

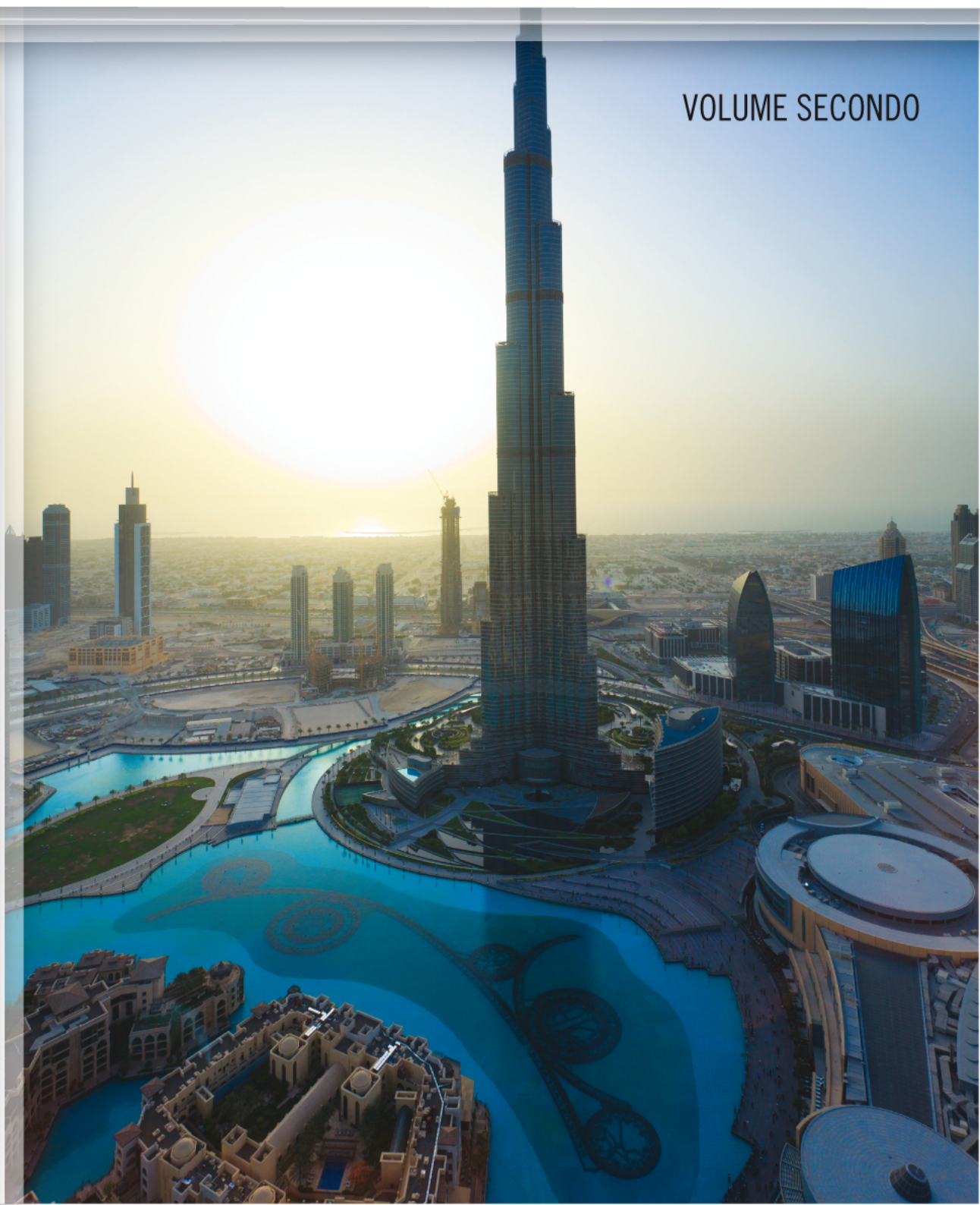
SERWAY • JEWETT

Quinta edizione

Fisica

per Scienze ed Ingegneria

VOLUME SECONDO



Fisica

per Scienze ed Ingegneria

Volume 2

V Edizione

Raymond A. Serway

Emeritus, James Madison University

John W. Jewett, Jr.

*Emeritus, California State Polytechnic
University, Pomona*

Con la collaborazione di Vahé Perroomian,
University of California at Los Angeles



© Ashley Cooper/Corbis

Indice generale

Autori VIII

Prefazione X

Per gli studenti XXIII

P A R T E 4 Elettricità e magnetismo 689

23 Campi elettrici 690

- 23.1 Proprietà delle cariche elettriche 690
- 23.2 Corpi caricati per induzione 692
- 23.3 Legge di Coulomb 694
- 23.4 Modello di analisi: particella in un campo (elettrico) 699
- 23.5 Campo elettrico di una distribuzione continua di carica 704
- 23.6 Linee di campo elettrico 708
- 23.7 Moto di una particella carica in un campo elettrico uniforme 710

24 Legge di Gauss 725

- 24.1 Flusso elettrico 725
- 24.2 Legge di Gauss 728
- 24.3 Applicazione della legge di Gauss a varie distribuzioni di carica 731
- 24.4 Conduttori in equilibrio elettrostatico 735

25 Potenziale elettrico 746

- 25.1 Potenziale elettrico e differenza di potenziale 746
- 25.2 Differenza di potenziale in un campo elettrico uniforme 748
- 25.3 Potenziale elettrico ed energia potenziale dovuti a cariche puntiformi 752
- 25.4 Ricavare il valore del campo elettrico dal potenziale elettrico 755
- 25.5 Potenziale elettrico dovuto a distribuzioni continue di carica 756

- 25.6 Potenziale elettrico dovuto a un conduttore carico 761
- 25.7 L'esperimento della goccia d'olio di Millikan 764
- 25.8 Applicazioni dell'elettrostatica 765

26 Capacità e dielettrici 777

- 26.1 Definizione di capacità 777
- 26.2 Calcolo della capacità 779
- 26.3 Combinazioni di condensatori 782
- 26.4 Energia immagazzinata in un condensatore carico 786
- 26.5 Condensatori con dielettrici 790
- 26.6 Dipolo elettrico in un campo elettrico 793
- 26.7 Una descrizione atomica dei dielettrici 795

27 Corrente e resistenza 808

- 27.1 Corrente elettrica 808
- 27.2 Resistenza 811
- 27.3 Un modello per la conduzione elettrica 816
- 27.4 Resistenza e temperatura 819
- 27.5 Superconduttori 819
- 27.6 Potenza elettrica 820

28 Circuiti in corrente continua 833

- 28.1 Forza elettromotrice 833
- 28.2 Resistori in serie ed in parallelo 836
- 28.3 Leggi di Kirchhoff 843
- 28.4 Circuiti RC 846
- 28.5 Reti elettriche e sicurezza elettrica nelle abitazioni 852

29 Campi magnetici 868

- 29.1 Modello di analisi: particella in un campo (magnetico) 869
- 29.2 Moto di una particella carica in un campo magnetico uniforme 874
- 29.3 Particelle cariche in moto in un campo magnetico: applicazioni 879
- 29.4 Forza magnetica agente su un conduttore percorso da corrente 882
- 29.5 Momento meccanico su una spira percorsa da corrente in un campo magnetico uniforme 885
- 29.6 L'effetto Hall 890

30 Sorgenti di campo magnetico 904

- 30.1 La legge di Biot-Savart 904
- 30.2 La forza magnetica fra due conduttori paralleli 909
- 30.3 Legge di Ampère 911
- 30.4 Il campo magnetico di un solenoide 915
- 30.5 Legge di Gauss nel magnetismo 917
- 30.6 Magnetismo nella materia 919

31 Legge di Faraday 935

- 31.1 Legge dell'induzione di Faraday 935
- 31.2 F.e.m. nei circuiti in moto 939
- 31.3 Legge di Lenz 944
- 31.4 F.e.m. indotte e campi elettrici indotti 947
- 31.5 Generatori e motori 949
- 31.6 Correnti parassite 953

32 Induttanza 970

- 32.1 Autoinduzione e induttanza 970
- 32.2 Circuiti RL 972
- 32.3 Energia in un campo magnetico 976
- 32.4 Mutua induttanza 978
- 32.5 Oscillazioni in un circuito LC 980
- 32.6 Il circuito RLC 984

33 Circuiti in corrente alternata 998

- 33.1 Generatori di tensione alternata 998
- 33.2 Resistori in un circuito in c.a. 999
- 33.3 Induttori in un circuito in c.a. 1002
- 33.4 Condensatori in un circuito in c.a. 1004
- 33.5 Il circuito RLC in serie 1007
- 33.6 Potenza in un circuito in c.a. 1011
- 33.7 Risonanza in un circuito RLC in serie 1013
- 33.8 Il trasformatore e la trasmissione di potenza 1015
- 33.9 Raddrizzatori e filtri 1018

34 Onde elettromagnetiche 1030

- 34.1 Corrente di spostamento e legge di Ampère generalizzata 1031
- 34.2 Equazioni di Maxwell e scoperte di Hertz 1033
- 34.3 Onde elettromagnetiche piane 1035
- 34.4 Energia trasportata dalle onde elettromagnetiche 1039
- 34.5 Quantità di moto e pressione di radiazione 1042
- 34.6 Produzione di onde elettromagnetiche da un'antenna 1044
- 34.7 Lo spettro delle onde elettromagnetiche 1045

P A R T E 5**Luce ed ottica 1057****35 La natura della luce e le leggi dell'ottica geometrica 1058**

- 35.1 La natura della luce 1058

- 35.2 Misure della velocità della luce 1059
- 35.3 L'approssimazione dei raggi nell'ottica geometrica 1061
- 35.4 Modello di analisi: riflessione delle onde 1061
- 35.5 Modello di analisi: rifrazione delle onde 1065
- 35.6 Principio di Huygens 1071
- 35.7 Dispersione 1072
- 35.8 Riflessione interna totale 1074

36 Formazione delle immagini 1090

- 36.1 Immagini formate da specchi piani 1090
- 36.2 Immagini formate da specchi sferici 1093
- 36.3 Immagini formate per rifrazione 1100
- 36.4 Immagini formate da lenti sottili 1104
- 36.5 Aberrazioni delle lenti 1112
- 36.6 La macchina fotografica 1113
- 36.7 L'occhio 1115
- 36.8 La lente di ingrandimento 1118
- 36.9 Il microscopio composto 1119
- 36.10 Il telescopio 1120

37 Ottica ondulatoria 1134

- 37.1 L'esperimento di Young della doppia fenditura 1134
- 37.2 Modello di analisi: interferenza delle onde 1137
- 37.3 Distribuzione di intensità nella figura di interferenza da doppia fenditura 1140
- 37.4 Variazione di fase dovuta alla riflessione 1143
- 37.5 Interferenza in lamine sottili 1144
- 37.6 L'interferometro di Michelson 1147

38 Figure di diffrazione e polarizzazione 1160

- 38.1 Introduzione alle figure di diffrazione 1160
- 38.2 Figure di diffrazione da fenditure sottili 1161
- 38.3 Risoluzione di singole fenditure e di aperture circolari 1166
- 38.4 Il reticolo di diffrazione 1169
- 38.5 Diffrazione di raggi X da cristalli 1174
- 38.6 Polarizzazione delle onde luminose 1175

P A R T E 6**Fisica moderna 1191****39 Relatività 1192**

- 39.1 Il principio di relatività galileiana 1193
- 39.2 L'esperimento di Michelson-Morley 1196
- 39.3 Il principio di relatività di Einstein 1198
- 39.4 Conseguenze della teoria della relatività ristretta 1199
- 39.5 Le equazioni di trasformazione di Lorentz 1210
- 39.6 Le equazioni di trasformazione delle velocità di Lorentz 1212
- 39.7 Quantità di moto relativistica 1214
- 39.8 Energia relativistica 1216
- 39.9 La teoria della relatività generale 1220

Appendici

A Tabelle A-1

- A.1 Fattori di conversione A-1
- A.2 Simboli, dimensioni e unità delle grandezze fisiche A-2

B Richiami di analisi matematica A-4

- B.1 Notazione scientifica A-4
- B.2 Algebra A-5
- B.3 Geometria A-10
- B.4 Trigonometria A-11
- B.5 Sviluppo in serie A-13
- B.6 Calcolo differenziale A-13
- B.7 Calcolo integrale A-16
- B.8 Propagazione degli errori A-20

C Tavola periodica degli elementi A-22

D Unità SI A-24

- D.1 Unità SI fondamentali A-24
- D.2 Unità SI derivate A-24

Risposte ai quiz e ai problemi con
numero dispari A-25

Indice analitico I-1

Curatori

Traduzione a cura di:

ANTONELLO ANDREONE – Università degli Studi di Napoli “Federico II”

CLAUDIO BAFFI – Università Cattolica del Sacro Cuore di Milano (sede di Piacenza)

DAVIDE CONTINI – Politecnico di Milano

GIUSEPPE IASELLI – Politecnico di Bari

VITTORIO MAGNI – Politecnico di Milano

PASQUINA MARZOLA – Università degli Studi di Verona

MARCO MARIA MASSAI – Università degli Studi di Pisa

FRANCESCA MONTI – Università degli Studi di Verona

MATTEO LUCA RUGGIERO – Politecnico di Torino

ADELE SASSELLA – Università degli Studi di Milano-Bicocca

ALESSANDRO TORRICELLI – Politecnico di Milano

Revisione a cura di:

CARLO ANGELINI – Università degli Studi di Pisa

MAURO MORGANTI – Accademia Navale di Livorno

Prefazione

Nella stesura di questa edizione di *Fisica per Scienze ed Ingegneria* abbiamo proseguito nello sforzo di rendere sempre più chiara l'esposizione degli argomenti e di introdurre nuovi strumenti pedagogici, nel tentativo di migliorare ancora i processi di apprendimento e di insegnamento. Per raffinare ulteriormente il testo ed andare sempre più incontro alle necessità degli studenti e degli insegnanti abbiamo fatto tesoro delle reazioni di chi ha utilizzato la precedente edizione e dei suggerimenti dei revisori.

Questo libro è pensato come libro di testo per un corso iniziale di base per studenti di scienze o di ingegneria. Il contenuto completo del libro nella sua versione estesa può essere coperto in un corso di tre semestri. È però anche possibile utilizzare solo una parte del materiale, semplicemente omettendo alcuni capitoli o paragrafi scelti opportunamente. Lo studente che inizi a seguire questo corso si troverebbe in una situazione ideale se fosse già in possesso di quelle conoscenze matematiche che normalmente si acquisiscono in un corso semestrale di calcolo differenziale. Se questo non fosse possibile, lo studente dovrebbe seguire il corso di matematica in parallelo al corso di fisica.

Contenuti

Il materiale di questo libro copre gli argomenti di base della fisica classica e fornisce una introduzione alla fisica moderna. Il libro è diviso in sei parti. La Parte 1 (Capitoli da 1 a 14) espone i fondamenti della meccanica newtoniana e della fisica dei fluidi; la Parte 2 (Capitoli da 15 a 18) riguarda le oscillazioni, le onde meccaniche ed il suono; la Parte 3 (Capitoli da 19 a 22) è dedicata al calore ed alla termodinamica; la Parte 4 (Capitoli da 23 a 34) tratta dell'elettricità e del magnetismo; la Parte 5 (Capitoli da 35 a 38) si occupa della luce e dell'ottica; la Parte 6 (Capitolo 39) affronta la relatività e la fisica moderna.

Obiettivi

Due sono gli obiettivi principali che questo testo di introduzione alla fisica si propone: il primo è quello di dare allo studente una presentazione chiara e logica dei fondamenti e dei concetti di base ed il secondo è quello di rendere più solida la comprensione di questi attraverso una scelta molto ampia di applicazioni che siano interessanti e realistiche. Per questo abbiamo voluto continuamente dare risalto sia agli argomenti fisici di base sia alla metodologia di risoluzione dei problemi. Contemporaneamente abbiamo cercato di motivare lo studente presentandogli degli esempi pratici, che dimostrano il ruolo rivestito dalla fisica in altre discipline, come l'ingegneria, la chimica e la medicina.

Novità di questa edizione

La nuova edizione di questo testo contiene un gran numero di migliorie e di cambiamenti. Alcune delle novità sono il frutto della nostra esperienza personale e delle tendenze più recenti della didattica della scienza. Altri cambiamenti sono

stati introdotti in seguito ai commenti ed ai suggerimenti avanzati dagli utilizzatori della precedente edizione e dai revisori del manoscritto. Quello che segue è un elenco delle novità più importanti contenute in questa edizione.

Migliore integrazione dell'approccio con modelli di analisi alla soluzione dei problemi. Gli studenti affrontano centinaia di problemi durante il corso di fisica, le cui basi sono costituite da un piccolo numero di principi fondamentali. Quando si trova ad affrontare un nuovo problema, il fisico crea un *modello* del problema che possa essere risolto in modo semplice identificando il principio fondamentale applicabile ad esso. Ad esempio, molti problemi riguardano la conservazione dell'energia, la seconda legge di Newton o le equazioni cinematiche. Poiché il fisico ha studiato estesamente questi principi e le loro applicazioni, egli applica tali conoscenze come modello per la soluzione di un nuovo problema. Benché sarebbe l'ideale per gli studenti seguire questa stessa procedura, la maggior parte di essi ha difficoltà ad acquisire dimestichezza con l'intero spettro di principi fondamentali disponibili. Per gli studenti è più semplice identificare una *situazione* piuttosto che un principio fondamentale.

L'*approccio con modelli di analisi* su cui focalizziamo l'attenzione si basa su un insieme standard di situazioni che compaiono nella maggior parte dei problemi di fisica. Tali situazioni sono riferite a un'entità appartenente a uno di quattro modelli semplificati: punto materiale, sistema, corpo rigido e onda. Una volta identificato il modello semplificato, lo studente pensa a cosa l'entità sta facendo o a come interagisce con il suo ambiente. Questo lo conduce ad identificare un determinato Modello di Analisi per il problema. Ad esempio, se un oggetto sta cadendo, esso è riconosciuto come un punto materiale sottoposto a un'accelerazione dovuta alla gravità che è costante. Lo studente ha appreso che il modello di analisi *punto materiale sottoposto ad accelerazione costante* descrive questa situazione. Inoltre, questo modello ha un piccolo numero di equazioni associate da usare per dare inizio alla soluzione del problema, le equazioni cinematiche presentate nel Capitolo 2. Pertanto, la comprensione della situazione ha condotto a un modello di analisi, che ha poi indicato un piccolissimo numero di equazioni per dare inizio alla soluzione del problema piuttosto che ricorrere alla miriade di equazioni che gli studenti vedono nel testo. In questo modo, l'uso dei modelli di analisi porta lo studente a identificare il principio fondamentale. Con l'acquisizione di un'esperienza sempre maggiore, lo studente farà sempre meno ricorso all'uso dei modelli di analisi e comincerà a identificare direttamente i principi fondamentali.

Per meglio integrare l'approccio con modelli di analisi in questa edizione, al termine di ogni paragrafo che introduce un nuovo modello di analisi è stato inserito un **box descrittivo "Modello di analisi"**. Questo elemento ricapitola il modello di analisi introdotto nel paragrafo e fornisce esempi dei tipi di problemi che lo studente potrebbe risolvere adoperando tale modello di analisi. Questi box fungono da "rinfrescata" prima che lo studente veda i modelli di analisi in uso negli esempi svolti relativi a un dato paragrafo.

La risoluzione degli esempi svolti nel testo che utilizzano i modelli di analisi integrano l'approccio con modelli di analisi alla soluzione dei problemi. L'approccio è ulteriormente rafforzato nel sommario di fine capitolo con il titolo *Modelli di analisi per la soluzione dei problemi*.

Tutorial con modelli di analisi. John Jewett ha sviluppato 165 tutorial che rafforzano le abilità di soluzione dei problemi degli studenti guidandoli passo passo nel processo di risoluzione dei problemi. Importanti passaggi iniziali comprendono la formulazione di previsioni e la focalizzazione su concetti fisici prima di risolvere il problema quantitativamente. Una componente critica di questi tutorial è la scelta di un adeguato modello di analisi per descrivere cosa sta accadendo nel problema. Questo passaggio consente agli studenti di fare l'importante associazione tra la situazione presentata nel problema e la sua rappresentazione matematica. I tutorial con modelli di analisi includono un feedback significativo ad ogni passaggio per aiutare gli studenti a fare pratica nella procedura di risoluzione dei problemi

e a migliorare le proprie abilità. Inoltre, il feedback affronta le convinzioni errate degli studenti e li aiuta a scovare gli errori algebrici e altri errori matematici. La risoluzione è descritta simbolicamente il più a lungo possibile, sostituendo i valori numerici solo alla fine. Questa caratteristica aiuta gli studenti a comprendere gli effetti delle variazioni dei valori di ciascuna variabile nel problema, evita la sostituzione ripetitiva non necessaria degli stessi numeri ed elimina gli errori di arrotondamento. Il feedback al termine del tutorial incoraggia gli studenti a confrontare la risposta finale con le loro previsioni originarie.



Novità capitolo per capitolo

L'elenco sottostante evidenzia alcune delle principali novità di questa edizione.

Capitolo 23

- È stato introdotto un *nuovo* modello di analisi: *particella in un campo (elettrico)*. Tale modello segue il modello di particella in un campo (gravitazionale) introdotto nel Capitolo 13. Nel Paragrafo 23.4 è stato aggiunto un riquadro descrittivo “Modello di analisi”. Inoltre, è stato aggiunto un nuovo riquadro riassuntivo nel sommario di fine capitolo e il materiale del testo è stato revisionato in modo da far riferimento al nuovo modello.
- Nell'Esempio 23.9 è stata aggiunta una nuova sezione “E se?” allo scopo di richiamare i piani infiniti di carica, trattati più approfonditamente nei capitoli successivi.
- Vari paragrafi ed esempi svolti sono stati revisionati, in modo da includere riferimenti più espliciti ai modelli di analisi.
- Sono stati aggiunti nuovi problemi di fine capitolo.

Capitolo 24

- Il Paragrafo 24.1 è stato profondamente revisionato per chiarire la geometria degli elementi di area che le linee di campo elettrico attraversano per generare un flusso elettrico.
- Sono state aggiunte due nuove figure all'Esempio 24.5 per esplorare più a fondo i campi elettrici dovuti a piani infiniti di carica singoli e accoppiati.
- Sono stati aggiunti nuovi problemi di fine capitolo.

Capitolo 25

- I Paragrafi 25.1 e 25.2 sono stati profondamente revisionati per includere collegamenti con i nuovi modelli di analisi di particella in un campo introdotti nei Capitoli 13 e 23.
- L'Esempio 25.4 è stato spostato dopo la Strategia per la soluzione dei problemi nel Paragrafo 25.5, in modo da consentire agli studenti di confrontare i campi elettrici dovuti a un piccolo numero di cariche e a una distribuzione continua di carica.
- Sono stati aggiunti nuovi problemi di fine capitolo.

Capitolo 26

- La trattazione dei condensatori in serie e in parallelo nel Paragrafo 26.3 è stata revisionata per renderla più chiara.
- La trattazione dell'energia potenziale associata a un dipolo elettrico in un campo elettrico nel Paragrafo 26.6 è stata revisionata per renderla più chiara.
- Sono stati aggiunti nuovi problemi di fine capitolo.

Capitolo 27

- La trattazione del modello di Drude per la conduzione elettrica nel Paragrafo 27.3 è stata revisionata in modo da seguire il profilo dei modelli strutturali introdotti nel Capitolo 21.

- Vari paragrafi sono stati revisionati in modo da includere riferimenti più espliciti ai modelli di analisi.
- Sono stati aggiunti nuovi problemi di fine capitolo.

Capitolo 28

- La trattazione dei resistori in serie e in parallelo nel Paragrafo 28.2 è stata revisionata per renderla più chiara.
- La carica, la corrente e la tensione variabili nel tempo sono state rappresentate con lettere minuscole per distinguerle chiaramente dai valori costanti.
- Sono stati aggiunti nuovi problemi di fine capitolo.

Capitolo 29

- È stato introdotto un *nuovo* modello di analisi: *particella in un campo (magnetico)*. Tale modello segue il modello particella in un campo (gravitazionale) introdotto nel Capitolo 13 e il modello particella in un campo (elettrico) introdotto nel Capitolo 23. Nel Paragrafo 29.1 è stato aggiunto un riquadro descrittivo “Modello di analisi”. Inoltre, è stato aggiunto un nuovo riquadro riassuntivo nel sommario di fine capitolo e il materiale del testo è stato revisionato in modo da far riferimento al nuovo modello.
- Sono stati aggiunti nuovi problemi di fine capitolo.

Capitolo 30

- Vari paragrafi sono stati revisionati in modo da includere riferimenti più espliciti ai modelli di analisi.
- Sono stati aggiunti nuovi problemi di fine capitolo.

Capitolo 31

- Vari paragrafi sono stati revisionati in modo da includere riferimenti più espliciti ai modelli di analisi.
- Sono stati aggiunti nuovi problemi di fine capitolo.

Capitolo 32

- Vari paragrafi sono stati revisionati in modo da includere riferimenti più espliciti ai modelli di analisi.
- La carica, la corrente e la tensione variabili nel tempo sono state rappresentate con lettere minuscole per distinguerle chiaramente dai valori costanti.
- Sono stati aggiunti nuovi problemi di fine capitolo.

Capitolo 33

- I colori dei fasori sono stati revisionati in molte figure per rendere più chiara la presentazione.
- Sono stati aggiunti nuovi problemi di fine capitolo.

Capitolo 34

- Vari paragrafi sono stati revisionati in modo da includere riferimenti più espliciti ai modelli di analisi.
- Nel Paragrafo 34.5 è stato aggiornato lo stato dell'astronave relativa alla navigazione solare.
- Sono stati aggiunti nuovi problemi di fine capitolo.

Capitolo 35

- Nei Paragrafi 35.4 e 35.5 sono stati aggiunti due nuovi riquadri descrittivi “Modello di analisi”.
- Vari paragrafi ed esempi svolti sono stati revisionati in modo da includere riferimenti più espliciti ai modelli di analisi.
- Sono stati aggiunti nuovi problemi di fine capitolo.

Capitolo 36

- La discussione sul Telescopio Keck nel Paragrafo 36.10 è stata aggiornata ed è stata inclusa una nuova foto scattata dal Keck, che rappresenta la prima immagine ottica diretta mai realizzata di un sistema solare al di là del nostro.
- Sono stati aggiunti nuovi problemi di fine capitolo.

Capitolo 37

- Nel Paragrafo 37.2 è stato aggiunto un riquadro descrittivo “Modello di analisi”.
- La discussione sull'Osservatorio di Onde Gravitazionali ad Interferometria Laser (LIGO) nel Paragrafo 37.6 è stata aggiornata.
- Sono stati aggiunti nuovi problemi di fine capitolo.

Capitolo 38

- Sono stati aggiunti nuovi problemi di fine capitolo.

Capitolo 39

- Vari paragrafi sono stati revisionati in modo da includere riferimenti più espliciti ai modelli di analisi.
- I Paragrafi 39.8 e 39.9 dell'edizione precedente sono stati accorpati in un unico paragrafo.
- Sono stati aggiunti nuovi problemi di fine capitolo.

Caratteristiche del testo

La maggior parte degli insegnanti ritiene che il libro di testo scelto per il corso debba costituire la guida principale per comprendere gli argomenti e per studiare la materia. In aggiunta, il libro deve essere di facile accessibilità, nel senso che lo stile e la scrittura devono rendere più semplici sia l'insegnamento che l'apprendimento. Per questo la nuova edizione include molti aspetti didattici nuovi – elencati qui sotto – che hanno lo scopo di accrescere l'utilità di questo testo sia per gli studenti che per gli insegnanti.

Soluzione dei problemi e comprensione dei concetti

Strategia generale per la soluzione dei problemi. Una strategia generale, delineata alla fine del Capitolo 2, fornisce agli studenti un processo strutturato per affrontare i problemi. Questa strategia viene seguita puntualmente in tutti gli esempi che si incontrano nel testo, in modo che lo studente impari ad applicarla. Lo studente è anche incoraggiato ad applicare questa strategia nell'affrontare i problemi alla fine dei capitoli.

Esempi svolti. Tutti gli esempi svolti sono presentati in un formato a due colonne che permette di dare maggior risalto ai concetti fisici. La colonna di sinistra mostra le informazioni testuali ed i passi da seguire per arrivare alla soluzione. La colonna di destra contiene le manipolazioni matematiche ed i risultati relativi ai vari passi. Questo tipo di stesura, che visualizza con chiarezza l'accoppiamento fra il concetto fisico e la sua esecuzione matematica, aiuta gli studenti ad organizzare il lavoro. Questi esempi ricalcano la Strategia Generale per la Soluzione dei Problemi introdotta nel Capitolo 2, che ha lo scopo di rendere più solido ed efficace l'atteggiamento da assumere nell'affrontare i problemi. Tutti gli esempi con svolgimento possono essere assegnati come compiti a casa. Un campione di esempio completamente risolto è quello mostrato nella pagina seguente.

Esempio 3.2

Una gita in vacanza

Un'automobile (Figura 3.11a) percorre 20.0 km in direzione nord e poi 35.0 km a 60.0° dal Nord nel quadrante Nord - Ovest. Si trovi il modulo e la direzione orientata dello spostamento risultante dell'automobile.

SOLUZIONE

Concettualizzare I vettori $\vec{A}$ e $\vec{B}$ del disegno in Figura 3.11a ci aiutano a concettualizzare il problema. Anche il vettore risultante $\vec{R}$ è stato disegnato. Ci aspettiamo un modulo di qualche decina di chilometri. Ci si aspetta che l'angolo β che il vettore risultante forma con l'asse y sia minore di 60.0° , l'angolo che il vettore $\vec{B}$ forma con l'asse y.

Classificare Questo problema appartiene alla categoria dei problemi di somma di vettori. Lo spostamento $\vec{R}$ è il risultante che si ottiene sommando i due spostamenti $\vec{A}$ e $\vec{B}$. Possiamo ancora classificare il problema come un problema di analisi di triangoli e dobbiamo utilizzare le nostre conoscenze di geometria e di trigonometria.

Analizzare In questo esempio vengono illustrati due metodi per calcolare il risultante di due vettori. Il problema può essere risolto geometricamente usando carta millimetrata, goniometro e righello per ricavare il modulo e la direzione orientata, come mostrato in Figura 3.11a. (Infatti anche quando si deve seguire un calcolo conoscendo cosa fare, si dovrebbero sempre disegnare i vettori se non altro per verificare il risultato). Con un righello ed un goniometro è difficile ottenere una precisione migliore di due cifre significative, invece di tre, anche facendo uso di un diagramma molto ingrandito. Si provi a usare questi strumenti per $\vec{R}$ e si faccia il confronto con il risultato del calcolo trigonometrico che segue!

Il secondo metodo è risolvere il problema utilizzando l'algebra e la trigonometria. Il modulo di $\vec{R}$ può essere ottenuto usando la legge dei coseni applicata al triangolo in Figura 3.11a (Appendice B.4).

Si usa $R^2 = A^2 + B^2 - 2AB \cos \theta$ dalla legge dei coseni per trovare R.

$$R = \sqrt{A^2 + B^2 - 2AB \cos \theta}$$

Si sostituiscono i valori numerici tenendo conto che $\theta = 180^\circ - 60^\circ = 120^\circ$

$$R = \sqrt{(20.0 \text{ km})^2 + (35.0 \text{ km})^2 - 2(20.0 \text{ km})(35.0 \text{ km}) \cos 120^\circ} \\ = 48.2 \text{ km}$$

Si usa la legge dei seni (Appendice B.4) per trovare la direzione orientata di $\vec{R}$ misurata rispetto alla direzione Nord:

$$\frac{\sin \beta}{B} = \frac{\sin \theta}{R} \\ \sin \beta = \frac{B}{R} \sin \theta = \frac{35.0 \text{ km}}{48.2 \text{ km}} \sin 120^\circ = 0.629 \\ \beta = 38.9^\circ$$

Lo spostamento risultante dell'auto è quindi 48.2 km a 38.9° a Ovest rispetto al Nord.

Concludere L'angolo β appena calcolato è compatibile con quanto si può stimare osservando la Figura 3.11a o con l'angolo effettivamente misurato con il metodo grafico? È ragionevole che il modulo di $\vec{R}$ sia maggiore dei moduli di $\vec{A}$ e di $\vec{B}$? Le unità di misura di $\vec{R}$ sono quelle giuste?

Il metodo grafico, che pure funziona molto bene, sof-

E SE?

Nell'ipotesi che nella gita i due spostamenti fossero stati scambiati e cioè che il primo fosse stato di 35.0 km a 60.0° dal Nord verso Ovest ed il secondo 20.0 km verso Nord, cosa sarebbe cambiato nel risultato?

Risposta Non sarebbe cambiato nulla. La legge di somma di vettori è commutativa per cui l'ordine dei vettori è irrilevante. La Figura 3.11b mostra graficamente che lo scambio dei vettori produce lo stesso vettore risultante.

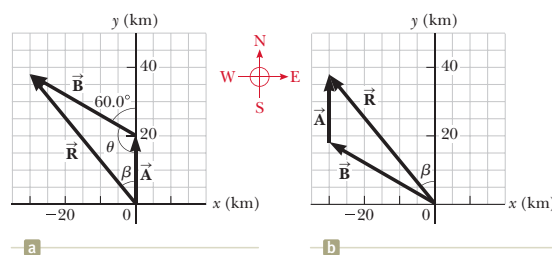


Figura 3.11 (Esempio 3.2) (a) Metodo grafico per trovare lo spostamento risultante $\vec{R} = \vec{A} + \vec{B}$. (b) Se i vettori vengono sommati in ordine invertito ($\vec{B} + \vec{A}$) il risultante è ancora $\vec{R}$.

Ogni soluzione è stata scritta in modo da seguire fedelmente la Strategia per la Soluzione dei Problemi presentata nel Capitolo 2, in modo tale da rafforzare le buone abitudini relative alla risoluzione dei problemi.

Ciascun passaggio della soluzione è presentato in un formato su due colonne. La colonna di sinistra fornisce una spiegazione di ogni passaggio matematico presente nella colonna di destra, in modo da rinforzare meglio i concetti fisici.

Gli incisi "E se?" sono presenti in circa un terzo degli esempi svolti e presentano una variante della situazione descritta nel testo dell'esempio. Ad esempio, un tale elemento potrebbe esplorare gli effetti di una variazione delle condizioni della situazione, determinare cosa accade quando una grandezza viene assunta a un certo valore limite o chiedere se possano essere determinate informazioni aggiuntive relative alla situazione del problema. Questo elemento incoraggia gli studenti a riflettere sui risultati dell'esempio e assiste nella comprensione concettuale dei principi.

Questi esempi sono di due tipi. Gli esempi del primo tipo presentano un problema ed una risposta numerica. Gli esempi del secondo tipo sono invece di natura concettuale. Per dare maggiore enfasi alla comprensione dei concetti di fisica, i molti esempi concettuali sono segnalati come tali, presentati entro un riquadro e progettati per spingere lo studente a mettere a fuoco il particolare aspetto fisico del problema. Le risoluzioni degli esempi svolti nel testo che utilizzano i modelli di analisi adesso integrano più estesamente l'approccio con modelli di analisi alla soluzione dei problemi.

Sulla base delle osservazioni dei revisori dell'edizione precedente, è stata effettuata un'attenta revisione degli esempi svolti, cosicché le risoluzioni sono presentate in maniera simbolica il più possibile, sostituendo i valori numerici solo alla fine. Questo approccio aiuterà gli studenti a pensare simbolicamente quando risolvono i problemi anziché inserire numeri non necessari nelle equazioni intermedie.

E se? Circa un terzo degli esempi di questo testo contiene la domanda *E se?*. Posta alla fine della soluzione, questa domanda presenta una variante della situazione precedentemente esposta. Il quesito *E se?* ha lo scopo di incoraggiare gli studenti a meditare sui risultati ottenuti e ad approfondire il contenuto concettuale di quell'esempio. Serve anche ad affrontare nuovi problemi, che magari possono ripresentarsi negli esami. Si noti che il quesito *E se?* appare anche in qualche problema di fine capitolo.

Quiz. I quiz sono una opportunità per verificare quanto è stato compreso del concetto fisico appena incontrato. Per rispondere ai quiz gli studenti devono decidere in base a ragionamenti sensati; molti dei quiz sono stati studiati per aiutare gli studenti ad evitare fraintendimenti molto comuni. La forma scelta per i quiz è quella chiusa, mirata ad un caso oggettivo specifico, ed include la scelta multipla, il vero-falso e la creazione di classifiche. Le risposte ai quiz si trovano alla fine del libro. Di seguito è riportato un esempio di quiz.

Quiz 7.5 Una freccetta è spinta nella canna di un fucile giocattolo comprimendo la molla di un tratto x . Successivamente una seconda freccetta viene inserita, comprimendo la molla di $2x$. Quanto velocemente esce dal fucile la freccetta nel secondo caso rispetto al primo? (a) Quattro volte più velocemente (b) Due volte più velocemente (c) La velocità è uguale (d) La velocità è un mezzo (e) La velocità è un quarto

Prevenire l'errore 16.2

Due diverse velocità Non si confonda v , la velocità di propagazione dell'onda lungo la corda, con la velocità v_y , la componente trasversale della velocità di un elemento della corda. La velocità v in un mezzo uniforme è costante, sebbene v_y vari sinusoidalmente.

Prevenire l'errore. Il testo mette a disposizione più di duecento *Prevenire l'errore* (come quello a lato), che hanno lo scopo di mettere in guardia contro errori e fraintendimenti diffusi. Appaiono in margine al testo e riguardano i fraintendimenti più comuni e quelle situazioni tipiche in cui gli studenti tendono ad avventurarsi su strade senza sbocco.

Sommari. Ogni capitolo termina con un sommario che riassume i concetti e le equazioni più importanti discussi nel capitolo. Il sommario è diviso in tre parti: Definizioni, Concetti e principi, Modelli di analisi per la soluzione dei problemi. In ogni capitolo opportune caselle inquadrano e mettono in risalto le definizioni, i concetti, i principi o i modelli di analisi.

Gruppi di Quesiti e Problemi. Per la nuova edizione, gli Autori hanno revisionato ogni domanda e ogni problema e vi hanno inserito le revisioni volte a migliorarne la leggibilità e l'applicabilità. Oltre il 10% dei problemi di questa edizione è nuovo.

Quesiti. La sezione Quesiti è suddivisa in due parti: *Quesiti con risposta multipla* e *Quesiti concettuali*. L'insegnante può fare una scelta su cosa assegnare per casa o cosa usare in aula. Questa edizione contiene più di 900 quesiti con risposta multipla e concettuali.

I *quesiti con risposta multipla* sono domande a risposta multipla, vero-falso, di ordinamento e altre. Alcuni richiedono calcoli mirati a incrementare la familiarità degli studenti con le equazioni, le variabili utilizzate, i concetti che tali variabili rappresentano e le correlazioni tra i concetti. Altri sono di natura più concettuale e sono volti a stimolare il pensiero concettuale.

I *quesiti concettuali* sono domande a risposta breve più tradizionali che richiedono agli studenti di pensare concettualmente a una situazione fisica.

Problemi. Ogni capitolo termina con la proposta di un numero molto esteso di problemi. Complessivamente il testo contiene più di 3 700 problemi. Le soluzioni dei problemi con numero dispari si trovano alla fine del libro.

I problemi di fine capitolo sono organizzati in sezioni in ciascun capitolo (circa due terzi dei problemi sono assegnati a specifici paragrafi). All'interno di ciascuna sezione, i problemi adesso conducono gli studenti a riflessioni di livello crescente, attraverso la presentazione di tutti i problemi più semplici nella prima parte, seguiti da quelli di livello intermedio. (La numerazione è in **nero** per i problemi più semplici; in **blu** per i problemi di livello intermedio.) La sezione *Altri problemi* contiene i problemi non assegnati ad alcun paragrafo specifico. Al termine di ogni capitolo è presente la sezione *Problemi impegnativi* che raccoglie i problemi più difficili di ciascun capitolo. (I problemi impegnativi sono numerati in **rosso**.)

Nel testo sono presenti vari tipi di problemi.

I *problemi quantitativi/concettuali* contengono parti che chiedono agli studenti di pensare in modo sia quantitativo che concettuale. Un esempio di problema quantitativo/concettuale è riportato qui di seguito:

59. Una molla disposta orizzontalmente con un'estremità fissata alla parete, ha una costante elastica $k = 850 \text{ N/m}$. Un blocco di massa $m = 1.00 \text{ kg}$ è attaccato alla molla alla sua estremità libera ed è appoggiato su un piano di attrito trascurabile come mostrato in Figura P8.59. (a) Il blocco viene spostato nella posizione $x_i = 6.00 \text{ cm}$ rispetto all'equilibrio e lasciato andare. Si trovi l'energia potenziale elastica della molla quando il blocco si trova in $x_i = 6.00 \text{ cm}$ e quando passa per la posizione di equilibrio. (b) Si trovi la velocità del blocco al suo passaggio per la posizione di equilibrio. (c) Qual è la velocità del blocco quando questo passa per la posizione $x_i/2 = 3.00 \text{ cm}$? (d) Perché la risposta al punto (c) non è la metà di quella del punto (b)?

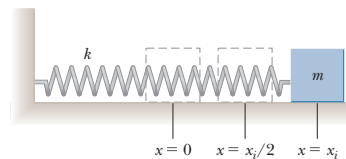


Figura P8.59

Le parti (a)-(c) del problema richiedono calcoli quantitativi.

La parte (d) pone un quesito concettuale relativo alla situazione descritta.

I *problemi simbolici* chiedono agli studenti di risolvere un problema utilizzando la sola manipolazione simbolica. I revisori dell'edizione precedente (come pure la maggior parte degli intervistati in un ampio sondaggio) hanno richiesto specificamente un aumento del numero di problemi simbolici nel testo, in quanto essi rispecchiano al meglio il modo in cui i docenti vogliono che ragionino i loro studenti quando risolvono i problemi di fisica. Un esempio di problema simbolico è riportato qui di seguito:

51. Un camioncino si sta muovendo con accelerazione costante a su di un pendio che forma un angolo ϕ con l'orizzontale, come mostrato in Figura P6.51, ed una piccola sferetta di massa m è appesa al soffitto del camioncino tramite una corda di massa trascurabile. Se il filo forma un angolo costante θ con la retta perpendicolare al soffitto, quanto vale a ?

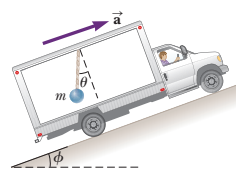


Figura P6.51

Nel testo del problema non compaiono numeri.

La figura mostra solo grandezze simboliche.

La risposta al problema è meramente simbolica.

51. $g(\cos \phi \tan \theta - \sin \phi)$

I *problemi guidati* aiutano gli studenti a scomporre i problemi in passaggi. Un problema di fisica tipicamente chiede di trovare una grandezza fisica in un dato contesto. Spesso, però, per ottenere la risposta finale sono richiesti l'uso di vari concetti e l'esecuzione di un certo numero di calcoli. Molti studenti non sono abituati a un tale livello di complessità e di sovente non sanno da dove cominciare. Un problema guidato scompone un problema standard in passaggi più piccoli, consentendo agli studenti di afferrare tutti i concetti e le strategie richieste per arrivare alla soluzione esatta. A differenza dei problemi di fisica standard, la guida è spesso inglobata nel testo del problema. I problemi guidati riflettono il modo in cui uno studente dovrebbe interagire con un docente in una sessione di ricevimento. Questi problemi (ce n'è uno in ogni capitolo) aiutano gli studenti ad allenarsi a scomporre i problemi complessi in una serie di problemi più semplici, un'abilità di problem-solving essenziale. Un esempio di problema guidato è riportato qui di seguito:

38. Una trave omogenea di lunghezza $L = 6.00$ m e massa $M = 90.0$ kg è appoggiata su due sostegni come mostrato in Figura P12.38. Il sostegno sinistro esercita sulla trave una forza normale n_1 mentre il sostegno destro, posto a distanza $\ell = 4.00$ m dal primo, esercita una forza normale n_2 . Una donna di massa $m = 55$ kg cammina sulla trave partendo dall'estremo sinistro e procedendo verso il destro. Si vuole determinare la posizione della donna che fa sì che la trave cominci ad inclinarsi. (a) Qual è il modello di analisi appropriato per la trave prima che inizi ad inclinarsi? (b) Si disegni il diagramma delle forze per la trave, indicando la forza gravitazionale e le forze normali agenti sulla trave quando la donna si trova ad una distanza x dall'estremo sinistro. (c) Dove si trova la donna quando la forza n_1 è massima? (d) Quanto vale n_1 quando la trave è sul punto di inclinarsi? (e) Si usi l'Equazione 12.1 per calcolare il valore di n_2 quando la trave è sul punto di inclinarsi. (f) Usando il risultato ottenuto nella domanda (d) e l'Equazione 12.2, applicata calcolando i momenti rispetto ad un'asse passante per il sostegno di destra, si determini la posizione della donna in corrispondenza della quale la trave inizia ad inclinarsi. (g) Si risolva nuovamente il punto (e) calcolando i momenti rispetto ad un'asse passante per il sostegno sinistro.

Viene identificato l'obiettivo del problema.

L'analisi inizia con l'identificazione dell'appropriato modello di analisi.

Vengono forniti dei suggerimenti sui passi da seguire per risolvere il problema.

Viene richiesto il calcolo associato all'obiettivo.

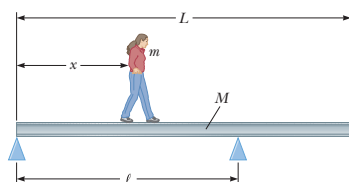


Figura P12.38

Problemi di impossibilità. La ricerca sull'insegnamento della fisica si è concentrata molto sulle abilità di problem-solving degli studenti. Benché la maggior parte dei problemi di questo testo siano strutturati in una forma che fornisce dati e richiede un risultato di calcolo, due problemi in ogni capitolo, in media, sono strutturati come problemi di impossibilità. Questi sono introdotti con la frase *Perché ciò è impossibile?* seguita dalla descrizione di una situazione. L'aspetto che colpisce di questi problemi è il fatto che essi non pongono alcuna domanda agli studenti oltre a quella introduttiva in corsivo. Lo studente deve determinare quali domande bisogna porsi e quali calcoli bisogna eseguire. Sulla base dei risultati di tali calcoli, lo studente deve determinare il motivo per cui la situazione descritta non è possibile. Tale determinazione potrebbe richiedere informazioni derivanti da esperienze personali, senso comune, ricerche su Internet o in letteratura, misurazioni, strumenti matematici, conoscenza di norme umane o pensiero scientifico.

Questi problemi possono essere assegnati agli studenti allo scopo di far sviluppare loro abilità di pensiero critico. Essi sono anche divertenti, avendo l'aspetto di "misteri" della fisica che gli studenti, individualmente o in gruppo, devono risolvere. Un esempio di problema di impossibilità è riportato qui di seguito:

La frase iniziale in corsivo segnala un problema di impossibilità.

67. *Perché ciò è impossibile?* Albert Pujols scaglia un fuori campo che va a sfiorare la fila più alta delle gradinate a 24.0 m di altezza e a 130 m dal punto di battuta. La velocità impressa alla palla è di 41.7 m/s ad un angolo di 35.0° rispetto all'orizzontale. La resistenza con l'aria è trascurabile.

Viene descritta una situazione.

Non viene posto alcun quesito. Lo studente deve determinare ciò che è necessario per il calcolo e il motivo per cui la situazione è impossibile.

Problemi accoppiati. Si tratta di problemi identici, ma uno richiede una soluzione numerica e l'altro una derivazione simbolica. In questa edizione sono presenti tre coppie di tali problemi nella maggior parte dei capitoli.

Problemi biomedici. Questi problemi sottolineano la rilevanza dei problemi di fisica per gli studenti dei corsi di laurea in scienze della vita.

Problemi di riepilogo. Molti capitoli contengono problemi di riepilogo, che richiedono allo studente di combinare i concetti esposti in quel capitolo con altri già acquisiti in capitoli precedenti. Questi problemi (indicati come **Problemi di riepilogo**) sono lì per mostrare il carattere integrato del testo e come la fisica sia una costruzione coerente di idee. Di fronte ad argomenti del mondo reale, come il riscaldamento globale o la proliferazione delle armi nucleari, bisogna fare appello ad idee che si trovano esposte in parti diverse di un testo di fisica come questo.

"Problemi alla Fermi." Ogni capitolo contiene almeno un problema che chiede allo studente di ragionare in termini di ordini di grandezza.

Problemi di progettazione. In parecchi capitoli appaiono dei problemi in cui lo studente deve determinare i parametri di un progetto perché il prodotto finale possa funzionare correttamente.

Problemi basati sul calcolo differenziale. Ogni capitolo contiene almeno un problema per cui sono essenziali le idee ed i metodi propri del calcolo differenziale.

Iconografia. Ogni elemento iconografico in questa edizione è presentato in uno stile moderno che aiuta a esprimere i principi della fisica in azione in modo chiaro e preciso. In molte figure sono inclusi *fumetti esplicativi*, che sottolineano aspetti importanti della figura o guidano gli studenti attraverso un processo illustrato dalla figura o dalla foto. Questo tipo di formato aiuta gli studenti che hanno un tipo di apprendimento più visivo. Un esempio di figura con fumetti esplicativi è riportato qui di seguito.

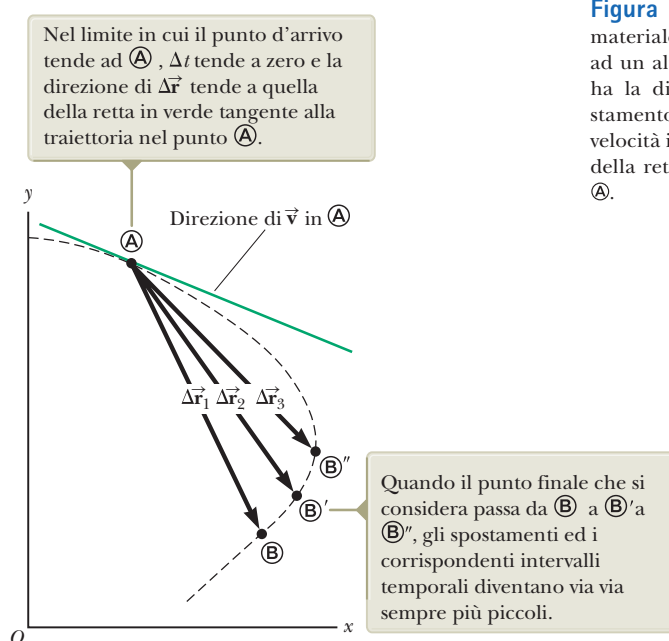


Figura 4.2 Quando un punto materiale si sposta da un punto ad un altro, la sua velocità media ha la direzione del vettore spostamento $\Delta \vec{r}$. Per definizione, la velocità istantanea ha la direzione della retta tangente alla curva in $\textcircled{A}$.

Appendice di matematica. L'appendice di matematica (Appendice B), uno strumento di grande aiuto per lo studente, mostra gli strumenti matematici in un contesto fisico. Questa è una risorsa ideale per quegli studenti che hanno bisogno di un ripasso immediato e conciso di argomenti di algebra, trigonometria e calcolo differenziale.

Aspetti coadiuvanti

Stile. È stato scelto uno stile chiaro, logico ed attraente nel tentativo di rendere più facile ed immediata la comprensione del testo. Per rendere gradevole la lettura, lo stile della scrittura è abbastanza informale e rilassato. Ogni termine nuovo è definito con cura e non sono utilizzate espressioni gergali.

Definizioni ed equazioni importanti. Le definizioni più importanti appaiono in grassetto o evidenziate con un retino, il che dà loro maggior risalto e rende facile ritrovarle. Anche le equazioni più importanti sono evidenziate con un retino per localizzarle facilmente.

Note a margine. L'icona ► segnala una nota o un commento a margine del testo, che serve per individuare un concetto, un enunciato o un'equazione particolarmente significativi.

Uso pedagogico del colore. Prima della lettura si dovrebbe consultare la **carta dei colori** che appare nella seconda di copertina. La carta contiene tutti i simboli colorati che vengono impiegati nei diagrammi del testo e che costituiscono un vero e proprio sistema coerente.

Livello matematico. Il calcolo differenziale viene introdotto con gradualità per tener conto del fatto che, molto spesso, gli studenti seguono il corso di fisica contemporaneamente ad un corso di matematica di base. Quando si introducono equazioni fondamentali, si mostrano anche i passi necessari per ottenerle e si rimanda anche alle appendici matematiche che sono disponibili alla fine del libro. Benché i vettori siano trattati in dettaglio nel Capitolo 3, il prodotto tra vettori viene introdotto solo nel momento in cui viene richiesto dalle situazioni fisiche espone più avanti nel

testo. Il prodotto scalare viene introdotto nel Capitolo 7, dove si parla di energia dei sistemi, mentre il prodotto vettoriale deve attendere il Capitolo 11, che è dedicato alla quantità di moto.

Cifre significative. Sia negli esempi svolti contenuti nel testo che nei problemi di fine capitolo una cura particolare è stata dedicata al trattamento delle cifre significative. La maggior parte degli esempi viene svolta con due o tre cifre significative, a seconda della precisione dei dati forniti. Di regola la precisione dei dati e delle risposte dei problemi di fine capitolo è di tre cifre significative. Laddove si effettuino calcoli di stima, tipicamente si opera con una sola cifra significativa. (Una discussione più approfondita delle cifre significative si può trovare nel Capitolo 1, pp. 11-13.)

Unità di misura. Il testo si basa sul Sistema Internazionale di unità di misura (SI). Occasionalmente, e solo nei capitoli dedicati alla meccanica ed alla termodinamica, si farà uso del sistema pratico statunitense.

Appendici e risvolti di copertina. Alla fine del libro è presente tutta una serie di appendici. Molte di esse sono una rassegna dei concetti e delle tecniche di matematica che vengono impiegati nel testo (ed a cui il testo rimanda), come la notazione scientifica, l'algebra, la geometria, la trigonometria, il calcolo differenziale ed integrale. La maggior parte di queste rassegne matematiche contiene esempi con svolgimento ed esercizi con risposta. Altre appendici contengono tavole di dati fisici, tabelle di conversione, le unità SI delle grandezze fisiche e la tavola periodica degli elementi. I risvolti di copertina, di facile accesso, contengono informazioni utili: costanti fondamentali, dati di fisica, dati del sistema planetario, una lista dei prefissi standard, simboli matematici, l'alfabeto greco e le abbreviazioni standard delle unità di misura.



Opzioni per gli insegnanti*

Gli argomenti di questo libro sono presentati nell'ordine seguente: la meccanica classica, la meccanica delle onde, il calore e la termodinamica e poi l'elettricità e il magnetismo, le onde elettromagnetiche, l'ottica, la relatività. La sequenza è quella tradizionale, con la trattazione delle onde meccaniche che precede l'elettricità ed il magnetismo. Alcuni docenti potrebbero preferire trattare insieme le onde meccaniche e le onde elettromagnetiche dopo aver completato lo studio dell'elettricità e del magnetismo. In questo caso i Capitoli dal 16 al 18 devono accompagnare il Capitolo 34. Il capitolo sulla relatività si trova alla fine del libro, visto che questo argomento viene spesso considerato come una introduzione alla "fisica moderna". Se il tempo lo permette, il docente può scegliere di anticipare il Capitolo 39 e discuterlo subito dopo aver completato il Capitolo 13, a conclusione del materiale che riguarda la meccanica newtoniana. I docenti che debbano impartire il loro insegnamento in due semestri possono tagliare alcuni dei paragrafi e dei capitoli del Volume 2 senza perdite di continuità. I paragrafi che, in tal senso, possono essere considerati opzionali sono i seguenti:

25.7 L'esperimento della goccia d'olio di Millikan

25.8 Applicazioni dell'elettrostatica

26.7 Una descrizione atomica dei dielettrici

27.5 Superconduttori

28.5 Reti elettriche e sicurezza elettrica nelle abitazioni

29.3 Particelle cariche in moto in un campo magnetico: applicazioni

29.6 L'effetto Hall

30.6 Magnetismo nella materia

- 31.6 Correnti parassite
- 33.9 Raddrizzatori e filtri
- 34.6 Produzione di onde elettromagnetiche da parte di un'antenna
- 36.5 Aberrazioni delle lenti
- 36.6 La macchina fotografica
- 36.7 L'occhio
- 36.8 La lente di ingrandimento
- 36.9 Il microscopio composto
- 36.10 Il telescopio
- 38.5 Diffrazione di raggi X da cristalli
- 39.9 La teoria generale della relatività

* Supporti didattici

I docenti che utilizzano il testo a scopo didattico possono scaricare dal sito www.edises.it, previa registrazione all'area docenti, le immagini del libro in formato PowerPoint.

Legge di Gauss

CAPITOLO

24



- 24.1 Flusso elettrico
- 24.2 Legge di Gauss
- 24.3 Applicazione della legge di Gauss a varie distribuzioni di carica
- 24.4 Conduttori in equilibrio elettrostatico

Nel Capitolo 23 abbiamo mostrato come calcolare il campo elettrico di una data distribuzione di carica integrando sulla distribuzione. In questo capitolo descriviamo la *legge di Gauss* ed un procedimento alternativo per il calcolo dei campi elettrici. La legge di Gauss si basa sul fatto che la forza elettrostatica fra cariche puntiformi è descritta da una relazione inversamente proporzionale al quadrato della distanza fra le cariche puntiformi. Sebbene sia una conseguenza della legge di Coulomb, la legge di Gauss risulta più conveniente quando si deve calcolare il campo elettrico generato da distribuzioni di carica con un alto grado di simmetria e consente di risolvere problemi complessi usando ragionamenti qualitativi. Come mostreremo in questo capitolo, la legge di Gauss è importante per comprendere e verificare le proprietà dei conduttori in equilibrio elettrostatico.

In una sfera al plasma, le linee colorate che si irradiano dalla sfera denotano la presenza di forti campi elettrici. Utilizzando la legge di Gauss, in questo capitolo dimostreremo che il campo elettrico che circonda una sfera uniformemente carica è identico a quello generato da una carica puntiforme. (Steve Cole/Getty Images)

24.1 Flusso elettrico

Il concetto di linee di campo elettrico è stato descritto qualitativamente nel Capitolo 23. Utilizzeremo ora le linee di campo elettrico in maniera più quantitativa.

Si consideri un campo elettrico uniforme sia in intensità che in direzione, come in Figura 24.1, e si scelga la superficie rettangolare di area A in modo che le linee di campo la attraversino perpendicolarmente. Ricordiamo (Par. 23.6) che il numero di linee per unità di area (in altre parole, la *densità di linee*) è proporzionale al modulo del campo elettrico; pertanto, il numero di linee che attraversano la superficie è proporzionale al prodotto EA . Il prodotto dell'intensità del campo elettrico E per l'area A perpendicolare alla direzione del campo è chiamato **flusso elettrico** e si indica con Φ_E (lettera greca fi maiuscola):

$$\Phi_E = EA \quad (24.1)$$

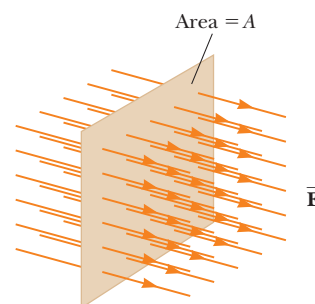


Figura 24.1 Linee di campo che rappresentano un campo elettrico uniforme e che attraversano una superficie piana di area A perpendicolare al campo.

Il numero di linee di campo che attraversano l'area $A_{\perp}$ è uguale al numero di linee che attraversano l'area A .

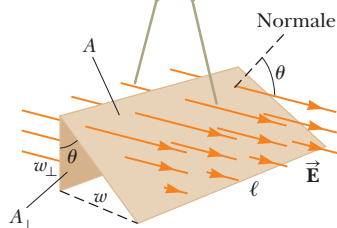


Figura 24.2 Linee di campo che rappresentano un campo elettrico uniforme e che attraversano la superficie di area A che forma un angolo θ con il campo.

Il campo elettrico forma un angolo θ_i con il vettore $\Delta\vec{A}_i$, definito in modo da risultare ortogonale all'elemento di superficie.

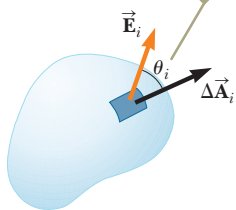


Figura 24.3 Un piccolo elemento di area ΔA_i in un campo elettrico.

Utilizzando le unità SI di E e di A , si ricava che il flusso si misura in $(\text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C})$. Il flusso elettrico è proporzionale al numero di linee di campo elettrico che attraversano una data superficie.

Se la superficie scelta non è perpendicolare al campo, il flusso che la attraversa deve risultare minore di quello calcolato con l'Equazione 24.1. Consideriamo la Figura 24.2, dove la normale alla superficie di area A forma un angolo θ con la direzione del campo elettrico uniforme. Si noti che il numero di linee che attraversano quest'area è uguale al numero di linee che attraversano l'area $A_{\perp}$, la proiezione dell'area A nella direzione perpendicolare al campo. L'area A è data dal prodotto tra la lunghezza e la larghezza della superficie: $A = lw$. Al margine sinistro della figura si vede che le larghezze delle superfici sono legate dalla relazione $w_{\perp} = w \cos \theta$. L'area $A_{\perp}$ è data da $A_{\perp} = lw_{\perp} = lw \cos \theta$. Poiché il flusso attraverso A è uguale al flusso attraverso $A_{\perp}$, si conclude che il flusso attraverso A è

$$\Phi_E = EA_{\perp} = EA \cos \theta \quad (24.2)$$

Da questo risultato ricaviamo che il flusso attraverso una data superficie di area A ha il valore massimo EA quando la superficie è perpendicolare al campo (quando la normale alla superficie è parallela al campo, cioè $\theta = 0^\circ$ nella Fig. 24.2). Il flusso è zero quando la superficie è parallela al campo (quando la normale alla superficie è perpendicolare al campo, cioè $\theta = 90^\circ$).

In questa discussione l'angolo θ è stato usato per descrivere l'orientazione della superficie di area A . Si può interpretare θ anche come l'angolo fra il vettore campo elettrico e la direzione normale alla superficie. In questo caso, il prodotto $E \cos \theta$ nell'Equazione 24.2 è la componente del campo perpendicolare alla superficie. Il flusso attraverso la superficie può essere scritto come $\Phi_E = (E \cos \theta)A = E_n A$, dove abbiamo usato E_n per indicare la componente del campo elettrico perpendicolare alla superficie.

Finora abbiamo ipotizzato che il campo elettrico fosse uniforme, ma in generale il campo elettrico può variare su una grande superficie. Pertanto, la definizione di flusso data dall'Equazione 24.2 ha significato soltanto su un piccolo elemento di area dove il campo non vari apprezzabilmente. Consideriamo una generica superficie suddivisa in un gran numero di piccoli elementi, ciascuno di area ΔA . È conveniente definire un vettore $\Delta\vec{A}_i$ il cui modulo rappresenta l'area dell' i -esimo elemento e la cui direzione è per definizione *perpendicolare* all'elemento di superficie, come mostrato in Figura 24.3. Il campo elettrico $\vec{E}_i$ nella posizione di questo elemento di superficie forma un angolo θ_i con il vettore $\Delta\vec{A}_i$. Il flusso elettrico $\Phi_{E,i}$ attraverso questo piccolo elemento è

$$\Phi_{E,i} = E_i \Delta A_i \cos \theta_i = \vec{E}_i \cdot \Delta\vec{A}_i$$

dove abbiamo usato la definizione di prodotto scalare fra due vettori ($\vec{A} \cdot \vec{B} \equiv AB \cos \theta$; si veda il Cap. 7). Sommando i contributi di tutti gli elementi otteniamo il flusso totale attraverso la superficie:

$$\Phi_E \approx \sum \vec{E}_i \cdot \Delta\vec{A}_i$$

Se facciamo tendere l'area di ogni elemento a zero, il numero degli elementi tende all'infinito e la somma è sostituita da un integrale. Quindi, la definizione generale di flusso elettrico è

$$\Phi_E \equiv \int_{\text{superficie}} \vec{E} \cdot d\vec{A} \quad (24.3)$$

L'Equazione 24.3 è un *integrale di superficie*, che deve essere calcolato sulla superficie scelta. In generale, il valore di Φ_E dipende sia dall'andamento del campo che dalla superficie.

Siamo spesso interessati a calcolare il flusso attraverso una *superficie chiusa*, definita come una superficie che divide lo spazio in una regione interna ed una esterna, in modo che non si possa passare dall'una all'altra senza attraversare la superficie stessa. La superficie di una sfera, per esempio, è una superficie chiusa. Per convenzione,

Definizione di flusso elettrico ►

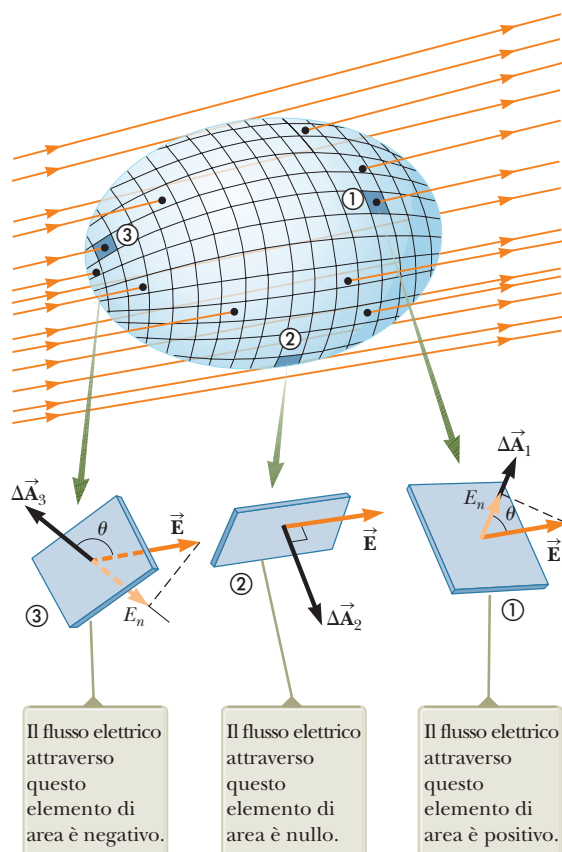


Figura 24.4 Una superficie chiusa in un campo elettrico. I vettori area sono, per convenzione, normali alla superficie ed uscenti da essa.

se l'elemento di superficie nell'Equazione 24.3 è parte di una superficie chiusa, il vettore normale è orientato in modo da puntare verso l'esterno della superficie. Se l'elemento di superficie non è parte di una superficie chiusa, l'orientamento del vettore normale è scelto in modo che l'angolo con il campo elettrico sia inferiore o uguale a 90° .

Si consideri la superficie chiusa di Figura 24.4. I vettori $\Delta\vec{A}_i$ sono rivolti in direzioni diverse per elementi di superficie diversi, ma in ogni punto questi vettori sono normali alla superficie e, per convenzione, hanno il verso uscente dalla superficie. Nell'elemento indicato con ①, le linee di campo attraversano la superficie dall'interno verso l'esterno, per cui $\theta < 90^\circ$; quindi il flusso $\Phi_{E,1} = \vec{E} \cdot \Delta\vec{A}_1$ attraverso questo elemento è positivo. Per l'elemento ②, invece, le linee di campo sfiorano la superficie (cioè sono perpendicolari al vettore $\Delta\vec{A}_2$); pertanto $\theta = 90^\circ$ ed il flusso è nullo. Per l'elemento ③, in cui le linee di campo attraversano la superficie dall'esterno verso l'interno, $180^\circ > \theta > 90^\circ$ ed il flusso è negativo, in quanto $\cos \theta$ è negativo. Il flusso *netto* o *totale* attraverso la superficie chiusa è proporzionale al numero netto o totale di linee di campo che escono dalla superficie, dove per numero netto o totale intendiamo *la differenza fra il numero di linee uscenti dal volume racchiuso dalla superficie ed il numero di linee entranti nel volume*. Se le linee uscenti sono più di quelle entranti, il flusso totale è positivo. Se invece le linee entranti sono più di quelle uscenti, il flusso totale è negativo. Utilizzando il simbolo $\oint$ per rappresentare un integrale esteso a una superficie chiusa, possiamo scrivere il flusso totale, Φ_E , attraverso una superficie chiusa nella forma

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \oint E_n dA \quad (24.4)$$

in cui E_n rappresenta la componente del campo elettrico normale alla superficie.

Quiz 24.1 Si supponga che una carica puntiforme si trovi nel centro di una superficie sferica. Il campo elettrico nei punti della superficie ed il flusso totale attraverso la sfera risultano determinati. Cosa accade al flusso e al modulo del

- campo se si dimezza il raggio della sfera? (a) Aumentano entrambi. (b) Diminuiscono entrambi. (c) Il flusso aumenta ed il campo diminuisce. (d) Il flusso diminuisce ed il campo aumenta. (e) Il flusso rimane invariato ed il campo aumenta. (f) Il flusso diminuisce ed il campo rimane invariato.

Esempio 24.1 Flusso attraverso un cubo

Si consideri nello spazio vuoto un campo elettrico $\vec{E}$ orientato nella direzione positiva dell'asse x . Quanto vale il flusso elettrico attraverso una superficie cubica di spigolo ℓ orientata come mostrato in Figura 24.5?

SOLUZIONE

Concettualizzare Si esamini attentamente la Figura 24.5. Si noti che le linee di campo elettrico attraversano due facce perpendicolarmente e sono parallele alle altre quattro facce del cubo.

Classificare Si calcolerà il flusso a partire dalla definizione, quindi questo è un esempio di problema di sostituzione.

In primo luogo si noti che il flusso attraverso quattro delle facce è zero (quelle indicate con ③ e ④ e quelle senza numero), poiché $\vec{E}$ è parallelo a queste facce e quindi $\vec{E}$ è perpendicolare a $d\vec{A}$.

Si scrivono gli integrali per il calcolo del flusso totale attraverso le facce indicate con ① e ②:

Sulla faccia ①, $\vec{E}$ è uniforme ed entrante, mentre $d\vec{A}_1$ è uscente ($\theta = 180^\circ$), cosicché il flusso attraverso questa faccia è

Ugualmente, per la faccia ②, $\vec{E}$ è uniforme e uscente, cioè concorde con $d\vec{A}_2$ ($\theta = 0^\circ$), cosicché il flusso attraverso questa faccia è

Il flusso totale attraverso tutte le facce è nullo, in quanto

$$\Phi_E = \int_1 \vec{E} \cdot d\vec{A} + \int_2 \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

$$\int_1 \vec{E} \cdot d\vec{A} = \int_1 E (\cos 180^\circ) dA = -E \int_1 dA = -EA = -E\ell^2$$

$$\int_2 \vec{E} \cdot d\vec{A} = \int_2 E (\cos 0^\circ) dA = E \int_2 dA = +EA = E\ell^2$$

$$\Phi_E = -E\ell^2 + E\ell^2 + 0 + 0 + 0 + 0 = 0$$

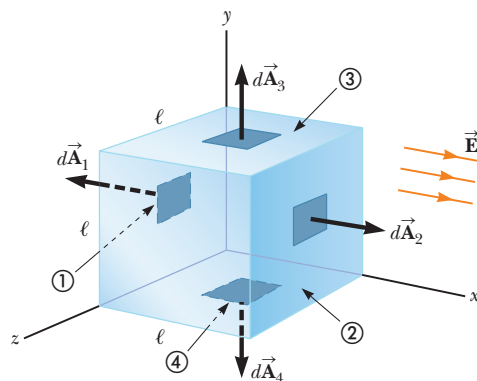


Figura 24.5 (Esempio 24.1) Una superficie chiusa cubica immersa in un campo elettrico uniforme parallelo all'asse x . La faccia ④ è la base del cubo, mentre la faccia ① è opposta alla faccia ②.

Se la carica si trova al centro della sfera, il campo risulta ovunque normale alla superficie e di modulo costante.

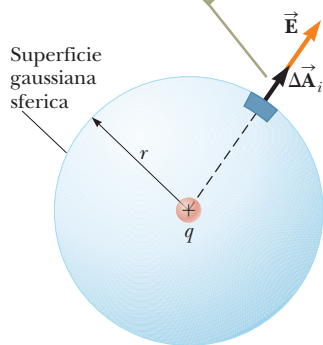


Figura 24.6 Una superficie gaussiana sferica di raggio r che circonda una carica puntiforme q .

24.2 Legge di Gauss

In questo paragrafo descriveremo una relazione generale fra il flusso elettrico totale attraverso una superficie chiusa (spesso chiamata *superficie gaussiana*) e la carica contenuta all'interno di questa superficie. Questa relazione, nota come *legge di Gauss*, è di fondamentale importanza nello studio dei campi elettrici.

Consideriamo una carica positiva puntiforme q posta al centro di una sfera di raggio r , come mostrato in Figura 24.6. Dall'Equazione 23.9 sappiamo che l'intensità del campo elettrico ovunque sulla superficie della sfera è $E = k_e q / r^2$. Le linee di campo sono radiali e hanno verso uscente, quindi sono perpendicolari alla superficie in ogni punto. In ogni punto della superficie $\vec{E}$ è perciò parallelo al vettore $d\vec{A}_i$ che rappresenta l'elemento di area ΔA_i che racchiude il punto sulla superficie. Pertanto:

$$\vec{E} \cdot d\vec{A}_i = E \Delta A_i$$

e dall'Equazione 24.4 troviamo che il flusso totale attraverso la superficie gaussiana è

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \oint E dA = E \oint dA$$

dove abbiamo portato E fuori dall'integrale poiché, per simmetria, sulla superficie è costante e vale $E = k_e q / r^2$. Inoltre, dal momento che la superficie è sferica, $\oint dA = A = 4\pi r^2$. Quindi, il flusso totale attraverso la superficie gaussiana è

$$\Phi_E = k_e \frac{q}{r^2} (4\pi r^2) = 4\pi k_e q$$

Ricordando dall'Equazione 23.3 che $k_e = 1/4\pi\epsilon_0$, possiamo scrivere

$$\Phi_E = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (24.5)$$

L'Equazione 24.5 mostra che il flusso totale attraverso la superficie sferica è proporzionale alla carica q interna alla superficie. Il flusso è indipendente dal raggio r , in quanto E varia come $1/r^2$, mentre l'area della sfera varia come r^2 . Quindi, il prodotto tra l'area e il campo elettrico cancella la dipendenza del flusso da r .

Si considerino ora diverse superfici chiuse che circondano una carica q , come in Figura 24.7. La superficie S_1 è sferica, mentre le superfici S_2 e S_3 non lo sono. Dall'Equazione 24.5 sappiamo che il flusso che attraversa la superficie S_1 vale q/ϵ_0 . Come abbiamo discusso nel paragrafo precedente, il flusso è proporzionale al numero totale di linee di campo che attraversano una superficie. La costruzione di Figura 24.7 mostra che il numero di linee di campo che attraversano la superficie S_1 è uguale al numero di linee di campo che attraversano le superfici non sferiche S_2 e S_3 .

Quindi,

il flusso totale attraverso una qualunque superficie chiusa che racchiude una carica puntiforme q è uguale a q/ϵ_0 ed è indipendente dalla forma della superficie.

Si consideri ora una carica puntiforme che si trova *fuori* da una superficie chiusa di forma arbitraria, come in Figura 24.8. Come si può vedere, ogni linea di campo che entra nella superficie esce dalla superficie in un altro punto. Il numero di linee di campo che entrano nella superficie è uguale al numero di linee di campo che ne escono. Possiamo quindi concludere che il flusso elettrico totale che attraversa una superficie chiusa che non racchiude nessuna carica è nullo. Se applichiamo questo risultato all'Esempio 24.1, possiamo vedere che il flusso totale attraverso il cubo è nullo, poiché all'interno del cubo non è presente nessuna carica.

Estendiamo adesso questi stessi argomenti a due casi più generali: (1) un sistema di più cariche puntiformi e (2) una distribuzione continua di carica. Faremo nuovamente uso del principio di sovrapposizione, che afferma che il campo elettrico generato da più cariche è la somma vettoriale dei campi elettrici generati dalle



Karl Friedrich Gauss

Matematico ed astronomo tedesco (1777–1855)

Gauss conseguì il dottorato in Matematica all'Università di Helmstedt nel 1799. Oltre al suo lavoro sull'elettromagnetismo, Gauss ha dato importanti contributi alla matematica e alla scienza nell'ambito della teoria dei numeri, della statistica, della geometria non euclidea e della meccanica celeste. È stato un fondatore della German Magnetic Union, che studia con continuità il campo magnetico terrestre.

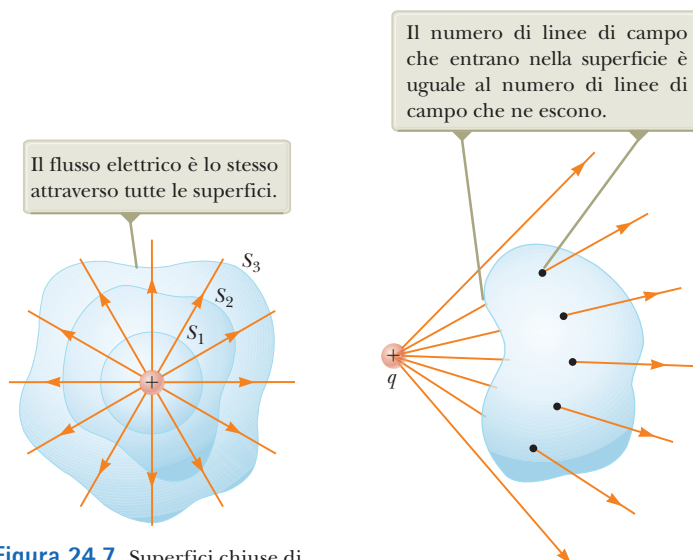


Figura 24.7 Superfici chiuse di varie forme che racchiudono una carica positiva.

Figura 24.8 Una carica puntiforme che si trova *all'esterno* di una superficie chiusa.

La carica q_4 non contribuisce al flusso attraverso nessuna delle superfici perché è esterna a ciascuna di esse.

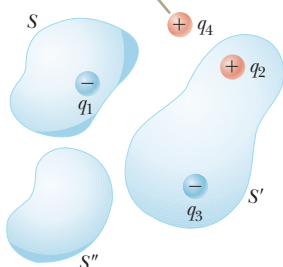


Figura 24.9 Il flusso elettrico totale attraverso qualsiasi superficie chiusa dipende solamente dalla carica contenuta all'interno della superficie. Il flusso totale attraverso la superficie S è q_1/ϵ_0 , il flusso totale attraverso la superficie S' è $(q_2 + q_3)/\epsilon_0$ ed il flusso totale attraverso la superficie S'' è zero.

Prevenire l'errore 24.1

Flusso nullo non significa campo nullo

In due situazioni c'è un flusso nullo attraverso una superficie chiusa: (1) non ci sono particelle cariche all'interno della superficie; (2) ci sono particelle cariche all'interno della superficie, ma la carica totale è nulla. In entrambe le situazioni *non è corretto* dire che il campo elettrico è nullo sulla superficie. La legge di Gauss afferma che il *flusso* elettrico è proporzionale alla carica interna alla superficie e non il *campo* elettrico.

singole cariche. Possiamo pertanto esprimere il flusso attraverso una qualunque superficie chiusa come

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \oint (\vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots) \cdot d\vec{A}$$

dove $\vec{E}$, il campo elettrico totale in un qualsiasi punto sulla superficie, è la somma vettoriale dei campi prodotti in quel punto dalle singole cariche. Si consideri il sistema di cariche mostrato in Figura 24.9. La superficie S circonda una sola carica, q_1 ; quindi il flusso totale attraverso S è q_1/ϵ_0 . Il flusso attraverso S dovuto alle cariche esterne q_2, q_3 e q_4 è nullo, poiché ogni linea di campo entra in un punto di S ed esce da un altro punto di S . La superficie S' racchiude le cariche q_2 e q_3 , quindi il flusso totale attraverso S' è $(q_2 + q_3)/\epsilon_0$. Infine, il flusso totale attraverso la superficie S'' è nullo, poiché non ci sono cariche all'interno di questa superficie, per cui *tutte* le linee di campo che entrano in S'' in un qualche punto ne escono da un altro. La carica q_4 non contribuisce al flusso totale attraverso nessuna delle tre superfici.

La **legge di Gauss**, che è una generalizzazione di ciò che abbiamo appena discusso, afferma che il flusso totale attraverso una *qualsiasi* superficie chiusa è

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q_{\text{in}}}{\epsilon_0} \quad (24.6)$$

dove $\vec{E}$ è il campo elettrico in ogni punto della superficie e q_{in} è la carica totale interna alla superficie.

Quando si utilizza l'Equazione 24.6 occorre notare che, sebbene la carica q_{in} sia la carica totale racchiusa dalla superficie gaussiana, il campo $\vec{E}$ che appare nella legge di Gauss è il *campo elettrico totale* prodotto da tutte le cariche, sia quelle interne che quelle esterne alla superficie gaussiana.

In linea di principio, la legge di Gauss può essere utilizzata per calcolare il campo elettrico $\vec{E}$ generato da un sistema qualunque di cariche o da una distribuzione continua di carica. Però, in pratica, il calcolo è fattibile solo in un numero limitato di situazioni con un elevato grado di simmetria. Come vedremo nel prossimo paragrafo, la legge di Gauss può essere usata per calcolare il campo elettrico generato da distribuzioni di carica che presentano una simmetria sferica, cilindrica o piana. Se si sceglie opportunamente la superficie gaussiana che circonda la distribuzione di carica, l'integrale dell'Equazione 24.6 può essere semplificato e si può determinare il campo elettrico.

Quiz 24.2 Se il flusso totale uscente da una superficie gaussiana è *nullo*, le seguenti affermazioni *possono essere vere*. Quale di esse *deve essere vera*? (a) Non ci sono cariche all'interno della superficie. (b) La carica totale interna alla superficie è zero. (c) Il campo elettrico è nullo in tutti i punti della superficie. (d) Il numero di linee di campo entranti nella superficie è uguale al numero di linee uscenti da essa.

Esempio concettuale 24.2 Flusso dovuto a una carica puntiforme

Una superficie gaussiana sferica ha al suo interno una carica puntiforme q . Si descriva cosa accade al flusso totale attraverso la superficie se (A) la carica triplica, (B) il raggio della sfera raddoppia, (C) la superficie diventa un cubo e (D) la carica viene spostata in una posizione diversa sempre all'interno della superficie.

SOLUZIONE

(A) Il flusso attraverso la superficie triplica, perché è proporzionale alla carica interna totale.

(B) Il flusso non cambia, perché tutte le linee di campo elettrico uscenti dalla carica passano attraverso la sfera, indipendentemente dal suo raggio.

(C) Il flusso non cambia al variare della forma della superficie, perché tutte le linee di campo elettrico uscenti dalla carica passano attraverso la superficie, indipendentemente dalla sua forma.

(D) Il flusso non cambia quando la carica viene spostata in un'altra posizione all'interno della superficie, perché la legge di Gauss si riferisce alla carica totale racchiusa dalla superficie, indipendentemente dalla sua posizione all'interno della superficie.

24.3 Applicazione della legge di Gauss a varie distribuzioni di carica

Come osservato in precedenza, la legge di Gauss è utile per determinare i campi elettrici quando la distribuzione di carica è caratterizzata da un alto grado di simmetria. Gli esempi che seguono mostrano come scegliere una superficie gaussiana sulla quale l'integrale di superficie dato dall'Equazione 24.6 risulta semplificato e il campo elettrico può essere determinato. Nella scelta della superficie si deve sempre utilizzare la simmetria della distribuzione di cariche, in modo che E possa essere portato fuori dall'integrale. In questo tipo di calcoli è fondamentale la scelta di una superficie chiusa opportuna costituita da porzioni di superficie che soddisfano una o più delle seguenti condizioni:

1. Da considerazioni di simmetria si può arguire che il valore del campo elettrico deve essere costante sulla porzione di superficie.
2. Il prodotto scalare nell'Equazione 24.6 può essere espresso come un semplice prodotto algebrico $E dA$, in quanto $\vec{E}$ e $d\vec{A}$ sono paralleli.
3. Il prodotto scalare nell'Equazione 24.6 è nullo, in quanto $\vec{E}$ e $d\vec{A}$ sono perpendicolari.
4. Il campo elettrico è nullo sulla porzione di superficie.

Differenti parti che costituiscono la superficie gaussiana possono soddisfare differenti condizioni, purché per ciascuna porzione sia verificata almeno una delle proprietà indicate. Tutte queste quattro condizioni vengono utilizzate negli esempi discussi nella parte rimanente del capitolo. Se la distribuzione di cariche non ha una simmetria che permette di soddisfare queste condizioni, la legge di Gauss continua a rimanere valida, ma non può essere usata per determinare il campo elettrico generato dalla distribuzione di carica.

Prevenire l'errore 24.2

Le superfici gaussiane non sono reali

Una superficie gaussiana è una superficie immaginaria, costruita in modo da soddisfare le condizioni qui elencate. Non coincide necessariamente con una superficie reale.

Esempio 24.3 Distribuzione di carica a simmetria sferica

Una sfera isolante di raggio a possiede una densità volumetrica di carica uniforme ρ e la carica positiva totale è Q (Fig. 24.10).

(A) Si calcoli l'intensità del campo elettrico in un punto all'esterno della sfera.

SOLUZIONE

Concettualizzare Si noti che questo problema differisce dalle nostre precedenti discussioni sulla legge di Gauss. Lo studio del campo elettrico generato da cariche puntiformi è stato affrontato nel Paragrafo 24.2. Qui siamo interessati al campo elettrico generato da una distribuzione di carica. Abbiamo già trovato il campo prodotto da diverse distribuzioni di carica nel Capitolo 23 integrando su tutta la distribuzione. Questo esempio illustra una differenza rispetto alla nostra discussione nel Capitolo 23. In questo capitolo ricaveremo il campo elettrico utilizzando la legge di Gauss.

Classificare Dal momento che la carica Q è distribuita uniformemente all'interno della sfera, la distribuzione di carica presenta simmetria sferica ed è possibile applicare la legge di Gauss per trovare il campo elettrico.

Analizzare In accordo con la simmetria sferica della distribuzione di carica, si sceglie una superficie gaussiana ancora sferica di raggio r e concentrica alla sfera, come in Figura 24.10a. Con questa scelta è soddisfatta dovunque sulla superficie la condizione (2) e $\vec{E} \cdot d\vec{A} = E dA$.

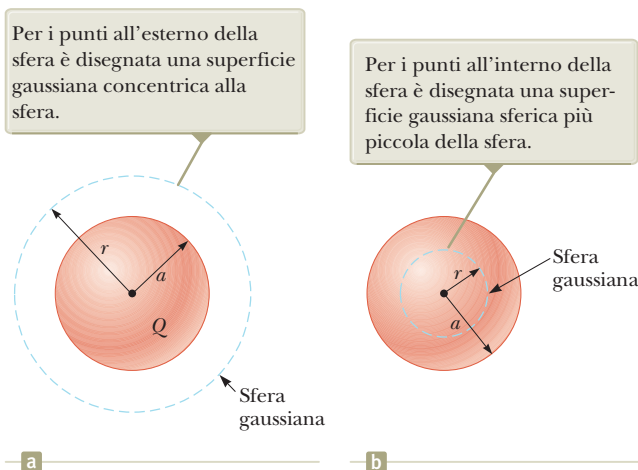


Figura 24.10 (Esempio 24.3) Una sfera isolante uniformemente carica di raggio a e carica totale Q . Nelle figure come questa la linea tratteggiata rappresenta l'intersezione tra la superficie gaussiana ed il piano della pagina.

Sommario

Definizioni

Il **flusso elettrico** è proporzionale al numero di linee di campo elettrico che attraversano una superficie. Se il campo elettrico è uniforme e forma un angolo θ con la normale ad una superficie di area A , il flusso elettrico attraverso la superficie è

$$\Phi_E = EA \cos \theta \quad (24.2)$$

In generale, il flusso elettrico attraverso una superficie è

$$\Phi_E \equiv \int_{\text{superficie}} \vec{E} \cdot d\vec{A} \quad (24.3)$$

Concetti e principi

La **legge di Gauss** afferma che il flusso totale del campo elettrico, Φ_E , attraverso una qualunque superficie gaussiana, è uguale alla carica *totale* q_{in} contenuta all'interno della superficie divisa per ϵ_0 :

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q_{\text{in}}}{\epsilon_0} \quad (24.6)$$

Usando la legge di Gauss si può calcolare il campo elettrico dovuto a varie distribuzioni di carica simmetriche.

Un conduttore in **equilibrio elettrostatico** ha le seguenti proprietà:

1. Il campo elettrico all'interno del conduttore è ovunque nullo, sia che il conduttore sia pieno sia che sia cavo.
2. Un qualunque eccesso di carica su un conduttore isolato deve risiedere interamente sulla sua superficie.
3. Il campo elettrico in un punto nelle immediate vicinanze del conduttore è perpendicolare alla sua superficie ed ha intensità σ/ϵ_0 , dove σ è la densità di carica superficiale in quel punto.
4. Su un conduttore di forma irregolare la densità di carica è massima dove il raggio di curvatura della superficie è minimo.

Quesiti con risposta multipla

1. Una superficie gaussiana cubica circonda un lungo filo rettilineo carico che attraversa perpendicolarmente due facce opposte. Non sono presenti altre cariche. (i) Su quante facce del cubo il campo elettrico è nullo? (a) 0 (b) 2 (c) 4 (d) 6 (ii) Attraverso quante facce del cubo il flusso elettrico è nullo? Si scelga tra le medesime possibilità.
2. Un cavo coassiale è costituito da un lungo filo rettilineo circondato da un lungo guscio cilindrico conduttore. Si assuma che il filo abbia una carica Q che la carica totale del guscio sia nulla e che il campo elettrico valga $E_1 \hat{i}$ in un punto P equidistante dal filo e dalla superficie interna del guscio. Il cavo viene posto in un campo elettrico esterno uniforme $-E_1 \hat{i}$. Qual è la componente x del campo elettrico nel punto P ? (a) 0 (b) Compresa tra 0 ed E_1 (c) E_1 (d) Compresa tra 0 e $-E_1$ (e) $-E_1$
3. In quale delle seguenti situazioni la legge di Gauss *non* può essere applicata per calcolare il campo elettrico? (a) Vicino ad un lungo filo uniformemente carico. (b) Sopra un grande piano uniformemente carico. (c) Dentro una sfera uniformemente carica. (d) All'esterno di una sfera uniformemente carica. (e) La legge di Gauss può essere applicata per calcolare il campo elettrico in tutte le situazioni precedenti.
4. Una particella di carica q si trova all'interno di una superficie gaussiana cubica. Non sono presenti altre cariche. (i) Se la particella è al centro del cubo, quanto vale il flusso attraverso ciascuna delle facce del cubo? (a) 0 (b) $q/2\epsilon_0$ (c) $q/6\epsilon_0$ (d) $q/8\epsilon_0$ (e) Dipende dalle dimensioni del cubo (ii) Se la particella viene spostata in un punto qualunque all'interno del cubo, quale valore massimo può raggiungere il flusso attraverso una faccia? Si scelga tra le medesime possibilità.
5. Cariche di 3.00 nC, -2.00 nC, -7.00 nC e 1.00 nC sono contenute in una scatola rettangolare di lunghezza 1.00 m, larghezza 2.00 m e altezza 2.50 m. Fuori della scatola ci sono delle cariche di 1.00 nC e 4.00 nC. Qual è il flusso del campo elettrico attraverso la superficie della scatola? (a) 0 (b) $-5.64 \times 10^2 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}$ (c) $-1.47 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}$ (d) $1.47 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}$ (e) $5.64 \times 10^2 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}$
6. Un grande guscio sferico metallico scarico è sostenuto da un sostegno isolante ed ha un piccolo buco nella parte superiore. Un piccolo chiodo dotato di carica Q viene calato tramite un filo isolante di seta all'interno della sfera. (i) Qual è la carica sulla superficie interna del guscio? (a) Q (b) $Q/2$ (c) 0 (d) $-Q/2$ (e) $-Q$

Si scelgano le risposte alle domande successive tra le stesse possibilità. (ii) Qual è la carica sulla superficie esterna del guscio? (iii) Il chiodo viene messo in contatto con l'interno del guscio. Dopo il contatto, qual è la carica presente sul chiodo? (iv) Qual è adesso la carica sulla superficie interna del guscio? (v) Qual è adesso la carica sulla superficie esterna del guscio?

7. Due sfere piene, entrambe di raggio 5 cm, hanno una identica carica $2 \mu\text{C}$. La sfera A è un conduttore, mentre la sfera B è un isolante. Se la carica sulla sfera isolante è distribuita uniformemente nell'intero suo volume, (i) come si confrontano i campi elettrici prodotti da ciascuna delle due sfere ad una distanza di 6 cm dal centro? (a) $E_A > E_B = 0$ (b) $E_A > E_B > 0$ (c) $E_A = E_B > 0$ (d) $0 < E_A < E_B$ (e) $0 = E_A < E_B$ (ii) Come si confrontano i campi elettrici prodotti da ciascuna delle due sfere ad una distanza di 4 cm dal centro? Si scelga tra le medesime possibilità.
8. Un campo elettrico uniforme di 1.00 N/C è creato da una distribuzione piana di cariche nel piano xy . Qual è il campo elettrico in una sfera metallica posta 0.500 m sopra il piano xy ? (a) 1.00 N/C (b) -1.00 N/C (c) 0 (d) 0.250 N/C (e) Varia in dipendenza della posizione nella sfera
9. Una sfera isolante solida di raggio 5 cm porta una carica uniformemente distribuita nel suo volume. Un guscio sferico scarico di materiale conduttore è concentrico alla sfera, come mostrato in Figura Q24.9. Il raggio interno del guscio misura 10 cm ed il raggio esterno è 15 cm. Non sono presenti altre cari-

che. (a) Si dispongano in ordine decrescente le intensità del campo elettrico nei punti A (a raggio 4 cm), B (a raggio 8 cm), C (a raggio 12 cm) e D (a raggio 16 cm). Si esplicitino eventuali uguaglianze. (b) Si proceda in modo analogo per il flusso elettrico attraverso superfici sferiche concentriche passanti per A, B, C e D.

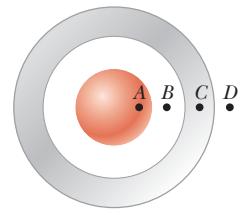


Figura Q24.9

10. Una superficie gaussiana cubica è divisa in due da un piano di carica parallelo alle facce superiore ed inferiore. Non sono presenti altre cariche. (i) Su quante facce del cubo il campo elettrico è nullo? (a) 0 (b) 2 (c) 4 (d) 6 (ii) Attraverso quante facce del cubo il flusso elettrico è nullo? Si scelga tra le medesime possibilità.
11. Si dispongano in ordine decrescente i flussi attraverso ciascuna superficie gaussiana in Figura Q24.11. Si esplicitino eventuali uguaglianze.

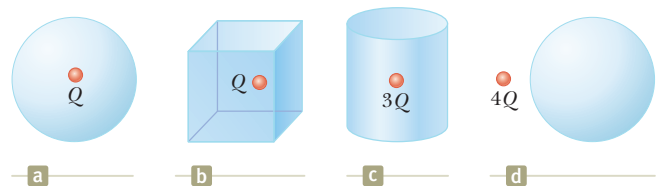


Figura Q24.11

Quesiti concettuali

1. Si consideri un campo elettrico uniforme in direzione in un dato volume. Può essere uniforme anche in modulo? Deve essere uniforme anche in modulo? Si risponda a queste domande (a) assumendo che il volume sia pieno di un materiale isolante nel quale è presente una carica descritta da una densità volumetrica e (b) assumendo che il volume sia uno spazio vuoto. Si supportino le risposte date con opportuni ragionamenti.
2. Una superficie cubica circonda una carica puntiforme q . Si descriva quello che accade al flusso totale attraverso la superficie se (a) la carica raddoppia, (b) il volume del cubo raddoppia, (c) la superficie diventa sferica, (d) la carica viene spostata all'interno della superficie in un'altra posizione e (e) la carica viene spostata all'esterno della superficie.
3. In una certa regione dello spazio, in cui non ci sono cariche, esiste un campo elettrico uniforme. Che cosa si può dire del flusso totale del campo elettrico attraverso una superficie gaussiana scelta all'interno di questa regione?
4. Se la carica totale all'interno di una superficie chiusa è nota, ma non è specificata la distribuzione di carica, si può usare la legge di Gauss per determinare il campo elettrico? Si spieghi.
5. Si spieghi perché il flusso del campo elettrico attraverso una superficie chiusa che racchiude una certa

carica non dipende dalla forma e dalle dimensioni della superficie.

6. Se il numero di linee di campo che escono da una superficie gaussiana è maggiore di quello delle linee che vi entrano, che cosa si può concludere sulla carica totale contenuta all'interno della superficie?
7. Una persona si trova all'interno di una grande sfera cava metallica isolata da terra. (a) Se una grande quantità di carica viene depositata sulla sfera, toccando l'interno della sfera, la persona si farà male? (b) Si spieghi ciò che accadrebbe se la persona avesse una carica di segno opposto a quello della carica depositata sulla sfera.
8. Si considerino due sfere conduttrici identiche, le cui superfici sono separate da una piccola distanza. Una sfera ha una grande carica positiva, l'altra ha una piccola carica positiva. Si osserva che la forza elettrica fra le due sfere è attrattiva, sebbene esse abbiano cariche dello stesso segno. Si spieghi perché si verifica ciò.
9. In una semplice esperienza didattica si strofina tra le mani un palloncino di plastica, che è un isolante, e successivamente lo si appoggia al soffitto, o ad un muro, anch'esso isolante. Grazie all'attrazione elettrica tra le cariche del palloncino e la parete neutra, il palloncino rimane attaccato alla parete. Si immagina ora

che si abbiano a disposizione due piani infiniti isolanti, uno carico e l'altro neutro. Se questi piani fossero messi in contatto, esisterebbe una forza attrattiva come per il palloncino e la parete?

10. Usando la natura repulsiva delle forze tra cariche dello stesso segno e la capacità delle cariche di muoversi all'interno di un conduttore, si spieghi perché su un

conduttore isolato un eccesso di carica deve stare sulla superficie.

11. Il Sole è più basso sull'orizzonte d'inverno che d'estate. (a) Quali sono gli effetti di questa diversa inclinazione del Sole sul flusso di luce solare che colpisce una certa regione della superficie terrestre? (b) Che effetti ha sulle condizioni climatiche?

Problemi

1. facile; 2. intermedio; 3. impegnativo

Paragrafo 24.1 Flusso elettrico

- Una superficie piana di area 3.20 m^2 viene ruotata in un campo elettrico uniforme $E = 6.20 \times 10^5 \text{ N/C}$. Si determini il flusso elettrico attraverso tale superficie (a) quando il campo elettrico è perpendicolare alla superficie e (b) quando il campo elettrico è parallelo alla superficie.
- Quando sulla superficie della Terra sta per arrivare una tempesta, c'è un campo elettrico verticale di $2.00 \times 10^4 \text{ N/C}$. Un'automobile di forma rettangolare, le cui dimensioni sono approssimativamente $6.00 \text{ m} \times 3.00 \text{ m}$, sta percorrendo in discesa un'autostrada inclinata di 10.0° . Si determini il flusso elettrico attraverso il fondo dell'auto.
- Un anello circolare di 40.0 cm di diametro viene ruotato in un campo elettrico finché si trova nella posizione in cui il flusso elettrico è massimo ed uguale a $5.20 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}$. Qual è il modulo del campo elettrico?
- Si consideri una scatola triangolare chiusa che si trova in una zona in cui, come mostrato in Figura P24.4, il campo elettrico è orizzontale e di modulo $E = 7.80 \times 10^4 \text{ N/C}$. Si calcoli il flusso elettrico attraverso (a) la superficie verticale, (b) la superficie inclinata e (c) l'intera superficie della scatola.

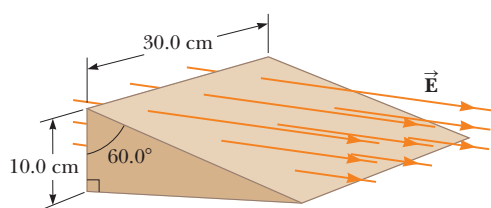


Figura P24.4

5. Un campo elettrico di modulo 3.50 kN/C è applicato lungo l'asse x . Si calcoli il flusso del campo elettrico attraverso un piano rettangolare largo 0.350 m e lungo 0.700 m (a) se il piano è parallelo al piano yz , (b) se il piano è parallelo al piano xy , (c) se il piano contiene l'asse y e la sua normale forma un angolo di 40.0° con l'asse x .

6. Un campo elettrico non uniforme ha l'espressione
- $$\vec{E} = ay\hat{i} + bz\hat{j} + cx\hat{k}$$

dove a , b e c sono costanti. Si determini il flusso elettrico attraverso una superficie rettangolare nel piano xy estesa da $x = 0$ a $x = w$ e da $y = 0$ a $y = h$.

Paragrafo 24.2 Legge di Gauss

- Una carica di $10.0 \mu\text{C}$ si trova nell'origine di un sistema di assi cartesiani ortogonali ed al centro di un guscio sferico di materiale non conduttore di raggio $R = 10.0 \text{ cm}$. Un foro di raggio $r = 1.00 \text{ mm}$ è praticato con un trapano nella direzione dell'asse z . Si calcoli il flusso elettrico attraverso il foro.
- Si trovi il flusso elettrico totale attraverso la superficie sferica chiusa mostrata in Figura P24.8. Le due cariche a destra sono all'interno della superficie sferica.

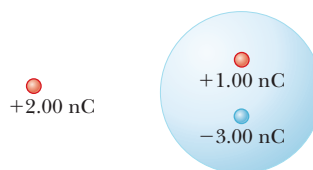


Figura P24.8

9. Le seguenti cariche si trovano all'interno di un sottomarino: $5.00 \mu\text{C}$, $-9.00 \mu\text{C}$, $27.0 \mu\text{C}$, $-84.0 \mu\text{C}$. (a) Si calcoli il flusso elettrico attraverso il sottomarino. (b) Il numero di linee di campo uscenti dal sottomarino è maggiore, minore o uguale a quello delle linee entranti?
10. Un campo elettrico ha un'intensità di 890 N/C in ogni punto della superficie di un sottile guscio sferico di raggio 0.750 m e punta in direzione radiale verso il centro della sfera. (a) Qual è la carica totale presente all'interno della superficie sferica? (b) Cosa si può dire sulla natura e sulla distribuzione della carica all'interno della sfera?

11. La Figura P24.11 mostra quattro superfici chiuse, S_1 - S_4 , e le cariche $-2Q$, Q e $-Q$. (Le linee colorate rappresentano l'intersezione delle superfici con il piano della pagina.) Si calcoli il flusso elettrico attraverso ciascuna superficie.

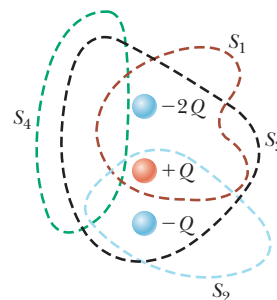
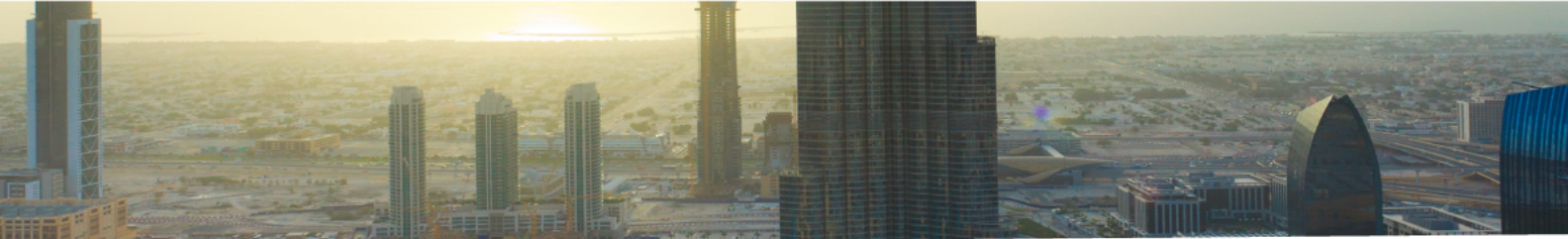


Figura P24.11

12. Una carica di $170 \mu\text{C}$ si trova al centro di un cubo di lato 80.0 cm . Non ci sono altre cariche nelle vicinanze. (a) Si determini il flusso totale attraverso ogni faccia del cubo. (b) Si determini il flusso attraverso l'intera superficie del cubo. (c) E se? I risultati di (a) e



SERWAY • JEWETT

Fisica

per Scienze ed Ingegneria



www.edises.it



€ 44,00

ISBN 978-88-7959-824-8



9 788879 598248