viene assunto come riferimento e posto eguale a zero; questo conduttore può anche mancare e allora il riferimento è il potenziale elettrostatico nullo all'infinito. Tra i potenziali elettrostatici e le cariche dei conduttori sussistono le relazioni

$$\begin{aligned} V_1 &= a_{11}q_1 + a_{12}q_2 + \dots + a_{1n}q_n \\ V_2 &= a_{21}q_1 + a_{22}q_2 + \dots + a_{2n}q_n \\ &\dots \\ V_n &= a_{n1}q_1 + a_{n2}q_2 + \dots + a_{nn}q_n \end{aligned} \quad (4.9)$$

Coefficienti di potenziale

Le grandezze a_{ij} sono dette **coefficienti di potenziale elettrostatico** e dipendono soltanto dalla geometria del sistema; per esse valgono le relazioni

$$a_{ij} = a_{ji} \quad , \quad a_{ij} > 0 \quad , \quad a_{ii} > a_{ij} \quad i \neq j . \quad (4.10)$$

Dati i potenziali elettrostatici e nota la *matrice*, simmetrica, dei coefficienti a_{ij} le cariche sui conduttori sono univocamente determinate dalla soluzione del sistema di equazioni lineari (4.9); matematicamente ciò implica che il determinante della matrice sia diverso da zero.

Il sistema (4.9) può essere invertito esprimendo le cariche in funzione dei potenziali:

$$\begin{aligned} q_1 &= c_{11}V_1 + c_{12}V_2 + \dots + c_{1n}V_n \\ q_2 &= c_{21}V_1 + c_{22}V_2 + \dots + c_{2n}V_n \\ &\dots \\ q_n &= c_{n1}V_1 + c_{n2}V_2 + \dots + c_{nn}V_n \end{aligned} \quad (4.11)$$

Coefficienti di induzione e di capacità

Le grandezze c_{ij} , determinate in funzione delle a_{ij} , sono chiamate *coefficienti di induzione* se $i \neq j$ e **coefficienti di capacità** se $i = j$. Valgono le seguenti relazioni:

$$c_{ij} = c_{ji} \quad , \quad c_{ij} < 0 \quad , \quad c_{ii} > 0 . \quad (4.12)$$

Anche la **matrice dei coefficienti** c_{ij} ha determinante non nullo.

La conoscenza dei coefficienti a_{ij} o c_{ij} consente di risolvere qualsiasi problema di elettrostatica che riguardi il sistema di n conduttori in esame. Poiché questi coefficienti non dipendono dalla carica presente sui conduttori, ma solamente dalla geometria del sistema, la loro determinazione può essere fatta considerando le distribuzioni di carica più convenienti.

Dimostriamo le (4.9) chiarendo contemporaneamente il significato dei coefficienti di potenziale elettrostatico. Supponiamo che il primo conduttore abbia carica q_1 , mentre tutti gli altri abbiano carica nulla: $q_2 = q_3 = \dots = q_n = 0$. I potenziali elettrostatici degli n conduttori, dovuti alla presenza di q_1 , sono dati da formule tipo (2.22) e dipendono quindi dalla densità di carica sul primo conduttore; se questa viene moltiplicata per un dato fattore essi variano proporzionalmente e in definitiva sono proporzionali a q_1 :

$$V'_1 = a_{11}q_1, \quad V'_2 = a_{21}q_1, \dots, \quad V'_n = a_{n1}q_1.$$

I coefficienti a_{ij} , con $i \neq j$, descrivono l'**interazione mutua** tra il primo conduttore e ognuno degli altri $n - 1$. Analogamente, se supponiamo $q_2 \neq 0$ e $q_1 = q_3 = \dots = q_n = 0$, abbiamo

$$V''_1 = a_{12}q_2, \quad V''_2 = a_{22}q_2, \dots, \quad V''_n = a_{n2}q_2.$$

È chiaro che $a_{12} = a_{21}$ in quanto entrambi descrivono la stessa interazione, tra il primo e il secondo conduttore. Si capisce anche perché i coefficienti siano positivi (una carica di un certo segno dà un potenziale elettrostatico dello stesso segno).

Procedendo così di seguito si considerano in definitiva n situazioni in ciascuna delle quali è diversa da zero la carica posseduta da un conduttore e sono nulle tutte le $n - 1$ restanti. Se tutti gli n conduttori sono carichi, a norma della proprietà additiva dei potenziali elettrostatici, il potenziale elettrostatico complessivo di ciascun conduttore si ottiene dalla somma dei singoli potenziali elettrostatici V'_i, V''_i, \dots

È importante sottolineare che in ciascuna delle n situazioni singole la presenza della carica sul solo conduttore i -esimo induce distribuzioni di carica sugli altri (con carica totale nulla) che a loro volta modificano la distribuzione inducente: i coefficienti a_{i1}, \dots, a_{in} riassumono la condizione di equilibrio. Quando sono presenti tutte le cariche abbiamo su ogni conduttore la sovrapposizione delle distribuzioni di carica dei casi singoli ed è lecito applicare il principio di sovrapposizione.

Nelle applicazioni pratiche è più semplice controllare il potenziale elettrostatico dei vari conduttori e quindi V_1, V_2, \dots, V_n sono noti mentre le cariche sono le incognite che si possono calcolare o risolvendo le (4.7) o utilizzando direttamente le (4.9). Vedremo nel paragrafo 4.2 Funzioni armoniche. Problema di Dirichlet, consultabile negli Ulteriori approfondimenti in ebook, che esiste una ragione più profonda per preferire questa impostazione.

Interazione mutua

ESEMPIO 4.5 Sistema di due conduttori sferici concentrici

Calcolare i coefficienti di potenziale elettrostatico, di capacità e di induzione per il sistema di due conduttori sferici concentrici già considerato nell'esempio 4.4.

Soluzione Le (4.9) in questo caso si riducono a

$$V_1 = a_{11}q_1 + a_{12}q_2, \quad V_2 = a_{21}q_1 + a_{22}q_2.$$

Sappiamo dall'esempio 4.4 che se diamo una carica q_1 al conduttore interno quello esterno ha una carica complessiva nulla e i potenziali sono

$$V_1 = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 R_1} - \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 R_2} + \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 R_3}, \quad V_2 = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 R_3}$$

da confrontare con $V_1 = a_{11}q_1, V_2 = a_{21}q_1$. Pertanto

$$a_{11} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right), \quad a_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 R_3}.$$

Se diamo una carica q_2 al conduttore esterno,

$$V_1 = V_2 = \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 R_3}$$

da confrontare questa volta con $V_1 = a_{12}q_2, V_2 = a_{22}q_2$ per cui

$$a_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 R_3} = a_{21}, \quad a_{22} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 R_3}.$$

P. Mazzoldi • M. Nigro • C. Voci

Fisica

Elettromagnetismo e Onde

Accedi all'ebook e ai contenuti digitali ➤ Espandi le tue risorse ➤ con un libro che **non pesa** e si **adatta** alle dimensioni del tuo **lettore**



All'interno del volume il **codice personale** e le istruzioni per accedere alla versione **ebook** del testo e agli ulteriori servizi. L'accesso alle risorse digitali è **gratuito** ma limitato a **18 mesi dalla attivazione del servizio**.



€ 49,00

