

Jearl Walker

Halliday - Resnick
**Fondamenti
di fisica**

Elettromagnetismo • Ottica

Ottava edizione italiana condotta
sull'undicesima edizione americana



Jearl Walker

Halliday - Resnick Fondamenti di fisica

Elettromagnetismo • Ottica

Ottava edizione italiana condotta
sull'undicesima edizione americana

A cura di Dario Gerace

Se vuoi accedere alle risorse online riservate

1. Vai su **my.zanichelli.it**
2. Clicca su *Registrati*.
3. Scegli *Studente*.
4. Segui i passaggi richiesti per la registrazione.
5. Riceverai un'email: clicca sul link per completare la registrazione.
6. Cerca il tuo codice di attivazione stampato in verticale sul bollino argentato in questa pagina.
7. Inseriscilo nella tua area personale su **my.zanichelli.it**

Se sei già registrato, per accedere ai contenuti riservati ti serve solo il codice di attivazione.

Titolo originale: *Fundamentals of Physics, Extended, 12th Edition* by David Halliday, Robert Resnick and Jearl Walker (Chapters 21–36)

Copyright © 2022, 2014, 2011, 2008, 2005 John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

This translation published under license with the original publisher John Wiley & Sons, Inc.

© 2023, 2015, 2006, 2001, 1998, 1995, 1984, 1977 CEA – Casa Editrice Ambrosiana, viale Romagna 5, 20089 Rozzano (MI) [89977/der] CEA – Casa Editrice Ambrosiana è un marchio editoriale di Zanichelli editore S.p.A.

Traduzione: studio QB, Bologna, basata sul testo della settima edizione italiana tradotta da Lanfranco Cicala.

Revisione: Dario Gerace

Diritti riservati

I diritti di pubblicazione, riproduzione, comunicazione, distribuzione, trascrizione, traduzione, noleggio, prestito, esecuzione, elaborazione in qualsiasi forma o opera, di memorizzazione anche digitale e di adattamento totale o parziale su supporti di qualsiasi tipo e con qualsiasi mezzo (comprese le copie digitali e fotostatiche), sono riservati per tutti i paesi. L'acquisto della presente copia dell'opera non implica il trasferimento dei suddetti diritti né li esaurisce.

Fotocopie e permessi di riproduzione

Le fotocopie per uso personale (cioè privato e individuale, con esclusione quindi di strumenti di uso collettivo) possono essere effettuate, nei limiti del 15% di ciascun volume, dietro pagamento alla S.I.A.E. del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Tali fotocopie possono essere effettuate negli esercizi commerciali convenzionati S.I.A.E. o con altre modalità indicate da S.I.A.E.

Per le riproduzioni ad uso non personale (ad esempio: professionale, economico, commerciale, strumenti di studio collettivi, come dispense e simili) l'editore potrà concedere a pagamento l'autorizzazione a riprodurre un numero di pagine non superiore al 15% delle pagine del presente volume.

Le richieste vanno inoltrate a:
Centro Licenze e Autorizzazioni per le Riproduzioni Editoriali (CLEARedi),
Corso di Porta Romana 108, 20122 Milano
e-mail: autorizzazioni@clearedi.org e sito web: www.clearedi.org

L'autorizzazione non è concessa per un limitato numero di opere di carattere didattico riprodotte nell'elenco che si trova all'indirizzo www.zanichelli.it/chi-siamo/fotocopie-e-permessi

L'editore, per quanto di propria spettanza, considera rare le opere fuori del proprio catalogo editoriale. La loro fotocopia per i soli esemplari esistenti nelle biblioteche è consentita, anche oltre il limite del 15%, non essendo concorrenziale all'opera. Non possono considerarsi rare le opere di cui esiste, nel catalogo dell'editore, una successiva edizione, né le opere presenti in cataloghi di altri editori o le opere antologiche. Nei contratti di cessione è esclusa, per biblioteche, istituti di istruzione, musei e archivi, la facoltà di cui all'art. 71-ter legge diritto d'autore. Per permessi di riproduzione, diversi dalle fotocopie, rivolgersi a ufficicontratti@zanichelli.it

Licenze per riassunto, citazione e riproduzione parziale a uso didattico con mezzi digitali

La citazione, la riproduzione e il riassunto, se fatti con mezzi digitali, sono consentiti (art. 70 bis legge sul diritto d'autore), limitatamente a brani o parti di opera, a) esclusivamente per finalità illustrative a uso didattico, nei limiti di quanto giustificato dallo scopo non commerciale perseguito. (La finalità illustrativa si consegue con esempi, chiarimenti, commenti, spiegazioni, domande, nel corso di una lezione); b) sotto la responsabilità di un istituto di istruzione, nei suoi locali o in altro luogo o in un ambiente elettronico sicuro, accessibili solo al personale docente di tale istituto e agli alunni o studenti iscritti al corso di studi in cui le parti di opere sono utilizzate; c) a condizione che, per i materiali educativi, non siano disponibili sul mercato licenze volontarie che autorizzano tali usi. Zanichelli offre al mercato due tipi di licenze di durata limitata all'anno accademico in cui le licenze sono concesse:

A) licenze gratuite per la riproduzione, citazione o riassunto di una parte di opera non superiore al 5%. Non è consentito superare tale limite del 5% attraverso una pluralità di licenze gratuite.

B) licenze a pagamento per la riproduzione, citazione, riassunto parziale ma superiore al 5% e comunque inferiore al 40% dell'opera. Per usufruire di tali licenze occorre seguire le istruzioni su www.zanichelli.it/licenzeeducative

L'autorizzazione è strettamente riservata all'istituto educativo licenziatario e non è trasferibile in alcun modo e a qualsiasi titolo.

Garanzie relative alle risorse digitali

Le risorse digitali di questo volume sono riservate a chi acquista un volume nuovo: vedi anche al sito www.zanichelli.it/contatti/acquisti-e-recesso

le voci *Informazioni generali su risorse collegate a libri cartacei e Risorse digitali e libri non nuovi*.

Zanichelli garantisce direttamente all'acquirente la piena funzionalità di tali risorse.

In caso di malfunzionamento rivolgersi a assistenza@zanichelli.it

La garanzia di aggiornamento è limitata alla correzione degli errori e all'eliminazione di malfunzionamenti presenti al momento della creazione dell'opera. Zanichelli garantisce inoltre che le risorse digitali di questo volume sotto il suo controllo saranno accessibili, a partire dall'acquisto, per tutta la durata della normale utilizzazione didattica dell'opera. Passato questo periodo, alcune o tutte le risorse potrebbero non essere più accessibili o disponibili: per maggiori informazioni, leggi my.zanichelli.it/fuoricatalogo

Soluzioni degli esercizi e altri svolgimenti di compiti assegnati

Le soluzioni degli esercizi, compresi i passaggi che portano ai risultati e gli altri svolgimenti di compiti assegnati, sono tutelate dalla legge sul diritto d'autore in quanto elaborazioni di esercizi a loro volta considerati opere creative tutelate, e pertanto non possono essere diffuse, comunicate a terzi e/o utilizzate economicamente, se non a fini esclusivi di attività didattica.

Diritto di TDM

L'estrazione di dati da questa opera o da parti di essa e le attività connesse non sono consentite, salvi i casi di utilizzazioni libere ammessi dalla legge.

L'editore può concedere una licenza. La richiesta va indirizzata a tdm@zanichelli.it

Redazione: studio QB, Bologna

Impaginazione e indice analitico: Epitesto, Milano

Copertina:

- Progetto grafico: Falcinelli & Co., Roma

- Immagine di copertina: © 2018 Sunyixun/Getty Images

Prima edizione italiana: 1977

Seconda edizione italiana: 1984

Terza edizione italiana: febbraio 1995

Quarta edizione italiana: ottobre 1998

Quinta edizione italiana: settembre 2001

Sesta edizione italiana: gennaio 2006

Settima edizione italiana: maggio 2015

Ottava edizione italiana: novembre 2023

Ristampa: **prima tiratura**

5 4 3 2 1

2023 2024 2025 2026 2027

Realizzare un libro è un'operazione complessa, che richiede numerosi controlli: sul testo, sulle immagini e sulle relazioni che si stabiliscono tra loro. L'esperienza suggerisce che è praticamente impossibile pubblicare un libro privo di errori. Saremo quindi grati ai lettori che vorranno segnalarceli.

Per segnalazioni o suggerimenti relativi a questo libro rivolgersi a: segreteria_cea@ceaedizioni.it

Per comunicazioni di tipo commerciale rivolgersi a: universita@zanichelli.it

Stampa:

per conto di Zanichelli editore S.p.A.
Via Innerio 34, 40126 Bologna

Indice generale

Prefazione
Ringraziamenti
Tavole matematiche e fisiche

CAPITOLO 21

Legge di Coulomb

21.1 Legge di Coulomb
21.2 La carica è quantizzata
21.3 La carica si conserva

Sintesi
Domande
Problemi
Problemi di riepilogo

CAPITOLO 22

Campi elettrici

22.1 Campo elettrico
22.2 Campo elettrico generato da una carica puntiforme
22.3 Campo elettrico generato da un dipolo
22.4 Campo elettrico generato da una distribuzione lineare di carica
22.5 Campo elettrico generato da un disco carico
22.6 Carica puntiforme in un campo elettrico
22.7 Dipolo in un campo elettrico

Sintesi
Domande
Problemi
Problemi di riepilogo

CAPITOLO 23

Legge di Gauss

23.1 Flusso del campo elettrico
23.2 Legge di Gauss
23.3 Conduttore carico isolato
23.4 Applicare la legge di Gauss: simmetria cilindrica
23.5 Applicare la legge di Gauss: simmetria piana
23.6 Applicare la legge di Gauss: simmetria sferica

Sintesi
Domande
Problemi
Problemi di riepilogo

CAPITOLO 24

Potenziale elettrico

24.1 Potenziale elettrico
24.2 Superfici equipotenziali e campo elettrico
24.3 Potenziale dovuto a una particella carica
24.4 Potenziale dovuto a un dipolo elettrico
24.5 Potenziale dovuto a una distribuzione continua di carica
24.6 Calcolare il campo dal potenziale
24.7 Energia potenziale elettrica di un sistema di particelle cariche
24.8 Potenziale di un conduttore carico isolato

VII Sintesi 648
IX Domande 649
XI Problemi 650
Problemi di riepilogo 656

CAPITOLO 25

Capacità elettrica

25.1 Capacità elettrica
25.2 Calcolare la capacità elettrica
25.3 Condensatori in serie e in parallelo
25.4 Energia immagazzinata in un campo elettrico
25.5 Condensatore con un dielettrico
25.6 Dielettrici e legge di Gauss

Sintesi 676
Domande 676
Problemi 677
Problemi di riepilogo 681

CAPITOLO 26

Corrente elettrica e resistenza

26.1 Corrente elettrica
26.2 Densità di corrente
26.3 Resistenza e resistività
26.4 Legge di Ohm
26.5 Potenza, semiconduttori, superconduttori

Sintesi 699
Domande 700
Problemi 701
Problemi di riepilogo 704

CAPITOLO 27

Circuiti

27.1 Circuiti a maglia singola
27.2 Circuiti a più maglie
27.3 Amperometro e voltmetro
27.4 Circuiti RC

Sintesi 724
Domande 725
Problemi 726
Problemi di riepilogo 732

CAPITOLO 28

Campo magnetico

28.1 Campo magnetico e definizione di B
28.2 Campi incrociati: la scoperta dell'elettrone
28.3 Campi incrociati: l'effetto Hall
28.4 Particella carica in moto circolare
28.5 Ciclotroni e sincrotroni
28.6 Forza magnetica agente su un filo percorso da corrente
28.7 Momento torcente agente su una spirale percorsa da corrente
28.8 Momento di dipolo magnetico

Sintesi 757
Domande 757
Problemi 759
Problemi di riepilogo 764

CAPITOLO 29

Campi magnetici generati da correnti

29.1 Campi magnetici generati da correnti	766
29.2 Forza tra due correnti parallele	766
29.3 Legge di Ampère	771
29.4 Solenoidi e toroidi	772
29.5 Dipolo magnetico costituito da una bobina percorsa dalla corrente	776
Sintesi	779
Domande	781
Problemi	781
Problemi di riepilogo	782
	788

CAPITOLO 30

Induzione e induttanza

30.1 Legge di Faraday e legge di Lenz	791
30.2 Induzione e trasferimenti di energia	791
30.3 Campi elettrici indotti	798
30.4 Induttori e induttanze	801
30.5 Autoinduzione	804
30.6 Circuiti <i>RL</i>	806
30.7 Energia immagazzinata in un campo magnetico	807
30.8 Densità di energia in un campo magnetico	810
30.9 Mutua induzione	812
Sintesi	813
Domande	815
Problemi	815
Problemi di riepilogo	817
	823

CAPITOLO 31

Oscillazioni elettromagnetiche e corrente alternata

31.1 Oscillazioni <i>LC</i>	826
31.2 Oscillazioni smorzate in un circuito <i>RLC</i>	826
31.3 Oscillazioni forzate in tre circuiti semplici	832
31.4 Circuito <i>RLC</i> in serie	834
31.5 Potenza nei circuiti in corrente alternata	841
31.6 Trasformatori	847
Sintesi	849
Domande	853
Problemi	854
Problemi di riepilogo	855
	859

CAPITOLO 32

Equazioni di Maxwell e magnetismo della materia

32.1 Legge di Gauss per i campi magnetici	861
32.2 Campi magnetici indotti	861
32.3 Corrente di spostamento	863
32.4 Magneti	865
32.5 Magnetismo ed elettroni	868
32.6 Diamagnetismo	870
32.7 Paramagnetismo	874
32.8 Ferromagnetismo	876
Sintesi	878
Domande	881
Problemi	882
Problemi di riepilogo	883
	887

CAPITOLO 33

Onde elettromagnetiche

33.1 Onde elettromagnetiche	889
	889

33.2 Trasporto di energia e vettore di Poynting	896
33.3 Pressione di radiazione	898
33.4 Polarizzazione	900
33.5 Riflessione e rifrazione	904
33.6 Riflessione interna totale	909
33.7 Polarizzazione per riflessione	911
Sintesi	913
Domande	913
Problemi	915
Problemi di riepilogo	920

CAPITOLO 34

Immagini

34.1 Immagini e specchi piani	923
34.2 Specchi sferici	923
34.3 Superfici rifrangenti sferiche	927
34.4 Lenti sottili	932
34.5 Strumenti ottici	935
34.6 Tre dimostrazioni	941
Sintesi	944
Domande	946
Problemi	947
Problemi di riepilogo	948
	952

CAPITOLO 35

Interferenza

35.1 Luce come onda	955
35.2 Esperimento di Young sull'interferenza	955
35.3 Interferenza e intensità da doppia fenditura	960
35.4 Interferenza da pellicole sottili	964
35.5 Interferometro di Michelson	968
Sintesi	975
Domande	977
Problemi	978
Problemi di riepilogo	979
	984

CAPITOLO 36

Diffrazione

36.1 Diffrazione da singola fenditura	987
36.2 Intensità nella diffrazione da singola fenditura	987
36.3 Diffrazione attraverso un'apertura circolare	991
36.4 Diffrazione da una doppia fenditura	996
36.5 Reticoli di diffrazione	999
36.6 Reticoli: dispersione e potere di risoluzione	1002
36.7 Diffrazione dei raggi X	1005
Sintesi	1007
Domande	1010
Problemi	1010
Problemi di riepilogo	1011
	1017

Appendici

A Sistema Internazionale di unità di misura (SI)	A-1
B Alcune costanti fondamentali della fisica	A-3
C Alcuni dati astronomici	A-4
D Fattori di conversione	A-5
E Formule matematiche	A-9
F Proprietà degli elementi	A-11
G Tavola periodica degli elementi	A-14

Crediti fotografici	C-1
Indice analitico	I-1

Prefazione

Ecco una nuova edizione del libro di testo ideato da David Halliday e Robert Resnick nel 1963 e che io stesso ho usato da studente del primo anno al MIT. (Accidenti, il tempo è volato!)

Lavorare a questa nuova edizione mi ha permesso di scoprire molti nuovi esempi interessanti e di rivederne alcuni tra i miei preferiti delle edizioni precedenti. In questa pagina trovate alcuni casi di particolare interesse trattati in questa ottava edizione italiana di *Fondamenti di Fisica – Elettromagnetismo, Ottica*.



Figura 28.18 La terapia a fasci di neutroni veloci è un'arma promettente contro i tumori maligni delle ghiandole salivari. Ma come fanno delle particelle elettricamente neutre a essere accelerate ad alta velocità?



Figura 29.87 La malattia di Parkinson e altre patologie cerebrali sono state trattate con la stimolazione magnetica transcranica, nella quale dei campi magnetici pulsati forzano i neuroni a scaricarsi, alla profondità di diversi centimetri.



Figura 34.27 Nella spettroscopia funzionale nel vicino infrarosso (*functional Near-Infra-Red-Spectroscopy*, fNIRS) una persona indossa uno stretto copricapo con un certo numero di LED che emettono luce nell'intervallo del vicino infrarosso. La luce può penetrare nello strato esterno del cervello e rivelare quale area è attivata da una data attività, dal giocare a baseball al pilotare un aereo.

Inoltre, in questa edizione si parla anche di misurare dei potenziali di un temporale con i muoni e molto altro.

CHE COSA C'È DI NUOVO?

- *Verifiche*, una per ogni paragrafo
- *Problemi svolti*
- *Sintesi* alla fine di ogni capitolo
- Circa 300 *nuovi problemi* di fine capitolo
- *Risposte* alle Verifiche, alle Domande e ai Problemi con numero dispari, disponibili nel minisito dedicato al libro
- *Soluzioni dettagliate*, disponibili online in lingua inglese, per i problemi di fine capitolo indicati con **MS**

Nel progettare questa nuova edizione, mi sono concentrato su alcune aree della ricerca che mi interessano in particolar modo e ho scritto nuove spiegazioni nel testo e molti nuovi esercizi e problemi da svolgere.

Per esempio, osserviamo la prima immagine di un buco nero (che ho atteso tutta la vita) e poi esaminiamo le onde gravitazionali (un argomento di cui ho discusso con Rainer Weiss al MIT quando lavoravo nel suo laboratorio, diversi anni prima che gli venisse l'idea di usare un interferometro come rivelatore di onde).

Ho esplorato la radioterapia per il cancro, incluso l'uso degli elettroni di Auger-Meitner, che furono compresi per la prima volta da Lise Meitner.

Ho setacciato migliaia di articoli di ricerca in ambito medico, ingegneristico e fisico per trovare modi intelligenti di guardare all'interno del corpo umano senza un largo impiego di chirurgia invasive. Eccone tre esempi.

1. La **chirurgia robotica**, che usa incisioni a porta singola e fibre ottiche, permette ora ai chirurghi di accedere agli organi interni con tempi di guarigione per il paziente di poche ore anziché di giorni o settimane, come accadeva con le precedenti tecniche chirurgiche.
2. La **stimolazione magnetica transcranica** è usata per trattare la depressione cronica, la malattia di Parkinson e altre patologie cerebrali, applicando campi magnetici pulsati generati da bobine vicine allo scalpo, per forzare i neuroni alla profondità di diversi centimetri a scaricarsi.
3. La **magnetoencefalografia** (MEG) viene usata per monitorare il cervello di una persona mentre questa compie un'azione come leggere. L'azione del cervello fa sì che deboli impulsi elettrici siano inviati lungo percorsi di conduzione tra le cellule cerebrali e che ciascun impulso produca un debole campo magnetico, che viene rilevato da dispositivi superconduttori a interferenza quantistica (SQUID) estremamente sensibili.

LE RISORSE MULTIMEDIALI

online.universita.zanichelli.it/halliday-eo8e

A questo indirizzo sono disponibili le risorse multimediali di complemento al libro. Per accedere alle risorse protette è necessario registrarsi su my.zanichelli.it seguendo le istruzioni riportate nella prima pagina del libro.

Libro con ebook

Chi acquista il libro può accedere gratuitamente all'ebook, online e offline, seguendo le istruzioni presenti nella prima pagina del libro. L'ebook si legge offline anche con l'applicazione *Booktab Z*, che si scarica gratis da *App Store* (per *Apple*) o da *Google Play* (per *Android*). L'accesso all'ebook e alle risorse digitali protette è personale, non condivisibile e non cedibile, né autonomamente né con la cessione del libro cartaceo.

Campo magnetico

28.1 CAMPO MAGNETICO E DEFINIZIONE DI B

Idee chiave

- Quando una particella carica si muove in un campo magnetico \mathbf{B} , una forza magnetica agisce sulla particella ed è data da

$$\mathbf{F}_B = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

Dove q è la carica della particella (con il suo segno) e \mathbf{v} è la velocità della particella.

- La regola della mano destra per il prodotto vettoriale dà la direzione e il verso di $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$. Il segno di q stabilisce se \mathbf{F}_B ha lo stesso verso di $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ oppure verso opposto.

- Il modulo di \mathbf{F}_B è dato da

$$F_B = |q|vB \sin \phi$$

dove ϕ è l'angolo tra \mathbf{v} e \mathbf{B} .

Che cos'è un campo magnetico?

Come già discusso, uno dei principali obiettivi della fisica è lo studio di come un *campo elettrico* possa generare una *forza elettrica* su un oggetto carico. Un obiettivo strettamente legato a questo è lo studio di come un *campo magnetico* possa generare una *forza magnetica* su una particella carica (in moto) o su un oggetto magnetico come una calamita. Potreste già avere un'idea di cosa sia un campo magnetico se qualche volta avete attaccato un appunto alla porta del frigorifero con una piccola calamita o avete accidentalmente cancellato i dati su una carta di credito avvicinandola a un magnete. Il magnete agisce sulla porta del frigo o sulla banda magnetica della carta di credito tramite il suo campo magnetico.

Le applicazioni dei campi magnetici e delle forze magnetiche sono innumerevoli e ogni anno se ne sviluppano di nuove. Ecco alcuni esempi. Per decenni l'industria dell'intrattenimento si è basata sulla registrazione magnetica di suoni e immagini su nastri audio e video. Sebbene la tecnologia digitale abbia ampiamente sostituito la registrazione magnetica con quella ottica, l'industria dipende ancora dai magneti che controllano i lettori di CD e DVD e dei dischi magnetici dei computer; i magneti gestiscono anche le membrane acustiche degli altoparlanti degli auricolari, dei televisori, dei computer e dei telefoni. Un'auto moderna è dotata di dozzine di magneti, perché questi sono necessari per l'iniezione nei motori, per il controllo elettrico dei finestrini, del tetto e dei tergicristalli. La maggior parte dei sistemi di sicurezza, i campanelli e le serrature automatiche delle porte fanno uso di magneti. Insomma, siete circondati da dispositivi magnetici.

La teoria di base dei campi magnetici è fisica; la loro applicazione è ingegneria. Sia la teoria sia la pratica cominciano da una domanda: "Che cosa produce un campo magnetico?"

Come si genera un campo magnetico?

Poiché un campo elettrico \mathbf{E} è prodotto da una carica elettrica, potremmo ragionevolmente pensare che un campo magnetico \mathbf{B} sia prodotto da una carica magnetica. Anche se le cariche magnetiche isolate (dette *monopoli magnetici*), sono predette da alcune teorie, la loro esistenza non è mai stata confermata. Come si creano dunque i campi magnetici? Ci sono due modi.

Il primo consiste nel muovere particelle elettricamente cariche, come una corrente in un filo, per generare un **elettromagnete**. La corrente genera un campo magnetico che può essere usato, per esempio, per controllare il disco rigido di un computer o per separare i rifiuti metallici (Figura 28.1). Nel capitolo 29 tratteremo il campo magnetico generato da una corrente.

L'altro modo è produrre un campo magnetico per mezzo di particelle elementari, come gli elettroni, perché queste particelle sono circondate da un campo



Figura 28.1 L'uso di un elettromagnete per la raccolta e il trasporto dei metallici in un'acciaieria.

magnetico *intrinseco*. Ossia, il campo magnetico è una caratteristica fondamentale, di ciascuna particella, proprio come la massa e la carica elettrica (o l'assenza di carica elettrica). Come vedremo nel capitolo 32, i campi magnetici degli elettroni in certi materiali si sommano per produrre un campo magnetico risultante attorno al materiale. Tale somma è la ragione per cui un **magnete permanente**, il tipo usato per attaccare un appunto al frigorifero, ha un campo magnetico permanente. In altri materiali i campi magnetici degli elettroni si annullano, dando un campo magnetico risultante nullo attorno a essi. Questo annullamento è la ragione per la quale non avete un campo permanente attorno al corpo, ed è un bene, altrimenti potreste essere sbattuti contro la porta di un frigorifero ogni volta che ci passate vicino.

Il nostro primo obiettivo in questo capitolo è definire il campo magnetico B . Lo facciamo usando l'osservazione sperimentale in base alla quale quando una particella carica si muove in un campo magnetico una forza magnetica F_B agisce sulla particella.

Definizione di B

Abbiamo determinato il campo elettrico E in un punto ponendo una particella di prova con carica q ferma in quel punto e misurando la forza elettrica F_E che agisce sulla particella. Abbiamo poi definito E come

$$E = \frac{F_E}{q} \quad (28.1)$$

Se fosse disponibile un monopolo magnetico, potremmo definire B in modo simile. Poiché particelle di questo tipo non sono state trovate in natura, dobbiamo definire B in altro modo, ossia in termini della forza magnetica F_B esercitata su una particella di prova elettricamente carica in moto.

Particella carica in movimento. In linea di principio, possiamo lanciare una particella carica attraverso il punto in cui B deve essere definito, variando la direzione e la velocità della particella e determinando la forza F_B che agisce sulla particella in quel punto. Dopo molte prove di questo tipo scopriremmo che, quando la velocità v della particella è diretta lungo un particolare asse passante per quel punto, la forza F_B è nulla. Per tutte le altre direzioni di v , il modulo di F_B è sempre proporzionale a $v \sin \phi$, dove ϕ è l'angolo tra l'asse lungo il quale la forza è nulla e la direzione di v . Inoltre, la direzione di F_B è sempre perpendicolare alla direzione di v . (Questi risultati suggeriscono che c 'è di mezzo un prodotto vettoriale.)

Il campo. Possiamo allora definire un **campo magnetico B** come una grandezza vettoriale diretta come l'asse lungo il quale la forza è nulla. Possiamo poi misurare il modulo di F_B quando v è diretta perpendicolarmente a questo particolare asse e infine definire il modulo di B in termini del modulo di tale forza:

$$B = \frac{F_B}{|q|v}$$

dove q è la carica della particella.

Possiamo riassumere tutti questi risultati nella seguente equazione vettoriale:

$$F_B = qv \times B \quad (28.2)$$

cioè, la forza F_B esercitata sulla particella è uguale alla carica q moltiplicata per il prodotto vettoriale tra la velocità v e il campo magnetico B (tutti misurati nello stesso sistema di riferimento). Usando l'equazione 3.20, possiamo scrivere il modulo di F_B come

$$F_B = |q|vB \sin \phi \quad (28.3)$$

dove ϕ è l'angolo tra le direzioni della velocità v e del campo magnetico B .

Trovare la forza magnetica che agisce su una particella

L'equazione 28.3 ci dice che il modulo della forza F_B che agisce su una particella in un campo magnetico è proporzionale alla carica q e alla velocità v della particella. Pertanto, la forza è nulla se la carica è nulla o se la particella è ferma. L'equazione 28.3 ci dice anche che il modulo della forza è zero se v e B sono paralleli ($\phi = 0^\circ$) o antiparalleli ($\phi = 180^\circ$) e la forza è massima quando v e B sono perpendicolari tra loro.

Le dita si chiudono da \mathbf{v} verso \mathbf{B} per ottenere $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$.

La forza su una carica positiva.

La forza su una carica negativa.

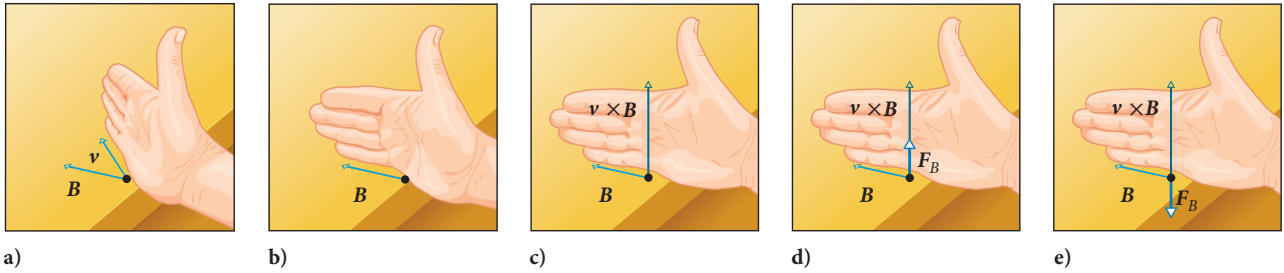


Figura 28.2 a-c) La regola della mano destra (in cui le dita partendo da \mathbf{v} si muovono verso \mathbf{B} descrivendo il più piccolo angolo ϕ tra i due vettori) dà la direzione e il verso di $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ indicati dal pollice. **d)** Se q è positiva, il verso di $\mathbf{F}_B = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ è il verso di $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$. **e)** Se q è negativa, il verso di $\mathbf{F}_B = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ è opposto a quello di $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$.

Direzioni e versi. L'equazione 28.2 ci dice tutto ciò e in più ci dà la direzione e il verso di \mathbf{F}_B . Dal paragrafo 3.3 sappiamo che il prodotto vettoriale $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ nell'equazione 28.2 è un vettore perpendicolare ai due vettori \mathbf{v} e \mathbf{B} . La regola della mano destra (Figure 28.2a-c) ci dice che il pollice della mano destra punta nella direzione e nel verso di $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ quando le dita si chiudono da \mathbf{v} verso \mathbf{B} . Se q è positiva, (per l'equazione 28.2), la forza \mathbf{F}_B ha lo stesso segno di $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ e quindi lo stesso verso del prodotto vettoriale; ossia, per q positiva, \mathbf{F}_B è diretta lungo il pollice (Figure 28.2d). Se q è negativa, la forza \mathbf{F}_B e il prodotto vettoriale $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ hanno segni opposti e quindi devono essere diretti in versi opposti. Per q negativa, \mathbf{F}_B è diretta nel verso opposto rispetto al pollice (Figure 28.2e). *Attenzione:* trascurare l'effetto di q negativa è un errore molto comune negli esami.

Tuttavia, a prescindere dal segno della carica, si ha che:



la forza \mathbf{F}_B che agisce su una particella carica che si muove con velocità \mathbf{v} attraverso un campo magnetico \mathbf{B} è *sempre* perpendicolare a \mathbf{v} e a \mathbf{B} .

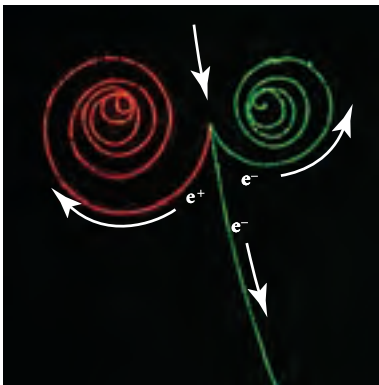


Figura 28.3 Le tracce di due elettroni (e^-) e di un positrone (e^+) in una camera a bolle immersa in un campo magnetico uniforme diretto perpendicolarmente al piano della pagina nel verso uscente.

Ne consegue che \mathbf{F}_B non ha *mai* una componente parallela a \mathbf{v} . Questo vuol dire che \mathbf{F}_B non può modificare la velocità v della particella (e quindi nemmeno l'energia cinetica della particella). La forza può cambiare solo la direzione di \mathbf{v} (e quindi la direzione e il verso del moto); solo in questo senso la forza \mathbf{F}_B può accelerare la particella.

Per comprendere meglio l'equazione 28.2 consideriamo la **Figura 28.3**, che mostra alcune tracce lasciate da particelle cariche che si muovono rapidamente in una camera a bolle. La camera, che è riempita di idrogeno liquido, è immersa in un intenso campo magnetico uniforme, diretto perpendicolarmente al piano della pagina nel verso uscente. Un raggio gamma incidente, che non lascia tracce perché non è carico, si trasforma in un elettrone (la traccia a forma di spirale indicata con e^-) e in un positrone (la traccia indicata con e^+), mentre colpisce e allontana un elettrone da un atomo di idrogeno (la traccia lunga indicata con e^-). Verificate con l'equazione 28.2 e la **Figura 28.2** che le tre tracce lasciate dalle due particelle negative e dalla particella positiva curvano nel verso giusto.

Unità di misura. Nel SI l'unità di misura di \mathbf{B} , che discende dalle equazioni 28.2 e 28.3, è il newton fratto coulomb per metro al secondo. Per comodità questa unità è chiamata **tesla** (T):

$$1 \text{ tesla} = 1 \text{ T} = 1 \frac{\text{newton}}{(\text{coulomb})(\text{metro}/\text{secondo})}$$

Ricordando che un coulomb al secondo equivale a un ampere, abbiamo

$$1 \text{ T} = 1 \frac{\text{newton}}{(\text{coulomb}/\text{secondo})(\text{metro})} = 1 \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}} \quad (28.4)$$

Un'unità per \mathbf{B} (non del SI) usata precedentemente, e tuttora di uso comune, è il **gauss** (G):

$$1 \text{ tesla} = 10^4 \text{ gauss} \quad (28.5)$$

La **Tabella 28.1** elenca i moduli dei campi magnetici presenti in alcune situazioni. Notate che il campo magnetico terrestre vicino alla superficie del pianeta è circa 10^{-4} T (= $100 \mu\text{T}$ o 1 G).

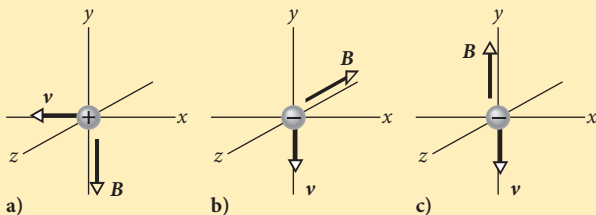
Tabella 28.1 Alcuni valori approssimati del campo magnetico.

Sulla superficie di una stella di neutroni	10^8 T
In prossimità di un grande elettromagnete	$1,5 \text{ T}$
Vicino a una barra magnetica	10^{-2} T
Sulla superficie della Terra	10^{-4} T
Nello spazio interstellare	10^{-10} T
Il più piccolo valore in una camera magneticamente schermata	10^{-14} T



VERIFICA 1

La figura mostra tre situazioni in cui una particella carica che ha velocità v attraversa un campo magnetico uniforme B . In ciascuna situazione, quali sono la direzione e il verso della forza magnetica F_B che agisce sulla particella?



Linee del campo magnetico

Possiamo rappresentare il campo magnetico con le linee di campo, proprio come abbiamo fatto per il campo elettrico. Valgono regole simili: (1) la direzione della tangente a una linea di campo magnetico in un punto qualsiasi dà la direzione e il verso di B in quel punto e (2) la spaziatura tra le linee è una misura del modulo di B : il campo magnetico è più intenso dove le linee sono più ravvicinate e viceversa.

La **Figura 28.4a** mostra come il campo magnetico nelle vicinanze di una *barra magnetica* (un magnete permanente a forma di barra) possa essere rappresentato da linee di campo magnetico. Tutte le linee passano attraverso il magnete e tutte formano percorsi chiusi (anche quelle che non sono mostrate nella figura). Gli effetti magnetici esterni di una barra magnetica sono più intensi vicino alle sue estremità, dove le linee di campo sono più ravvicinate. Pertanto, il campo magnetico della barra magnetica nella **Figura 28.4b** raccoglie i filamenti di ferro principalmente vicino alle due estremità del magnete.

Due poli. Le linee di campo (chiuso) entrano da un'estremità del magnete ed escono dall'altra. L'estremità da cui le linee di campo emergono è detta *polo nord* del magnete; l'altra estremità, dove le linee del campo entrano nel magnete, è detta *polo sud* del magnete. Poiché un magnete ha due poli, è detto **dipolo magnetico**. Le calamite che usiamo comunemente per fissare foglietti sullo sportello del frigorifero sono corte barrette magnetiche. La **Figura 28.5** presenta altre due forme comuni per i magneti: un magnete a *ferro di cavallo* e un magnete che è stato piegato a forma di C, in modo che *le facce dei poli* siano l'una di fronte all'altra. (Il campo magnetico tra le facce dei poli può così essere approssimativamente uniforme.) Indipendentemente dalla forma dei magneti, se ne poniamo due vicini l'uno all'altro troviamo che:



poli magnetici opposti si attraggono e poli magnetici uguali si respingono.

Quando tenete con le mani due magneti vicini l'uno all'altro, questa attrazione o repulsione sembra quasi magica, perché non c'è contatto tra i due magneti che giustifichi in modo evidente la trazione o la spinta. Come abbiamo fatto per la forza elettrostatica tra due particelle cariche, spieghiamo questa interazione a distanza in termini di un campo che non si può vedere, in questo caso il campo magnetico.

La Terra ha un campo magnetico generato nel suo nucleo da meccanismi ancora ignoti. Sulla superficie terrestre possiamo rilevare questo campo magnetico con una bussola, che è essenzialmente una sottile barra magnetica libera di ruotare attorno a un perno con basso attrito. Questa barra, o ago, ruota perché il suo polo nord è attratto verso la regione artica della Terra. Pertanto, il polo sud del campo magnetico terrestre deve essere localizzato verso l'Artico della Terra. A rigore di logica, dovremmo chiamare polo sud il polo che si trova in quella regione. Tuttavia, poiché chiamiamo nord quella direzione, siamo costretti ad affermare che la Terra ha lì un *polo nord geomagnetico*.

Con delle misure più accurate troveremmo che nell'emisfero nord le linee di campo magnetico della Terra generalmente puntano in basso dentro la Terra e verso l'Artico. Nell'emisfero sud le linee di forza escono dalla Terra e puntano nella direzione opposta rispetto all'Antartide, cioè in direzione opposta rispetto al *polo sud geomagnetico*.



Figura 28.4 a) Le linee del campo magnetico di una barra magnetica. **b)** Una «calamita per bovini», una barra magnetica che viene introdotta nel ruminale delle mucche per impedire che pezzetti di ferro ingeriti accidentalmente raggiungano l'intestino dell'animale. L'orientazione dei filamenti di ferro alle estremità della calamita rivela la direzione delle linee del campo magnetico.

Le linee di campo escono dal polo nord ed entrano nel polo sud.

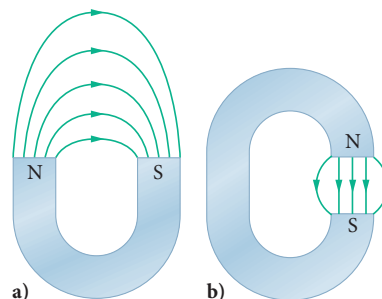


Figura 28.5 a) Una calamita a forma di ferro di cavallo e **b)** un magnete a forma di C. (Sono disegnate solo alcune linee di campo.)

Problema svolto 28.1 Forza magnetica agente su una particella carica in moto

Un campo magnetico uniforme B di modulo 1,2 mT è diretto verticalmente verso l'alto nel volume di una camera di laboratorio. Un protone con energia cinetica 5,3 MeV entra nella camera, muovendosi orizzontalmente da sud a nord. Quale forza di deflessione magnetica agisce sul protone quando questo entra nella camera? La massa del protone è $1,67 \cdot 10^{-27}$ kg. (Trascurate il campo magnetico terrestre.)

SOLUZIONE

Poiché il protone ha una carica e attraversa un campo magnetico, esso è sottoposto a una forza magnetica F_B . Poiché la direzione iniziale della velocità del protone non è lungo una linea del campo magnetico, F_B non è semplicemente zero.

Modulo. Per trovare il modulo di F_B possiamo usare l'equazione 28.3 ($F_B = |q|vB \sin \phi$), purché prima troviamo la velocità v del protone. Possiamo trovare v dall'energia cinetica, perché $K = \frac{1}{2}mv^2$. Risolvendo rispetto a v , otteniamo

$$v = \sqrt{\frac{2K}{m}} = \sqrt{\frac{(2)(5,3 \text{ MeV})(1,60 \cdot 10^{-13} \text{ J/MeV})}{1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}}$$

$$= 3,2 \cdot 10^7 \text{ m/s}$$

L'equazione 28.3 dà allora

$$F_B = |q|vB \sin \phi$$

$$= (1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C})(3,2 \cdot 10^7 \text{ m/s})(1,2 \cdot 10^{-3} \text{ T}) \sin 90^\circ$$

$$= 6,1 \cdot 10^{-15} \text{ N}$$

Può sembrare una forza piccola, ma agisce su una particella di massa piccola, imprimendole una grande accelerazione; infatti

$$a = \frac{F_B}{m} = \frac{6,1 \cdot 10^{-15} \text{ N}}{1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}} = 3,7 \cdot 10^{12} \text{ m/s}^2$$

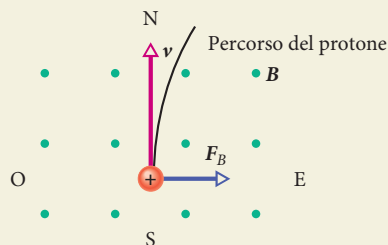


Figura 28.6 Vista dall'alto di un protone che si muove da sud a nord con velocità v in una camera di laboratorio. Un campo magnetico è diretto verticalmente verso l'alto nella camera, come indicato dallo schema di punti (che assomigliano alle punte delle frecce). Il protone viene deviato verso est.

Direzione e verso. Per trovare la direzione di F_B usiamo il fatto che F_B ha la stessa direzione e lo stesso verso del prodotto vettoriale $q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$. Poiché la carica q è positiva, F_B deve avere la stessa direzione e lo stesso verso di $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$, che può essere determinato con la regola della mano destra (come nella **Figura 28.2d**). Sappiamo che \mathbf{v} è diretta orizzontalmente da sud a nord e \mathbf{B} è diretto verticalmente verso l'alto. La regola della mano destra ci mostra che la forza deflettente F_B deve essere diretta orizzontalmente da ovest a est, come mostra la **Figura 28.6**. (La griglia di punti nella figura rappresenta un campo magnetico perpendicolare al piano della figura stessa e uscente da esso. Una griglia di X avrebbe rappresentato un campo magnetico perpendicolare ed entrante in quel piano.)

Se la carica della particella fosse negativa, la forza di deflessione magnetica avrebbe verso opposto, cioè sarebbe orizzontale da est verso ovest. Lo si deduce dall'equazione 28.2 se sostituiamo a q un valore negativo.

28.2 CAMPI INCROCIATI: LA SCOPERTA DELL'ELETTRONE

Idee chiave

- Se una particella carica si muove in una regione in cui sono presenti sia un campo elettrico sia un campo magnetico, può essere influenzata sia da una forza elettrica sia da una forza magnetica.
- Se i campi sono perpendicolari l'uno all'altro, sono detti *campi incrociati*.
- Se le forze hanno versi opposti, una particolare velocità darà luogo all'assenza di deflessione della particella.

Campi incrociati: la scoperta dell'elettrone

Sia un campo elettrico E sia un campo magnetico B possono generare una forza che agisce su una particella carica. Quando i due campi sono perpendicolari l'uno all'altro si dicono *campi incrociati*. Qui esamineremo che cosa accade alle particelle cariche – per esempio a un elettrone – quando attraversano campi incrociati. Usiamo come esempio l'esperimento che ha portato alla scoperta dell'elettrone nel 1897 da parte di J. J. Thomson all'università di Cambridge.

Due forze. La **Figura 28.7** mostra una versione semplificata e moderna dell'apparato sperimentale di Thomson, ossia un *tubo a raggi catodici* (che è come quello di un vecchio apparecchio televisivo). Delle particelle cariche (che noi ora sappiamo essere elettroni) sono emesse da un filamento incandescente sul retro del tubo, in cui è stato fatto il vuoto, e sono accelerate da una differenza di potenziale applicata V . Dopo essere passati attraverso una fenditura sullo schermo C, le particelle formano un fascio sottile. Poi attraversano una regione di campi incrociati E e B , dirette verso uno schermo fluorescente S, dove producono un punto luminoso (sullo schermo di un televisore il punto luminoso è parte dell'immagine).

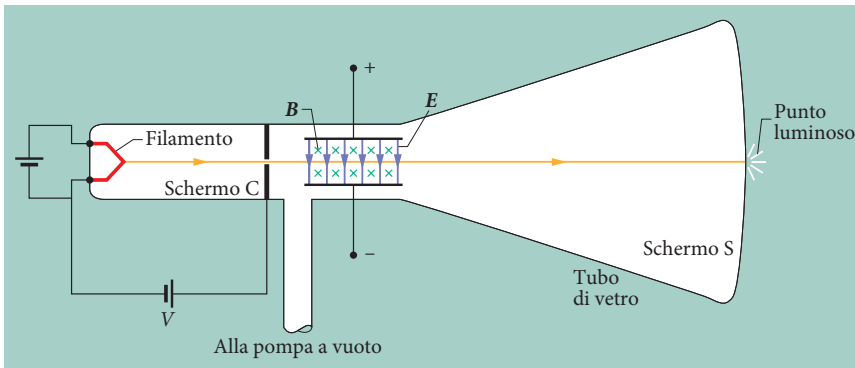


Figura 28.7 Una versione moderna dell'apparato di J. J. Thomson per la misura del rapporto tra massa e carica dell'elettrone. Un campo elettrico E è prodotto collegando una batteria ai terminali dei piatti di deviazione. Il campo magnetico B è prodotto da una corrente in un sistema di bobine (non mostrate). Il campo magnetico mostrato entra nel piano della figura, come indicato dallo schema di X (che rassomigliano alle code delle frecce piumate).

Le forze che agiscono sulle particelle cariche nella regione dei campi incrociati possono deviarle dal centro dello schermo S. Controllando i moduli, le direzioni e i versi dei campi, Thomson poté regolare a piacere dove far apparire il punto luminoso sullo schermo. Ricordate che la forza che agisce su una particella carica negativamente dovuta a un campo elettrico ha verso opposto al campo. Pertanto, per la configurazione della **Figura 28.7**, gli elettroni sono forzati a muoversi nel piano della pagina verso l'alto dal campo elettrico E e verso il basso dal campo magnetico B ; cioè, le due forze si oppongono l'una all'altra. Il procedimento di Thomson fu equivalente alla seguente serie di passaggi.

1. Porre $E = 0$ e $B = 0$ e notare la posizione del punto sullo schermo S dovuta al fascio non deviato.
2. Applicare il campo elettrico E e misurare la risultante deviazione del fascio.
3. Mantenendo E , applicare un campo magnetico B e regolare il suo valore finché il fascio non torna alla posizione di deviazione nulla. (Con le forze in versi opposti si può fare in modo che queste si annullino a vicenda.)

Abbiamo discusso la deviazione di una particella carica che si muove in un campo elettrico E tra due piatti (passaggio 2 qui) nel problema svolto 22.5. Abbiamo trovato che la deviazione della particella all'estremità più lontana dei piatti è

$$y = \frac{|q|EL^2}{2mv^2} \quad (28.6)$$

dove v è la velocità della particella, m la sua massa, q la sua carica, L la lunghezza dei piatti. Possiamo applicare questa stessa equazione al fascio di elettroni della **Figura 28.7**; se necessario, possiamo calcolare la deviazione misurandola sullo schermo S e poi risalendo a ritroso alla deviazione y alla fine dei piatti. (Poiché il verso della deviazione è dato dal segno della carica della particella, Thomson poté mostrare che le particelle che illuminavano la parte superiore del suo schermo erano cariche negativamente.)

Forze che si elidono. Quando i due campi nella **Figura 28.7** sono regolati in modo che le rispettive forze di deflessione si bilanciano (passaggio 3), dalle equazioni 28.1 e 28.3 abbiamo

$$|q|E = |q|vB \sin(90^\circ) = |q|vB$$

oppure

$$v = \frac{E}{B} \quad (\text{forze opposte che si annullano a vicenda}) \quad (28.7)$$

Così i campi incrociati ci permettono di misurare la velocità delle particelle cariche che vi passano attraverso. Eliminando v tra le equazioni 28.6 e 28.7 e riordinando i termini si arriva a

$$\frac{m}{|q|} = \frac{B^2L^2}{2yE} \quad (28.8)$$

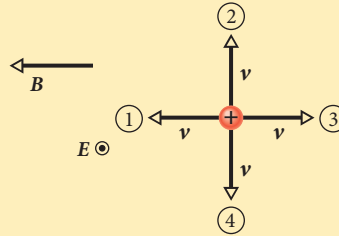
nella quale tutte le grandezze a destra dell'uguale possono essere misurate. Quindi, i campi incrociati ci permettono di misurare il rapporto $m/|q|$ delle particelle in moto nell'apparato di Thomson. (*Attenzione:* l'equazione 28.7 si applica solo quando le forze elettrica e magnetica hanno versi opposti. Potreste incontrare casi diversi negli esercizi.)

Thomson sostenne che queste particelle si trovavano in tutta la materia. Affermò anche che fossero più leggere del più leggero atomo conosciuto (idrogeno) di un fattore superiore a 1000. (L'esatto rapporto dimostrato successivamente è 1836,15.) La sua misura di $m/|q|$, combinata con l'audacia delle sue due affermazioni, si ritiene che rappresenti la «scoperta dell'elettrone».



VERIFICA 2

La figura mostra quattro orientazioni per il vettore velocità \mathbf{v} di una particella dotata di carica positiva in moto in un campo elettrico uniforme \mathbf{E} (uscendo dalla pagina e rappresentato da un punto con un cerchietto attorno) e un campo magnetico uniforme \mathbf{B} . (a) Mettete le direzioni 1, 2 e 3 in ordine decrescente del modulo della forza risultante agente sulla particella. (b) Quale delle quattro orientazioni può dar luogo a una forza risultante nulla?



28.3 CAMPI INCROCIATI: L'EFFETTO HALL

Idee chiave

- Quando un campo magnetico uniforme \mathbf{B} è applicato a una lamina conduttrice percorsa dalla corrente i , con il campo perpendicolare alla direzione della corrente, una differenza di potenziale V si stabilisce nella lamina per effetto Hall.
- La forza elettrica \mathbf{F}_E che agisce sui portatori di carica è allora bilanciata dalla forza magnetica \mathbf{F}_B esercitata su di essi.
- La densità n dei portatori di carica può allora essere determinata dall'equazione

$$n = \frac{Bi}{Vle}$$

dove l è lo spessore della lamina (parallela a \mathbf{B}).

- Quando un conduttore si muove in un campo magnetico uniforme \mathbf{B} con velocità \mathbf{v} , la tensione di Hall V nel conduttore è

$$V = vBd$$

dove d è la larghezza del conduttore perpendicolare sia alla velocità \mathbf{v} sia al campo \mathbf{B} .

Campi incrociati: l'effetto Hall

Come abbiamo appena visto, un fascio di elettroni nel vuoto può essere deviato da un campo magnetico. Gli elettroni di conduzione che scorrono in un filo di rame possono anch'essi essere devianti da un campo magnetico? Nel 1879 Edwin H. Hall, allora ventiquattrenne dottorando alla Johns Hopkins University, dimostrò che è possibile. Questo **effetto Hall** ci permette di determinare se i portatori di carica in un conduttore sono positivamente o negativamente carichi. Oltre a questo, possiamo misurare il numero di tali portatori per unità di volume del conduttore.

La **Figura 28.8a** mostra una lamina di rame di larghezza d , che trasporta una corrente i il cui verso è convenzionalmente dall'alto verso il basso nella figura. I portatori di carica sono elettroni e , come sappiamo, si muovono (con velocità di deriva v_d) nel verso opposto a quello della corrente, dall'alto verso il basso. All'istante mostrato nella **Figura 28.8a**, è appena stato applicato un campo magnetico esterno \mathbf{B} , perpendicolare al piano della figura nel verso entrante. Dall'equazione 28.2 vediamo che una forza di deflessione magnetica \mathbf{F}_B agirà su ogni elettrone in moto, spingendolo verso il margine destro della lamina.

Col passare del tempo gli elettroni si muovono verso destra, accumulandosi per lo più sul margine destro della lamina e lasciando delle cariche positive non bilanciate in posizioni fisse sul lato sinistro. La separazione tra le cariche positive sul lato sinistro e quelle negative sul lato destro produce un campo elettrico \mathbf{E} all'interno della lamina, diretto da sinistra a destra nella **Figura 28.8b**. Questo campo esercita una forza elettrica \mathbf{F}_E su ciascun elettrone, spingendolo verso

sinistra. Così, questa forza elettrica agente sugli elettroni, che si oppone alla forza magnetica presente su di essi, comincia ad aumentare.

Equilibrio. Rapidamente si instaura uno stato di equilibrio, in cui la forza elettrica su ogni elettrone è aumentata a sufficienza per uguagliare la forza magnetica. Quando ciò avviene, come mostra la **Figura 28.8b**, la forza dovuta a \mathbf{B} e la forza dovuta a \mathbf{E} si bilanciano. Gli elettroni si muovono lungo la lamina verso l'alto della pagina alla velocità v_d senza alcun ulteriore accumulo di elettroni sul lato sinistro della lamina e quindi senza alcun aumento del campo elettrico \mathbf{E} .

Una *tensione di Hall* V è associata al campo elettrico agli estremi della lamina di larghezza d . Dall'equazione 24.21, il modulo di quella differenza di potenziale è

$$V = Ed \quad (28.9)$$

Collegando un voltmetro ai due bordi della lamina, possiamo misurare la differenza di potenziale tra i suoi due lati. Inoltre, il voltmetro ci può dire quale bordo sia a un potenziale più alto. Per il caso della **Figura 28.8b** troveremmo che il margine sinistro è a un potenziale più alto, il che è coerente con la nostra ipotesi che i portatori di carica siano carichi negativamente.

Per un istante facciamo l'ipotesi opposta che i portatori di carica nella corrente i siano positivamente carichi (**Figura 28.8c**). Convincetevi che, mentre si spostano dall'alto verso il basso della lamina, questi portatori di carica vengono spinti verso il *margin destro* da F_B e che quindi quest'ultimo è il bordo a potenziale maggiore. Poiché quest'ultima affermazione è contraddetta dalla lettura del nostro voltmetro, i portatori di carica devono essere carichi negativamente.

Densità numerica. Analizziamo ora il fenomeno dal punto di vista quantitativo. Quando la forza elettrica e quella magnetica sono in equilibrio (**Figura 28.8b**), le equazioni 28.1 e 28.3 danno

$$eE = ev_d B \quad (28.10)$$

Dall'equazione 26.7, la velocità di deriva v_d è

$$v_d = \frac{J}{ne} = \frac{i}{neA} \quad (28.11)$$

dove $J (= i/A)$ è la densità di corrente nella lamina, A è l'area della sezione trasversale della lamina e n è la *densità* dei portatori di carica (numero per unità di volume).

Introducendo l'equazione 28.9 e l'equazione 28.11 nell'equazione 28.10, si ottiene

$$n = \frac{Bi}{Vle} \quad (28.12)$$

dove $l (= A/d)$ è lo spessore della lamina. Con questa equazione possiamo trovare n da grandezze misurabili.

Velocità di deriva. È anche possibile usare l'effetto Hall per misurare direttamente la velocità di deriva v_d dei portatori di carica che, come ricorderete, è dell'ordine del centimetro all'ora. In questo ingegnoso esperimento, la lamina di metallo viene mossa meccanicamente nel campo magnetico nel verso opposto a quello della velocità dei portatori di carica. La velocità della lamina in moto viene poi regolata finché la tensione di Hall svanisce. In tale condizione, in assenza di effetto Hall, la velocità dei portatori di carica *rispetto al sistema di riferimento del laboratorio* deve essere zero, allora la velocità della lamina dev'essere uguale in modulo alla velocità dei portatori di carica negativi e avere verso opposto a questa.

Conduttore in moto. Quando un conduttore comincia a muoversi a una velocità v in un campo magnetico, i suoi elettroni di conduzione fanno altrettanto. Allora si comportano come gli elettroni di conduzione in moto nella corrente della **Figura 28.8a** e della **28.8b**, e un campo elettrico \mathbf{E} e una differenza di potenziale V sono rapidamente generati. Come nel caso della corrente, si stabilisce un equilibrio tra la forza elettrica e quella magnetica, ma ora scriviamo tale condizione in termini della velocità v del conduttore, anziché della velocità di deriva v_d in una corrente come abbiamo fatto nell'equazione 28.10:

$$eE = evB$$

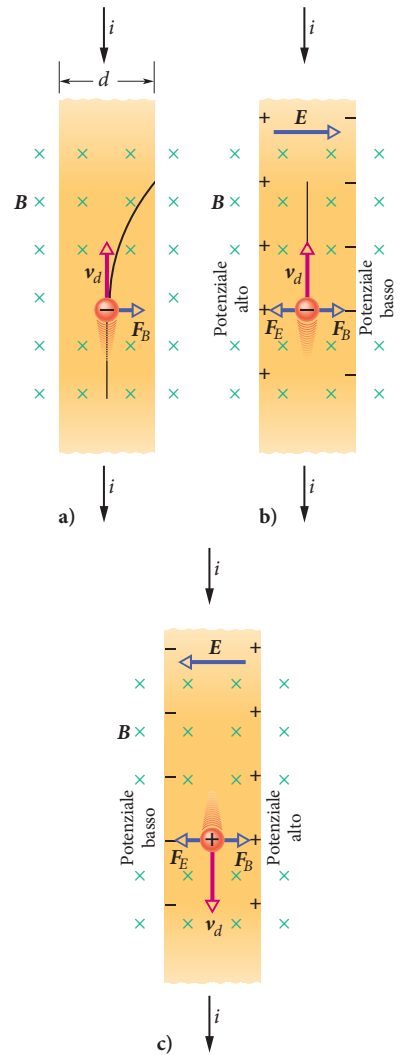


Figura 28.8 Una lamina di rame percorsa da una corrente i è immersa in un campo magnetico \mathbf{B} . **a)** La situazione immediatamente dopo che è stato applicato il campo. Viene mostrato il percorso curvo seguito da un elettrone. **b)** La situazione all'equilibrio, che segue subito dopo. Notate che le cariche negative si accumulano sul lato destro della lamina, lasciando cariche positive non bilanciate sulla sinistra. Il lato sinistro è dunque a un potenziale più alto del lato destro. **c)** Per lo stesso verso della corrente, se i portatori di carica fossero carichi positivamente, si accumulerebbero sul lato destro e questo si troverebbe a un potenziale più alto.

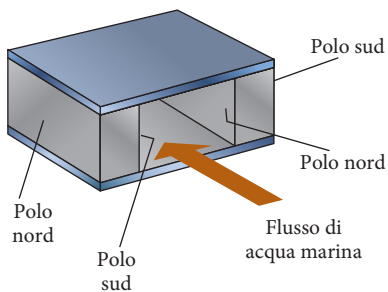


Figura 28.9 Le caratteristiche essenziali della guida silenziosa di navi e sottomarini.



Figura 28.10 Lo Yamato-1 era una nave in dimensioni reali azionata per effetto magnetoidrodinamico.

Introducendo l'espressione di E data dall'equazione 28.9, troviamo che la differenza di potenziale è

$$V = vBd \tag{28.13}$$

Una tale differenza di potenziale nel circuito causata dal moto può creare seri problemi in certe situazioni, come quando un conduttore che opera su un satellite si muove nel campo magnetico terrestre. Tuttavia, facendo penzolare dal satellite un cavo conduttore (detto *cavo elettrodinamico*), la differenza di potenziale prodotta lungo il cavo può essere usata per le manovre del satellite.

Guida magnetoidrodinamica

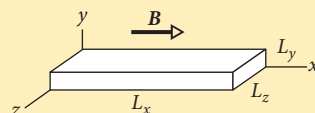
La silenziosissima «caterpillar drive» dei sottomarini del film *Caccia a ottobre rosso* è basata su un azionamento magnetoidrodinamico (MHD): mentre la nave si muove in avanti, l'acqua di mare passa attraverso numerosi canali in una struttura costruita attorno alla parte posteriore dello scafo. La **Figura 28.9** mostra le caratteristiche essenziali di un canale MHD. I magneti, posizionati lungo i lati opposti del canale con i poli opposti gli uni di fronte agli altri, creano un campo magnetico orizzontale dentro il canale. La piastra superiore e quella inferiore creano un campo elettrico, che porta una corrente verso il basso attraverso l'acqua (conduttrice). La situazione è quindi simile al tradizionale effetto Hall e una forza magnetica sulla corrente spinge l'acqua verso la parte posteriore del canale, spingendo così la nave in avanti. Una nave di dimensioni reali che usava l'effetto MHD è stata costruita all'inizio degli anni '90 in Giappone (**Figura 28.10**). Alcuni progetti per costruire navi in scala ridotta sono disponibili su internet.



VERIFICA 3

La figura mostra un blocco conduttore rettangolare in un campo magnetico uniforme. Per le lunghezze dei lati abbiamo che $L_x > L_z > L_y$.

Possiamo spostare il blocco a $v = 4 \text{ cm/s}$ lungo l'asse x , lungo l'asse y o lungo l'asse z . Mettete queste scelte della direzione in ordine decrescente della tensione di Hall che si creerebbe nel blocco.



Problema svolto 28.2 Differenza di potenziale in un conduttore in movimento

La **Figura 28.11a** mostra un cubo pieno di metallo di spigolo $d = 1,5 \text{ cm}$ in moto lungo il semiasse positivo delle y a una velocità costante v di modulo $4,0 \text{ m/s}$. Il cubo attraversa un campo magnetico uniforme B di modulo $0,050 \text{ T}$ nel verso positivo dell'asse z .

(a) Quale faccia del cubo si trova al potenziale elettrico più basso e quale al potenziale più alto a causa del moto nel campo?

SOLUZIONE (a)

Poiché il cubo si muove in un campo magnetico B , una forza magnetica F_B agisce sulle sue particelle cariche, compresi i suoi elettroni di conduzione.

Ragionamento. Quando il cubo comincia ad attraversare il campo magnetico, altrettanto fanno i suoi elettroni. Poiché ciascuno di essi ha carica q e si muove nel campo con velocità v , la forza magnetica F_B che agisce sull'elettrone è data dall'equazione 28.2. Poiché q è negativa, il verso di F_B è opposto a quello del prodotto vettoriale $v \times B$, che è nel verso positivo dell'asse x (**Figura 28.11b**). Pertanto, la forza F_B è nel verso negativo dell'asse x , verso la faccia sinistra del cubo (**Figura 28.11c**).

Gli elettroni sono per lo più fissi nelle loro posizioni negli atomi del cubo. Tuttavia, essendo questo di metallo, contiene elettroni di conduzione che sono liberi di muoversi. Alcuni di questi elettroni di conduzione sono deviati da F_B verso la

faccia sinistra del cubo e la rendono carica negativamente, lasciando la faccia destra carica positivamente (**Figura 28.11d**). Questa separazione di carica genera un campo elettrico E diretto dalla faccia carica positivamente alla faccia sinistra carica negativamente (**Figura 28.11e**). La faccia sinistra è quindi a un potenziale elettrico più basso e la faccia destra è a un potenziale elettrico più alto.

(b) Qual è la differenza di potenziale tra le due facce?

SOLUZIONE (b)

1. Il campo elettrico E generato dalla separazione di cariche produce una forza elettrica $F_E = qE$ agente su ciascun elettrone (**Figura 28.11f**). Poiché q è negativa, questa forza è diretta nel verso opposto al campo E , ossia verso destra. Quindi, su ciascun elettrone, F_E agisce verso destra e F_B verso sinistra.
2. Non appena il cubo inizia a muoversi nel campo magnetico e inizia la separazione di cariche, il modulo di E inizia ad aumentare a partire da zero. Quindi, anche il modulo di F_E comincia ad aumentare da zero ed è inizialmente minore del modulo di F_B . In questa prima fase la forza risultante su ciascun elettrone è dominata da F_B , che sposta continuamente altri elettroni verso la faccia sinistra del cubo, aumentando la separazione di carica tra la faccia sinistra e la faccia destra del cubo (**Figura 28.11g**).

28.5 CICLOTRONI E SINCROTRONI

Idee chiave

- In un ciclotrone le particelle cariche sono accelerate da forze elettriche mentre compiono un moto circolare in un campo magnetico.
- Un sincrotrone è necessario per accelerare le particelle quasi alla velocità della luce.

Ciclotroni e sincrotroni

I fasci di particelle ad alta energia, come gli elettroni e protoni ad alta energia, sono stati enormemente utili per esplorare gli atomi e i nuclei e rivelare la struttura fondamentale della materia. Tali fasci sono stati gli strumenti che hanno consentito di scoprire che i nuclei atomici sono formati da protoni e da neutroni e che protoni e neutroni sono composti da quark e gluoni. Poiché gli elettroni e i protoni sono particelle cariche, possono essere accelerati alle alte energie richieste se si muovono attraverso elevate differenze di potenziale. La distanza di accelerazione necessaria è ragionevole per gli elettroni (massa modesta), ma diventa improponibile per i protoni (massa più grande).

Un'ingegnosa soluzione a questo problema è di far muovere i protoni e altre particelle pesanti in una differenza di potenziale modesta (in modo che guadagnino una modesta quantità di energia) e poi usare un campo magnetico per far sì che tornino indietro su una traiettoria circolare e si muovano di nuovo attraverso una modesta differenza di potenziale. Se questa procedura è ripetuta migliaia di volte, le particelle finiscono per avere un'energia molto elevata.

Qui discutiamo due *acceleratori* che fanno uso di un campo magnetico per riportare ripetutamente le particelle in una regione in cui sono accelerate, dove guadagnano sempre più energia fino a che non emergono come un fascio di particelle ad alta energia.

Ciclotrone

La **Figura 28.17** è una vista dall'alto della regione di un *ciclotrone* in cui le particelle (protoni, per esempio) si muovono di moto circolare. I due oggetti cavi a forma di D (ciascuno di essi aperto sulla sua estremità diritta) sono fatti di una lastra di rame. Questi elettrodi a D sono le parti di un oscillatore elettrico, che stabilisce una differenza di potenziale alternata tra gli elettrodi a D. I segni elettrici sugli elettrodi sono alternati in modo che il campo elettrico nell'intercapedine alterni il verso, prima verso un elettrodo e poi verso l'altro, avanti e indietro. Questi elettrodi sono immersi in un intenso campo magnetico la cui direzione è perpendicolare e uscente dal piano della pagina.

Supponiamo che un protone, iniettato da una sorgente S al centro del ciclotrone della **Figura 28.17**, si muova inizialmente verso l'elettrodo carico negativamente. Il protone accelera verso questo elettrodo e vi penetra. Una volta entrato, esso viene «schermato» dai campi elettrici dovuti alle pareti di rame dell'elettrodo; cioè, il campo elettrico non entra nel disco. Il campo magnetico, comunque, non è schermato dall'elettrodo di rame (non magnetico), così il protone si muove su un'orbita circolare il cui raggio, che dipende dalla velocità, è dato dall'equazione 28.16 ($r = mv/(|q|B)$).

Supponiamo che nell'istante in cui il protone emerge dal primo elettrodo ed entra nell'intercapedine centrale la differenza di potenziale tra gli elettrodi sia invertita. Così il protone si trova *di nuovo* di fronte a un elettrodo carico negativamente ed è *di nuovo* accelerato. Questo processo continua, dato che il protone in circolo è sempre al passo con le oscillazioni del potenziale dell'elettrodo, fino a quando il protone esce lungo una spirale dal margine del sistema a elettrodi. A questo punto una piastra di deflessione lo dirige verso un foro d'uscita.

Frequenza. Il punto chiave per il funzionamento del ciclotrone è che la frequenza f con la quale il protone circola nel campo magnetico (e che *non* dipende dalla sua velocità) deve essere uguale alla frequenza fissa f_{osc} dell'oscillatore elettrico, ossia

$$f = f_{\text{osc}} \quad (\text{condizione di risonanza}) \quad (28.23)$$

Questa *condizione di risonanza* dice che, per poter aumentare l'energia del protone in circolazione, l'energia deve essere fornita a una frequenza f_{osc} uguale alla frequenza naturale f alla quale il protone circola nel campo magnetico.

Nel ciclotrone i protoni percorrono una spirale verso l'esterno acquistando energia mentre attraversano l'intercapedine.

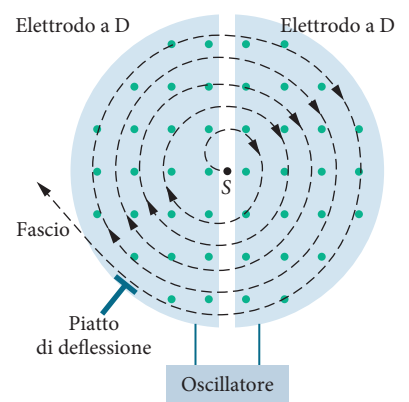


Figura 28.17 Gli elementi che compongono un ciclotrone, con la sorgente S e gli elettrodi a forma di D. Un campo magnetico uniforme è perpendicolare e uscente dal piano della figura. I protoni che circolano percorrono spirali verso l'esterno dentro gli elettrodi cavi, acquisendo energia ogni volta che attraversano l'intercapedine tra gli elettrodi.

La combinazione delle equazioni 28.18 ($f = |q|B/(2\pi m)$) e 28.23 ci permette di scrivere la condizione di risonanza come

$$|q|B = 2\pi m f_{\text{osc}} \quad (28.24)$$

L'oscillatore (supponiamo) è progettato per lavorare a una singola frequenza fissa f_{osc} . Quindi, «sintonizziamo» il ciclotrone variando B finché l'equazione 28.24 è soddisfatta e di conseguenza molti protoni circolano attraverso il campo magnetico per emergere come un fascio.

Protosincrotrone

Per le energie dei protoni superiori a 50 MeV il ciclotrone convenzionale comincia a non funzionare, perché una delle ipotesi su cui si basa, cioè che la frequenza di rivoluzione di una particella carica circolante in un campo magnetico sia indipendente dalla velocità della particella, è vera solo per velocità molto minori della velocità della luce. Per velocità dei protoni più elevate (al di sopra di circa il 10% della velocità della luce), dobbiamo trattare il problema con le leggi relativistiche. Secondo la teoria relativistica, quando la velocità di un protone in moto circolare si avvicina a quella della luce, la frequenza di rivoluzione del protone circolante diminuisce costantemente. Così i protoni non sono più al passo con l'oscillatore del ciclotrone, la cui frequenza rimane fissata a f_{osc} , e alla fine l'energia del protone ancora circolante smette di aumentare.

C'è un altro problema. Per un protone da 500 GeV in un campo magnetico di 1,5 T il raggio dell'orbita è di 1,1 km. Il corrispondente magnete per un ciclotrone convenzionale della giusta misura sarebbe inarrivabilmente costoso, visto che l'area della sua espansione polare sarebbe di circa $4 \cdot 10^6 \text{ m}^2$.

Il protosincrotrone è pensato per superare queste due difficoltà. Il campo magnetico B e la frequenza dell'oscillatore f_{osc} , invece di avere valori fissi come nel ciclotrone convenzionale, sono progettati per variare nel tempo durante il ciclo di accelerazione. Quando ciò viene fatto in modo appropriato, (1) la frequenza dei protoni in circolo rimane al passo con l'oscillatore in ogni istante e (2) i protoni seguono un'orbita circolare, non a spirale. Così il magnete deve estendersi solo lungo quel percorso circolare e non su tutta l'area di $4 \cdot 10^6 \text{ m}^2$. Il percorso circolare, tuttavia, deve comunque essere grande se si vogliono raggiungere alte energie.



VERIFICA 5

Un ciclotrone opera con un certo campo magnetico B e con tre tipi di particelle continuamente introdotte da sorgenti vicine al centro. Le particelle hanno la stessa carica, ma masse differenti: $m_1 > m_2 > m_3$. (a) Mettete i tipi di particelle in ordine decrescente della frequenza di oscillazione necessaria per la risonanza. (b) Ora mettete i tipi di particelle in ordine decrescente della loro velocità di uscita quando raggiungono la loro particolare risonanza.

Problema svolto 28.5 Ciclotroni e terapia a fasci di neutroni

Un'arma promettente nella battaglia contro alcuni tipi di tumore, come i tumori maligni delle ghiandole salivari, è la terapia a neutroni accelerati, in cui un fascio di neutroni ad alta energia (quindi, veloci) viene diretto in una regione cancerosa. I neutroni ad alta energia rompono i legami nel DNA delle cellule tumorali facendole morire e quindi eliminando il cancro. Tuttavia, i neutroni sono elettricamente neutri e quindi non possono essere accelerati da un campo elettrico in un lungo percorso per raggiungere alte velocità e un centro medico non può ospitare tale lungo percorso. La soluzione è usare un ciclotrone per accelerare particelle cariche ad alta velocità e poi far sì che il fascio uscente colpisca un bersaglio di berillio posto subito davanti alla regione cancerosa (Figura 28.18). Le collisioni energetiche producono neutroni veloci.

La tecnica è stata esplorata subito dopo l'invenzione dei ciclotroni negli anni '30, ma non ha attirato molta attenzione fino al

1966, quando è stata usata all'Hammersmith Hospital a Londra. Lì i deuteroni (ioni idrogeno con massa $m = 3,34 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$) si scontrarono contro un target di berillio dopo essere stati



Figura 28.18 Essendo invisibile, un fascio di neutroni dall'uscita alla destra è allineato tramite mirini laser, visti sovrapposti al paziente.

28.8 MOMENTO DI DIPOLO MAGNETICO

Idee chiave

- Una bobina (di area A e con N spire percorse da una corrente i) in un campo magnetico uniforme \mathbf{B} è soggetta a un momento torcente $\boldsymbol{\tau}$ dato da

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\mu} \times \mathbf{B}$$

Qui $\boldsymbol{\mu}$ rappresenta il momento di dipolo magnetico della bobina, il cui modulo è $\mu = NiA$ e il cui verso è dato dalla regola della mano destra.

- L'energia di orientazione di un dipolo magnetico in un campo magnetico è

$$U(\theta) = -\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B}$$

- Se un agente esterno ruota un dipolo magnetico da un'orientazione iniziale θ_i a un'altra orientazione θ_f e il dipolo è fermo sia all'inizio sia alla fine, il lavoro W_a compiuto sul dipolo dall'agente esterno è

$$W_a = \Delta U = U_f - U_i$$

Momento di dipolo magnetico

Come abbiamo visto, un momento torcente agisce per ruotare una bobina percorsa da corrente posta in un campo magnetico. In questo senso la bobina si comporta come una barra magnetica posta nello stesso campo magnetico. Per questo, analogamente alla barra magnetica, si dice che la bobina percorsa da corrente è un *dipolo magnetico*. Inoltre, per rendere conto del momento torcente che il campo esercita sulla bobina, assegniamo a essa un **momento di dipolo magnetico** $\boldsymbol{\mu}$. La direzione e il verso di $\boldsymbol{\mu}$ sono quelli del vettore \mathbf{n} normale al piano della bobina e quindi sono dati dalla regola della mano destra mostrata nella **Figura 28.24**. Ossia, afferrate la bobina con le dita della mano destra poste nella direzione e nel verso della corrente i : il pollice allungato di quella mano dà la direzione e il verso di $\boldsymbol{\mu}$. Il modulo di $\boldsymbol{\mu}$ è dato da

$$\mu = NiA \quad (\text{momento magnetico}) \quad (28.35)$$

in cui N è il numero di spire della bobina, i è la corrente che la percorre e A è l'area racchiusa da ogni avvolgimento della bobina. Da questa equazione, con i in amper e A in metri quadrati, vediamo che l'unità di misura di $\boldsymbol{\mu}$ è ampere moltiplicato metro quadrato ($A \cdot m^2$).

Momento torcente. Usando $\boldsymbol{\mu}$, possiamo riscrivere l'equazione 28.33 per il momento torcente che agisce sulla spira per effetto del campo magnetico come

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\mu} B \sin \theta \quad (28.36)$$

in cui θ è l'angolo tra i vettori $\boldsymbol{\mu}$ e \mathbf{B} .

Possiamo generalizzare questa equazione alla relazione tra i vettori:

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\mu} \times \mathbf{B} \quad (28.37)$$

che ci ricorda molto la corrispondente equazione per il momento esercitato da un campo *elettrico* su un dipolo *elettrico*, cioè l'equazione 22.34:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{p} \times \mathbf{E}$$

In ogni caso il momento torcente esercitato dal campo, sia magnetico sia elettrico, è uguale al prodotto vettoriale del corrispondente momento di dipolo e del vettore del campo.

Energia. Un dipolo magnetico in un campo magnetico esterno ha un'energia che dipende dall'orientazione del dipolo nel campo. Per i dipoli elettrici abbiamo mostrato (equazione 22.38) che

$$U(\theta) = -\mathbf{p} \cdot \mathbf{E}$$

Analogamente, possiamo scrivere per il caso magnetico

$$U(\theta) = -\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B} \quad (28.38)$$

In entrambi i casi l'energia dovuta al campo è l'opposto del prodotto scalare tra il momento di dipolo e il vettore di campo.

Un dipolo magnetico ha energia minima ($= -\mu B \cos 0^\circ = -\mu B$) quando il suo momento di dipolo $\boldsymbol{\mu}$ è allineato con il campo magnetico (**Figura 28.25**). Esso possiede la sua energia massima ($= -\mu B \cos 180^\circ = +\mu B$) quando $\boldsymbol{\mu}$ è orientato nel

Il vettore momento magnetico cerca di allinearsi col campo magnetico.

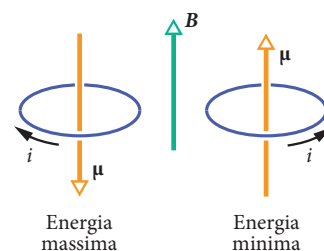


Figura 28.25 Le orientazioni di energia massima e minima di un dipolo magnetico (qui rappresentato da una spira percorsa da corrente) in un campo magnetico esterno \mathbf{B} . Il verso della corrente i dà il verso del momento di dipolo magnetico $\boldsymbol{\mu}$ tramite la regola della mano destra mostrata per \mathbf{n} nella Figura 28.24b.

verso opposto al campo. Dall'equazione 28.38 con U in joule e B in tesla, vediamo che l'unità di μ può essere joule per tesla (J/T), anziché ampere moltiplicato metro quadrato come suggerito nell'equazione 28.35.

Lavoro. Se un momento torcente applicato (ossia dovuto a «un agente esterno») ruota un dipolo magnetico da un'orientazione iniziale θ_i a un'altra orientazione θ_f , il lavoro W_a è compiuto sul dipolo dal momento torcente applicato. Se il dipolo è fermo prima e dopo la variazione di orientazione, il lavoro W_a è

$$W_a = U_f - U_i \quad (28.39)$$

dove U_f e U_i sono calcolate con l'equazione 28.38.

Finora abbiamo identificato solo una bobina percorsa da corrente e un magnete permanente come dipoli magnetici. Ma anche una sfera carica rotante è un dipolo magnetico, come lo è (approssimativamente) la Terra stessa. Infine, la maggior parte delle particelle subatomiche, compresi gli elettroni, i protoni e i neutroni, possiedono momenti di dipolo magnetico. Come vedrete nel capitolo 32, tutte queste entità possono essere considerate come spire percorse da corrente. Per confronto, alcuni valori approssimati del momento di dipolo magnetico sono riportati nella **Tabella 28.2**.

Tabella 28.2 Alcuni momenti di dipolo magnetico.

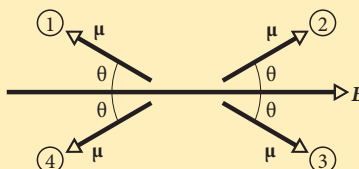
Piccola barra magnetica	5 J/T
Terra	$8,0 \cdot 10^{22}$ J/T
Protone	$1,4 \cdot 10^{-26}$ J/T
Elettrone	$9,3 \cdot 10^{-24}$ J/T

Linguaggio. Alcuni docenti si riferiscono a U nell'equazione 28.38 chiamandola energia potenziale e la collegano al lavoro compiuto dal campo magnetico quando l'orientazione di un dipolo cambia. Qui eviteremo di entrare nel dibattito e diremo che U è un'energia associata all'orientazione del dipolo.



VERIFICA 8

La figura mostra quattro orientazioni, con angolo θ , di un momento di dipolo magnetico μ in un campo magnetico. Disponete i quattro casi in ordine decrescente (a) del modulo del momento torcente sul dipolo e (b) dell'energia di orientazione del dipolo.



Problema svolto 28.7 Ruotare un dipolo magnetico in un campo magnetico

La **Figura 28.26** mostra una bobina circolare composta da 250 spire, che ha un'area A di $2,52 \cdot 10^{-4}$ m² ed è percorsa da una corrente di 100 μ A. La bobina è a riposo in un campo magnetico uniforme di modulo $B = 0,85$ T e il suo momento di dipolo magnetico μ è inizialmente allineato con B .

(a) Nella **Figura 28.26** qual è il verso della corrente nella bobina?

SOLUZIONE (a)

Regola della mano destra. Immaginate di racchiudere la bobina nel palmo della mano, in modo che il pollice destro sia nella direzione e nel verso di μ . Il verso in cui le vostre dita si curvano attorno alla bobina è il verso della corrente nella bobina. Pertanto, nei fili su lato vicino della bobina, quelli che vediamo nella **Figura 28.26**, la corrente scorre dall'alto verso il basso.

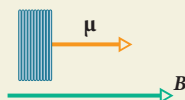


Figura 28.26 Una vista laterale di una bobina circolare percorsa da corrente e orientata in modo che il suo momento di dipolo magnetico μ sia allineato con il campo magnetico B .

(b) Quanto lavoro dovrebbe compiere sulla bobina un momento torcente applicato da un agente esterno per ruotarla di 90° dalla sua orientazione iniziale, in modo che μ sia perpendicolare a B e la bobina sia di nuovo a riposo?

SOLUZIONE (b)

Il lavoro W_a compiuto dal momento torcente applicato sarebbe uguale alla variazione dell'energia della bobina dovuta alla sua variazione di orientazione.

Calcoli. Dall'equazione 28.39 ($W_a = U_f - U_i$) troviamo

$$W_a = U(90^\circ) - U(0^\circ) = -\mu B \cos 90^\circ - (-\mu B \cos 0^\circ) \\ = 0 + \mu B = \mu B$$

Sostituendo a μ l'espressione data dall'equazione 28.35, troviamo

$$W_a = (NiA)B = (250)(100 \cdot 10^{-6} \text{ A})(2,52 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2)(0,85 \text{ T}) \\ = 5,355 \cdot 10^{-6} \text{ J} \approx 5,4 \mu\text{J}$$

Analogamente, possiamo mostrare che cambiare l'orientazione di altri 90°, in modo che il dipolo sia parallelo al campo ma nel verso opposto, richiederebbe un'energia di altri 5,4 μ J.

Sintesi

Campo magnetico B Un campo magnetico B è definito in termini della forza agente su una particella di prova dotata di carica q che si muove nel campo magnetico con velocità v :

$$F_B = qv \times B \quad (28.2)$$

L'unità di misura di B nel sistema SI è il **tesla** (T): $1 \text{ T} = 1 \text{ N}/(\text{A} \cdot \text{m}) = 10^4 \text{ gauss}$.

Effetto Hall Quando una lamina conduttrice percorsa da una corrente i è posta in un campo magnetico uniforme B , alcuni portatori di carica (con carica e) si accumulano su un bordo del conduttore, creando una differenza di potenziale V nella lamina. Le polarità dei due bordi indicano il segno dei portatori di carica.

Carica in moto circolare in un campo magnetico Una particella carica con massa m e carica $|q|$ che si muove con velocità v perpendicolare al campo magnetico uniforme B percorrerà una circonferenza. Applicando la seconda legge di Newton al moto circolare, abbiamo

$$|q| vB = \frac{mv^2}{r} \quad (28.15)$$

da cui troviamo il raggio della circonferenza

$$r = \frac{mv}{|q| B} \quad (28.16)$$

La frequenza di rivoluzione f , la pulsazione ω e il periodo T sono dati da

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{T} = \frac{|q| B}{2\pi m} \quad (28.19, 28.18, 28.17)$$

Forza magnetica su un filo percorso da corrente Un filo rettilineo percorso dalla corrente i in un campo magnetico uniforme subisce una forza trasversale

$$F_B = iL \times B \quad (28.26)$$

La forza agente su un elemento infinitesimo $i dL$ in un campo magnetico è

$$dF_B = i dL \times B \quad (28.28)$$

Il verso dell'elemento di lunghezza dL è quello della corrente i .

Momento torcente su una bobina percorsa da corrente Una bobina (di area A con N avvolgimenti e corrente i) in un campo magnetico uniforme B subisce un momento torcente τ dato da

$$\tau = \mu \times B \quad (28.37)$$

dove μ è il **momento di dipolo magnetico** della spira, con modulo $\mu = NiA$ e verso dato dalla regola della mano destra.

Energia di orientazione di un dipolo magnetico L'energia di orientazione di un dipolo magnetico in un campo magnetico è

$$U(\theta) = -\mu \cdot B \quad (28.38)$$

Se un agente esterno ruota un dipolo magnetico da un'orientazione iniziale θ_i a un'altra orientazione finale θ_f e il dipolo è fermo sia all'inizio sia alla fine, il lavoro W_a compiuto sul dipolo dall'agente esterno è

$$W_a = \Delta U = U_f - U_i \quad (28.39)$$

Domande

1. La **Figura 28.27** mostra tre situazioni in cui una particella carica positivamente si muove con velocità v in un campo magnetico uniforme B ed è soggetta a una forza magnetica F_B . In ciascuna situazione stabilite se le orientazioni dei vettori sono fisicamente ragionevoli.

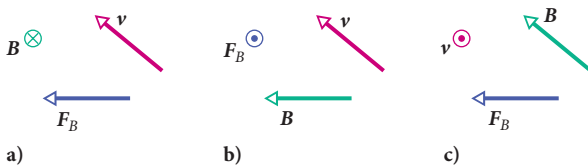


Figura 28.27 Domanda 1.

2. La **Figura 28.28** mostra un filo percorso da una corrente che scorre verso destra attraverso un campo magnetico uniforme. Sono mostrate anche quattro possibilità per la direzione e il verso di tale campo. (a) Mettete le possibilità in ordine decrescente del modulo della differenza di potenziale che si genererebbe nel filo. (b) Per quale possibilità il lato superiore del filo si trova a un potenziale più alto del lato inferiore?

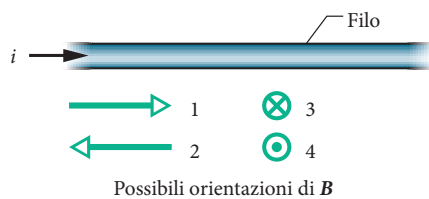


Figura 28.28 Domanda 2.

3. La **Figura 28.29** mostra un solido metallico a forma di parallelepipedo che si deve muovere a una data velocità v attraverso il campo magnetico uniforme B . Le dimensioni del solido sono multipli di d , come mostrato. Avete sei possibili scelte per la direzione e il verso della velocità: parallela a x , y o z sia nel verso positivo sia in quello negativo. (a) Mettete le sei possibilità in or-

dine decrescente della differenza di potenziale generata nel solido. (b) Per quale scelta la faccia frontale si trova a un potenziale inferiore?

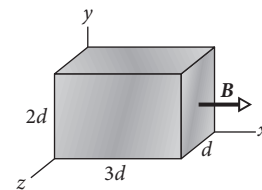


Figura 28.29 Domanda 3.

4. La **Figura 28.30** mostra la traiettoria di una particella in sei regioni in cui sono presenti campi magnetici uniformi e la traiettoria è una semicirconferenza oppure un quarto di circonferenza. Lasciando l'ultima regione, la particella entra tra le due armature parallele di un condensatore ed è deviata verso quella con potenziale maggiore. Quali sono la direzione e il verso del campo magnetico in ciascuna delle sei regioni?

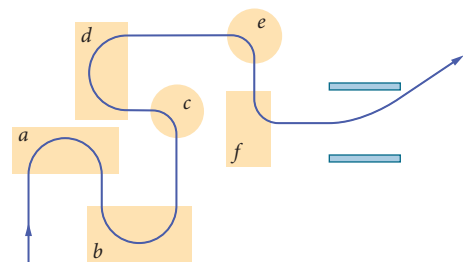


Figura 28.30 Domanda 4.

5. Nel paragrafo 28.2 abbiamo analizzato il caso di una particella carica in moto attraverso campi incrociati con forze F_E e F_B opposte l'una all'altra. Abbiamo stabilito che la particella procede in linea retta (cioè nessuna delle due forze domina il moto) se la sua velocità è data dall'equazione 28.7 ($v = E/B$). Quale delle due forze prevale se la velocità della particella è (a) $v < E/B$ e (b) $v > E/B$?

6. La **Figura 28.31** mostra il campo elettrico E e il campo magnetico B incrociati e, in un certo istante, i vettori velocità di 10 particelle cariche elencate nella **Tabella 28.3**. (I vettori non sono disegnati in scala). Le velocità date nella tabella sono sia minori sia maggiori di E/B (vedete la Domanda 5). Quali particelle si muoveranno nel verso uscente dal piano della pagina nell'istante mostrato nella **Figura 28.31**?

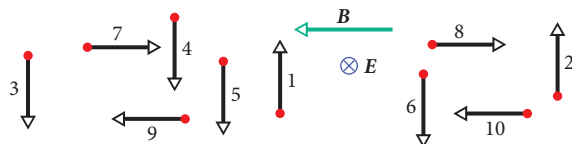


Figura 28.31 Domanda 6.

Tabella 28.3 Domanda 6.

Particella	Carica	Velocità	Particella	Carica	Velocità
1	+	minore	6	-	maggiore
2	+	maggiore	7	+	minore
3	+	minore	8	+	maggiore
4	+	maggiore	9	-	minore
5	-	minore	10	-	maggiore

7. La **Figura 28.32** mostra la traiettoria di un elettrone che attraversa due regioni in cui sono presenti campi magnetici uniformi di moduli B_1 e B_2 . La sua traiettoria in ciascuna regione è una semicirconfenza. (a) Qual è il campo con modulo maggiore? (b) Quali sono la direzione e il verso di ciascun campo? (c) Il tempo trascorso dall'elettrone nella regione in cui è presente B_1 è maggiore, minore o uguale di quello trascorso nella regione in cui è presente B_2 ?

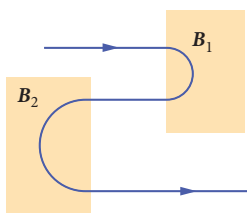


Figura 28.32 Domanda 7.

8. La **Figura 28.33** mostra la traiettoria di un elettrone in una regione in cui è presente un campo magnetico uniforme. Il percorso è formato da due segmenti di retta, ciascuno dei quali passa tra una coppia di armature uniformemente cariche, e da due semicirconfenze. Quale armatura si trova al potenziale più alto (a) nella coppia di armature in alto e (b) nella coppia di armature in basso? (c) Quali sono la direzione e il verso del campo magnetico?

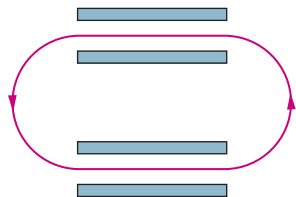


Figura 28.33 Domanda 8.

9. (a) Nella Verifica 8 se il momento del dipolo μ è ruotato dall'orientazione 2 all'orientazione 1 da un agente esterno, il lavoro compiuto sul dipolo è positivo, negativo o nullo? (b) Mettete in ordine decrescente il lavoro compiuto dall'agente esterno sul dipolo in queste tre rotazioni: $2 \rightarrow 1$, $2 \rightarrow 4$, $2 \rightarrow 3$.

10. **Rotonda di particelle.** La **Figura 28.34** mostra 11 traiettorie in un campo magnetico uniforme. Una è una retta; le altre sono semicirconfenze. La **Tabella 28.4** elenca le masse, le cariche e le velocità delle 11 particelle che percorrono queste traiettorie

nel campo nelle direzioni mostrate. Quale traiettoria nella figura corrisponde a ciascuna particella della tabella? (La direzione e il verso del campo magnetico, che è uno solo, possono essere determinati tramite una delle traiettorie.)

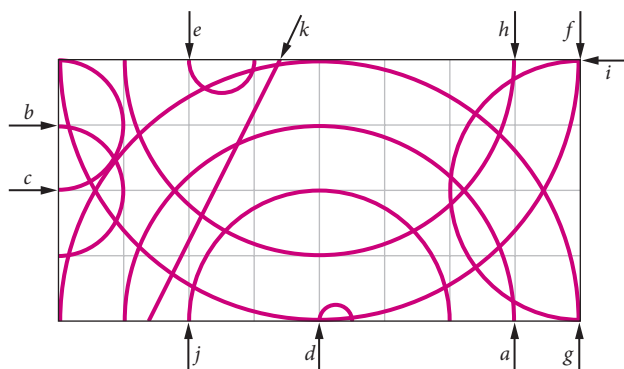


Figura 28.34 Domanda 10.

Tabella 28.4 Domanda 10.

Particella	Massa	Carica	Velocità
1	$2m$	q	v
2	m	$2q$	v
3	$m/2$	q	$2v$
4	$3m$	$3q$	$3v$
5	$2m$	q	$2v$
6	m	$-q$	$2v$
7	m	$-4q$	v
8	m	$-q$	v
9	$2m$	$-2q$	$3v$
10	m	$-2q$	$8v$
11	$3m$	0	$3v$

11. Nella **Figura 28.35** una particella carica entra in un campo magnetico uniforme B con velocità v_0 , percorre una semicirconfenza nel tempo T_0 e si allontana dal campo. (a) La carica è positiva o negativa? (b) La velocità finale della particella è maggiore, minore o uguale a v_0 ? (c) Se la velocità iniziale fosse stata $0,5v_0$, il tempo passato nel campo B sarebbe stato maggiore, minore o uguale a T_0 ? (d) La traiettoria sarebbe stata una semicirconfenza, più di una semicirconfenza o meno di una semicirconfenza?

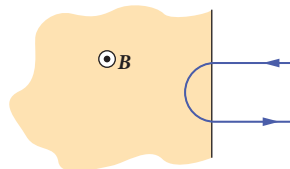


Figura 28.35 Domanda 11.

12. La **Figura 28.36** mostra delle istantanee di tre situazioni in cui una particella carica positivamente passa attraverso un campo magnetico uniforme B . Le velocità v della particella differiscono per l'orientazione nelle tre istantanee, ma non per il modulo. Mettete le situazioni in ordine decrescente (a) del periodo, (b) della frequenza e (c) del passo del moto della particella.

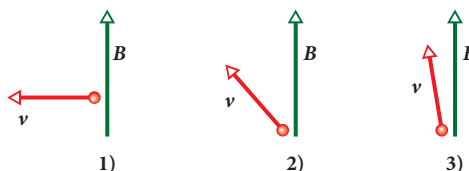


Figura 28.36 Domanda 12.

Problemi

MS Soluzioni disponibili nel Manuale delle soluzioni dettagliate

BIO Applicazione biomedica

Paragrafo 28.1 Campo magnetico e definizione di B

1. • **MS** Un protone in moto lungo una direzione che forma un angolo di $23,0^\circ$ rispetto alla direzione di un campo magnetico di modulo $2,60 \text{ mT}$ è soggetto a una forza magnetica di $6,50 \cdot 10^{-17} \text{ N}$. Calcolate (a) la velocità e (b) l'energia cinetica in eV del protone?

2. • Una particella di massa 10 g e carica $80 \mu\text{C}$ si muove in un campo magnetico uniforme nel quale l'accelerazione di gravità è data da $(-9,8 \text{ m/s}^2)\mathbf{j}$. La velocità della particella è $(20 \text{ km/s})\mathbf{i}$, costante e perpendicolare al campo magnetico. Quanto vale quindi il campo magnetico?

3. • Un elettrone che ha una velocità istantanea

$$\mathbf{v} = (2,0 \cdot 10^6 \text{ m/s})\mathbf{i} + (3,0 \cdot 10^6 \text{ m/s})\mathbf{j}$$

attraversa un campo magnetico uniforme $\mathbf{B} = (0,030 \text{ T})\mathbf{i} - (0,15 \text{ T})\mathbf{j}$. (a) Trovate la forza che agisce sull'elettrone ed è dovuta al campo magnetico. (b) Ripetete il calcolo per un protone che ha la stessa velocità.

4. • Una particella alfa attraversa con una velocità \mathbf{v} di modulo 550 m/s un campo magnetico uniforme \mathbf{B} di modulo $0,045 \text{ T}$. (Una particella alfa ha una carica q di $+3,2 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ e una massa m di $6,6 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.) L'angolo formato dai vettori \mathbf{v} e \mathbf{B} è 52° . Qual è il modulo (a) della forza F_B che agisce sulla particella e (b) dell'accelerazione della particella dovuta a F_B ? (c) La velocità della particella aumenta, diminuisce o resta uguale?

5. •• Un elettrone si muove in un campo magnetico uniforme dato da $\mathbf{B} = B_x\mathbf{i} + (3,0B_x)\mathbf{j}$. In un certo istante l'elettrone ha velocità $\mathbf{v} = (2,0\mathbf{i} + 4,0\mathbf{j}) \text{ m/s}$ e la forza magnetica a cui è sottoposto è $(6,4 \cdot 10^{-19} \text{ N})\mathbf{k}$. Trovate B_x .

6. •• Un protone si muove in un campo magnetico uniforme dato da $\mathbf{B} = (10\mathbf{i} - 20\mathbf{j} + 30\mathbf{k}) \text{ mT}$. All'istante t_1 il protone ha una velocità $\mathbf{v} = v_x\mathbf{i} + v_y\mathbf{j} + (2,0 \text{ km/s})\mathbf{k}$ e la forza magnetica sul protone è $F_B = (4,0 \cdot 10^{-27} \text{ N})\mathbf{i} + (2,0 \cdot 10^{-27} \text{ N})\mathbf{j}$. In quell'istante, quanto valgono (a) v_x e (b) v_y ?

Paragrafo 28.2 Campi incrociati: la scoperta dell'elettrone

7. • Un elettrone ha una velocità iniziale di $(12,0\mathbf{j} + 15,0\mathbf{k}) \text{ km/s}$ e un'accelerazione costante di $(2,00 \cdot 10^{12} \text{ m/s}^2)\mathbf{i}$ in una regione in cui sono presenti un capo elettrico e un campo magnetico uniformi. Se $\mathbf{B} = (400 \mu\text{T})\mathbf{i}$, trovate il campo elettrico \mathbf{E} .

8. • Un campo elettrico da $1,50 \text{ kV/m}$ e un campo magnetico da $0,400 \text{ T}$ agiscono su un elettrone in moto in maniera che la forza risultante su di esso sia nulla. Qual è la velocità dell'elettrone?

9. • Nella **Figura 28.37** un elettrone accelerato da fermo attraverso una differenza di potenziale $V_1 = 1,00 \text{ kV}$ entra nello spazio tra due piastre parallele poste a una distanza $d = 20,0 \text{ mm}$ l'una dall'altra tra le quali c'è una differenza di potenziale $V_2 = 100 \text{ V}$. La piastra inferiore ha il potenziale più basso. Trascurate gli effetti di bordo e supponete che il vettore della velocità dell'elettrone sia perpendicolare al vettore campo elettrico tra le piastre. Nella notazione con i versori, quale campo magnetico uniforme permette all'elettrone di muoversi in linea retta nello spazio tra le piastre?



Figura 28.37 Problema 9.

10. •• Un protone si muove attraverso un campo magnetico e un campo elettrico uniformi. Il campo magnetico è $\mathbf{B} = -2,50\mathbf{i} \text{ mT}$. In un certo istante la velocità del protone è $\mathbf{v} = 2000\mathbf{j} \text{ m/s}$. In quell'istante qual è, nella notazione con i versori, la forza risultante che agisce sul protone, se il campo elettrico è (a) $4,00\mathbf{k} \text{ V/m}$, (b) $-4,00\mathbf{k} \text{ V/m}$ e (c) $4,00\mathbf{i} \text{ V/m}$?

11. •• Una sorgente di ioni produce ioni di ${}^6\text{Li}$, che hanno carica totale $+e$ e massa $9,99 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. Gli ioni sono accelerati da una differenza di potenziale di 10 kV e passano orizzontalmente in una regione in cui è presente un campo magnetico verticale di modulo $B = 1,2 \text{ T}$. Calcolate il modulo del campo elettrico da generare nella stessa regione per permettere agli ioni di ${}^6\text{Li}$ di passare senza subire alcuna deviazione.

12. ••• Un elettrone è lanciato all'istante t_1 nel verso positivo dell'asse x attraverso un campo elettrico \mathbf{E} e un campo magnetico \mathbf{B} , con \mathbf{E} diretto parallelamente all'asse y . La **Figura 28.38** riporta la componente y della forza risultante agente sull'elettrone, $F_{\text{tot},y}$, dovuta ai due campi, in funzione della velocità v dell'elettrone all'istante t_1 . La scala dell'asse della velocità è data da $v_s = 100,0 \text{ m/s}$. Le componenti x e z della forza risultante sono nulle all'istante t_1 . Supponendo $B_x = 0$, trovate (a) il modulo E e (b) il vettore \mathbf{B} nella notazione con i versori.

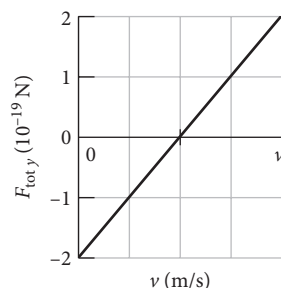


Figura 28.38 Problema 12.

Paragrafo 28.3 Campi incrociati: l'effetto Hall

13. • Una striscia di rame spessa $150 \mu\text{m}$ e larga $4,5 \text{ mm}$ è posta in un campo magnetico uniforme \mathbf{B} di modulo $0,65 \text{ T}$ perpendicolare alla striscia. Una corrente $i = 23 \text{ A}$ viene fatta passare nella striscia in modo che tra i suoi estremi compaia una tensione di Hall V . Calcolate V . (Il numero di portatori di carica per unità di volume nel rame è $8,47 \cdot 10^{28}$ elettroni/ m^3 .)

14. • Una striscia di metallo lunga $6,50 \text{ cm}$, larga $0,850 \text{ cm}$ e spessa $0,760 \text{ mm}$ si muove a una velocità costante \mathbf{v} attraverso un campo magnetico uniforme di modulo $B = 1,20 \text{ mT}$ diretto perpendicolarmente alla striscia, come mostrato nella **Figura 28.39**. Tra i punti x e y attraverso la striscia si misura una differenza di potenziale di $3,90 \mu\text{V}$. Calcolate la velocità v .

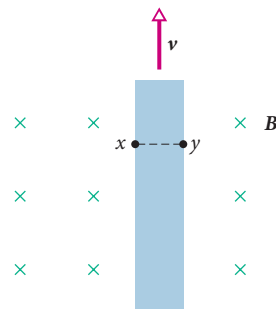


Figura 28.39 Problema 14.

15. •• Un parallelepipedo conduttore pieno di dimensioni $d_x = 5,00 \text{ m}$, $d_y = 3,00 \text{ m}$ e $d_z = 2,00 \text{ m}$ si muove alla velocità costante $\mathbf{v} = (20,0 \text{ m/s})\mathbf{i}$ attraverso un campo magnetico uniforme

Problemi di riepilogo

66. Un protone con carica $+e$ e massa m entra in un campo magnetico uniforme $\mathbf{B} = B\mathbf{i}$ con una velocità iniziale $\mathbf{v} = v_{0x}\mathbf{i} + v_{0y}\mathbf{j}$. Trovate un'espressione nella notazione con i versori per la sua velocità \mathbf{v} in un qualsiasi istante di tempo successivo t .

67. Un orologio circolare da muro fermo ha una faccia con un raggio di 15 cm. Sei giri di filo sono avvolti attorno al suo perimetro; il filo porta una corrente di 2,0 A in senso orario. L'orologio è posto in un campo magnetico esterno uniforme e costante di modulo 70 mT (ma l'orologio è comunque preciso). Esattamente alle 13:00 la lancetta delle ore è orientata come il campo magnetico esterno. (a) Dopo quanti minuti la lancetta dei minuti sarà orientata come il momento torcente che agisce sull'avvolgimento per effetto del campo? (b) Trovate il modulo del momento torcente.

68. Un filo che giace lungo un asse y da $y = 0$ a $y = 0,250$ m trasporta una corrente di 2,00 mA nel verso negativo dell'asse. Il filo si trova interamente in un campo magnetico non uniforme che è dato da $\mathbf{B} = (0,300 \text{ T/m})y\mathbf{i} + (0,400 \text{ T/m})y\mathbf{j}$. Nella notazione con i versori, qual è la forza magnetica che agisce sul filo?

69. L'atomo 1 di massa 35 u e l'atomo 2 di massa 37 u sono entrambi ionizzati con una carica $+e$. Dopo essere stati introdotti in uno spettrometro di massa (Figura 28.16) e accelerati da fermi attraverso una differenza di potenziale $V = 7,3$ kV, ciascuno ione segue una traiettoria circolare in un campo magnetico uniforme di modulo $B = 0,50$ T. Qual è la distanza Δx tra i punti in cui i due ioni colpiscono il rivelatore?

70. Un elettrone con un'energia cinetica di 2,5 keV, che si muove nel verso positivo dell'asse x , entra in una regione in cui è presente un campo magnetico di modulo 10 kV/m nel verso negativo dell'asse y . Un campo magnetico uniforme \mathbf{B} viene applicato per mantenere l'elettrone in moto lungo l'asse x e la direzione e il verso di \mathbf{B} sono scelti in modo da minimizzarne il modulo necessario. Nella notazione con i versori, quale \mathbf{B} dovrebbe essere applicato?

71. Il fisico S. A. Goudsmit escogitò un metodo per misurare le masse di ioni pesanti misurando il loro periodo di rivoluzione in un campo magnetico noto. Uno ione di iodio con carica $+e$ compie 7,00 rivoluzioni in un campo di 45,0 mT in 1,29 ms. Calcolate la sua massa in unità di massa atomica.

72. Un fascio di elettroni la cui energia cinetica è K emerge da una «finestra» fatta di una sottile lamina sul fondo di un tubo acceleratore. Una piastra di metallo è posta a una distanza d da questa finestra perpendicolarmente al fascio emergente (Figura 28.58). (a) Mostrate che possiamo evitare che il fascio colpisca la piastra se applichiamo un campo magnetico tale che

$$B \geq \sqrt{\frac{2mK}{e^2 d^2}}$$

in cui m ed e sono la massa e la carica dell'elettrone. (b) Come dovrebbe essere orientato \mathbf{B} ?

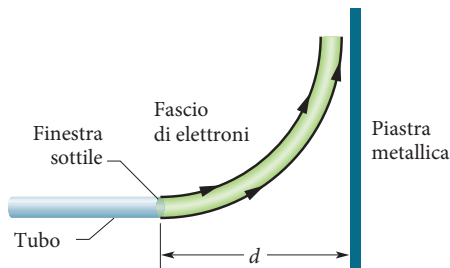


Figura 28.58 Problema 72.

73. MS All'istante $t = 0$ un elettrone con un'energia cinetica di 12 keV passa attraverso $x = 0$ nel verso positivo di un asse x parallelo alla componente orizzontale del campo magnetico della Terra \mathbf{B} . La componente verticale del campo è diretta verso il basso e ha un modulo di $55,0 \mu\text{T}$. (a) Qual è il modulo dell'accelerazio-

ne dell'elettrone dovuta a \mathbf{B} ? (b) Qual è la distanza dell'elettrone dall'asse x quando l'elettrone raggiunge la coordinata $x = 20$ cm?

74. Una particella con una carica di 2,0 C si muove in un campo magnetico uniforme. In un dato istante la velocità della particella è $(2,0\mathbf{i} + 4,0\mathbf{j} + 6,0\mathbf{k})$ m/s e la forza magnetica sulla particella è $(4,0\mathbf{i} - 20\mathbf{j} + 12\mathbf{k})$ N. Le componenti x e y del campo magnetico sono uguali. Quanto vale B ?

75. Un protone, un deutrone ($q = +e, m = 2,0$ u) e una particella alfa ($q = +2e, m = 4,0$ u), aventi tutti la stessa energia cinetica, entrano in una regione in cui è presente un campo magnetico uniforme \mathbf{B} , muovendosi perpendicolarmente a \mathbf{B} . Qual è il rapporto (a) tra il raggio r_d della traiettoria del deutrone e il raggio r_p di quella del protone e (b) il raggio r_α della traiettoria della particella alfa e r_p ?

76. Lo spettrometro di massa di Bainbridge, mostrato nella Figura 28.59, separa ioni di uguale velocità. Gli ioni, dopo essere passati attraverso le fenditure S_1 e S_2 , attraversano un selettore di velocità composto da un campo elettrico, generato dai piatti carichi P e P', e da un campo magnetico \mathbf{B} perpendicolare sia al campo elettrico sia alla traiettoria degli ioni. Gli ioni che emergono non deviati dai campi incrociati \mathbf{E} e \mathbf{B} entrano in un secondo campo magnetico \mathbf{B}' , dove sono forzati a compiere una traiettoria circolare. Una lastra fotografica (o un moderno rivelatore) registra il loro arrivo. Mostrate che, per gli ioni, $q/m = E/(rBB')$, dove r è il raggio dell'orbita circolare.

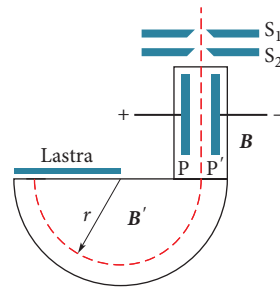


Figura 28.59 Problema 76.

77. MS Nella Figura 28.60 un elettrone si muove alla velocità $v = 100$ m/s lungo un asse x in una regione in cui sono presenti un campo elettrico e uno magnetico uniformi. Il campo magnetico \mathbf{B} è entrante nel piano della pagina e ha un modulo di 5,00 T. Qual è il campo elettrico nella notazione con i versori?

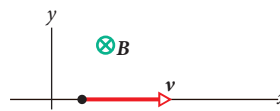


Figura 28.60 Problema 77.

78. (a) Nella Figura 28.8 mostrate che il rapporto tra il campo elettrico di Hall E e il campo elettrico E_c responsabile della carica in moto (la corrente) lungo la lunghezza della lamina è

$$\frac{E}{E_c} = \frac{B}{nep}$$

dove p è la resistività del materiale e n è la densità dei portatori di carica. (b) Calcolate numericamente questo rapporto per il Problema 13. (Vedete la Tabella 26.1)

79. MS Un protone, un deutrone ($q = +e, m = 2,0$ u) e una particella alfa ($q = +2e, m = 4,0$ u) sono accelerati dalla stessa differenza di potenziale e poi entrano nella stessa regione in cui è presente un campo magnetico uniforme \mathbf{B} , muovendosi perpendicolarmente a \mathbf{B} . Qual è il rapporto tra (a) l'energia cinetica del protone K_p e quella della particella alfa K_α e (b) l'energia cinetica del deutrone K_d e K_α ? Se il raggio della traiettoria circolare del protone è 10 cm, quali sono (c) il raggio della traiettoria del deutrone e (d) il raggio della traiettoria della particella alfa?

Jearl Walker

Halliday - Resnick Fondamenti di fisica

Elettromagnetismo • Ottica

Ottava edizione italiana condotta
sull'undicesima edizione americana

Inquadra
e scopri
i contenuti



Le risorse multimediali

online.universita.zanichelli.it/halliday-eo8e

A questo indirizzo sono disponibili le risorse multimediali di complemento al libro.

Per accedere alle risorse protette è necessario registrarsi su my.zanichelli.it inserendo il codice di attivazione personale contenuto nel libro.

Libro con Ebook

Chi acquista il libro nuovo può accedere gratuitamente all'Ebook, seguendo le istruzioni presenti nel sito.

L'accesso all'Ebook e alle risorse digitali protette è personale, non condivisibile e non cedibile, né autonomamente né con la cessione del libro cartaceo.

Nel 2002 l'American Physical Society ha insignito *Fondamenti di fisica* di Halliday, Resnick e Walker del titolo di miglior introduzione alla fisica generale del XX secolo, un tributo al suo impatto duraturo sulla formazione di generazioni di studenti e studentesse. *Fondamenti di fisica* si distingue per la trattazione rigorosa dei concetti di base nello stile chiaro e coinvolgente della migliore tradizione didattica americana.

Gli argomenti sono esposti in modo intuitivo, arricchiti da numerosi esempi di fisica applicata a discipline diverse e tratti dalle ricerche scientifiche più recenti. Questa combinazione rende lo studio dei concetti fisici avvincente e immediatamente applicabile.

Ciascun paragrafo si apre con un elenco per punti delle *idee chiave*; lungo il testo sono proposte *verifiche* (con soluzione online) e *problemi svolti* passo a passo, e le regole fondanti sono messe ben in evidenza per favorire la comprensione; i capitoli si concludono con una *sintesi* degli argomenti, *domande* di revisione, *problemi* di difficoltà diversa (alcuni con applicazioni biomediche) e *problemi di riepilogo* con soluzioni online. Questa edizione si distingue per un marcato interesse verso l'applicazione della fisica al corpo umano. Jearl Walker, che porta avanti l'aggiornamento dell'opera, ha analizzato infatti migliaia di articoli provenienti anche dalla ricerca in medicina, neuroscienze, ingegneria per illustrare come la fisica abbia a che fare direttamente con la nostra salute. L'autore esamina, tra gli altri, argomenti come le terapie con neutroni veloci per la cura dei tumori, la chirurgia robotica, la stimolazione magnetica transcranica per trattare disturbi neurologici e la magnetoencefalografia per lo studio delle funzioni cerebrali.

Una raccolta di domande interattive a scelta multipla, scritte appositamente per l'ottava edizione italiana, è disponibile online.

David Halliday (1916-2010) e **Robert Resnick** (1923-2014) sono stati due fisici americani che hanno rivoluzionato, con i loro libri, l'insegnamento della Fisica. Professori e autori, sono noti soprattutto per i libri di testo *Physics* e *Fundamentals of Physics*, tradotti in più di 47 lingue ed entrambi presenti nel catalogo CEA (Halliday, Resnick, Krane *Fisica* quinta edizione, 2003; e Halliday, Resnick, Krane *Fondamenti di fisica* ottava edizione, 2023).

Jearl Walker è professore di Fisica alla Cleveland State University e divulgatore scientifico. È autore anche di *The Flying Circus of Physics* che risponde a 740 domande sulla fisica nella vita di tutti i giorni.

HALLIDAY*FOND.FISICA ELETT 8E(CELUMKQ

ISBN 978-88-08-42330-6



9 788808 423306

5 6 7 8 9 0 1 2 3 (64D)