CAPITOLO

# 2

# Il campo elettrico

*Una carica non tocca mai l'altra: tocca il campo che l'altra ha disteso nello spazio.*

**OBIETTIVI**

1. Spiegare la differenza tra azione a distanza e campo, e perché la fisica ha introdotto il campo.
2. Definire il vettore campo elettrico e calcolare il campo di una o più cariche puntiformi per sovrapposizione.
3. Disegnare e interpretare le linee di campo di cariche isolate, di due cariche e di un dipolo.
4. Calcolare il flusso del campo e usare il teorema di Gauss per la sfera, il piano e due piastre cariche.
5. Studiare il moto di una carica in un campo uniforme e leggere i dati di un esperimento del tipo di Millikan.
6. Descrivere le proprietà dei conduttori in equilibrio, la gabbia di Faraday e il potere delle punte.

**INDICE DEL CAPITOLO**


2.1 Dall'azione a distanza al campo ..... 2
2.2 Il vettore campo elettrico ..... 3
2.3 Le linee di campo ..... 6
2.4 Il flusso del campo e il teorema di Gauss ..... 8
2.5 Il moto di una carica in un campo uniforme ..... 13
2.6 I conduttori in equilibrio elettrostatico ..... 16

Fisica 5 · Parte I · Cariche e campo elettrico · versione 1.0
Capitolo 2: Il campo elettrico · pagine 47–70 del volume completo · estratto per lo studio

Strofina un pettine di plastica sui capelli asciutti e avvicinalo, senza toccarlo, al filo d'acqua sottile che scende da un rubinetto appena aperto: il filo si piega verso il pettine, come attratto da una mano invisibile. Nel capitolo precedente hai imparato a calcolare forze come questa con la legge di Coulomb. Ma la legge dice *quanto* vale la forza, non *come* arriva a destinazione: tra il pettine e l'acqua non c'è nessun contatto, e l'aria si può togliere senza che l'effetto scompaia.

Come fa una carica a «sapere» che un'altra carica è lì? La risposta della fisica si chiama *campo*: in questo capitolo imparerai a definirlo, calcolarlo e disegnarlo, e lo vedrai deviare un fascio di elettroni o lasciare indisturbato chi siede in un'automobile colpita da un fulmine.

## 2.1 Dall'azione a distanza al campo

### 2.1.1 Come fa una carica a «sapere» che l'altra c'è?

La legge di Coulomb, $F = k_0|q_1 q_2|/r^2$, ha la stessa forma della legge di gravitazione universale, e porta con sé lo stesso problema. Entrambe descrivono una forza che agisce tra due corpi lontani senza dire nulla di ciò che sta in mezzo: è il modello dell'**azione a distanza**, in cui un corpo agisce direttamente su un altro attraverso lo spazio vuoto. Già Newton, come hai letto nel volume del quarto anno, lo considerava un'assurdità, anche se lo usava con enorme successo.

> **DA RICORDARE**
>
> **Dal volume del quarto anno: il campo gravitazionale**
>
> Per evitare l'azione a distanza nella gravitazione si introduce il campo gravitazionale (Fisica 4, capitolo 5): una massa modifica lo spazio che la circonda e un corpo di prova di massa $m$ posto in un punto risente di una forza $\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{g}$, dove $\boldsymbol{g} = \boldsymbol{F}/m$ è il campo in quel punto, misurato in N/kg. Per una sfera di massa $M$ l'intensità è $g = G\,M/r^2$, diretta verso il centro; il campo si rappresenta con linee di campo, la cui densità è proporzionale all'intensità.

Il modello dell'azione a distanza contiene un'ipotesi nascosta. Immagina due cariche, una a Roma e una a Milano, e sposta di colpo la prima: secondo la legge di Coulomb la forza sulla seconda cambia *nello stesso istante*, perché nella formula compare solo la distanza attuale. L'azione si trasmetterebbe a velocità infinita. Per le cariche ferme, o lente, questa ipotesi non porta a errori misurabili, ed è per questo che la legge di Coulomb funziona così bene in elettrostatica. Ma è vera?

La fisica ha imparato a guardare la questione in un altro modo. Una carica, con la sua sola presenza, modifica le proprietà dello spazio che la circonda; un'altra carica posta in un punto risponde alla condizione dello spazio *in quel punto*, non alla carica lontana. Questa condizione,

che esiste anche dove non c'è nessuna carica ad avvertirla, è il **campo elettrico**. L'interazione non è più «carica → carica», ma «carica → campo → carica».

### 2.1.2 Le linee di forza di Faraday

Michael Faraday (1791–1867) era figlio di un fabbro e non aveva studiato all'università: apprendista rilegatore, si appassionò alla scienza leggendo i libri che rilegava, seguì le lezioni del chimico Humphry Davy e nel 1813 divenne suo assistente alla Royal Institution di Londra, dove lavorò per il resto della sua carriera. Conosceva poca matematica; ragionava per immagini. Spargendo limatura di ferro su un foglio posto sopra una calamita, vedeva i granelli disporsi lungo curve che andavano da un polo all'altro, e ne dedusse che lo spazio attorno a magneti e cariche è percorso da **linee di forza**, curve lungo le quali si esercita l'azione elettrica o magnetica. Negli anni Trenta e Quaranta dell'Ottocento le usò per descrivere i fenomeni elettrici e magnetici, e nel 1852 sostenne che le linee di forza magnetiche hanno un'esistenza fisica reale, non soltanto geometrica.

Il fisico scozzese James Clerk Maxwell, che tradusse in equazioni le idee di Faraday, nella prefazione del suo *Trattato su elettricità e magnetismo* (1873) descrisse così la differenza tra i due modi di vedere: «Faraday, con l'occhio della mente, vedeva linee di forza attraversare tutto lo spazio là dove i matematici vedevano centri di forza che si attraggono a distanza; Faraday vedeva un mezzo là dove essi non vedevano altro che distanza» (traduzione della redazione).

Finché le cariche sono ferme, i due modelli danno le stesse previsioni. Ma nel capitolo 3 vedrai che il campo immagazzina energia, e nel capitolo 10 che una perturbazione del campo viaggia nello spazio alla velocità della luce: è un'onda elettromagnetica. Solo allora si capirà fino in fondo la *necessità* di superare l'azione a distanza, che non sa dire né dove stia l'energia né perché l'effetto arrivi in ritardo.

## 2.2 Il vettore campo elettrico

### 2.2.1 La definizione

Per conoscere il campo in un punto P si usa una **carica di prova**: una carica positiva $q$ così piccola da non spostare, con la sua forza, le cariche che generano il campo. La si pone in P, si misura la forza elettrica $\boldsymbol{F}$ che agisce su di essa e la si divide per $q$. Il **vettore campo elettrico** in P è

$$\boldsymbol{E} = \frac{\boldsymbol{F}}{q}$$

Ha la direzione e il verso della forza che agisce su una carica positiva, e si misura in newton al coulomb (N/C); nel capitolo 3 vedrai che la stessa unità si può scrivere V/m. Il campo è una proprietà del punto, non della carica di prova: raddoppiando $q$ raddoppia la forza, ma il rapporto $\boldsymbol{E} = \boldsymbol{F}/q$ resta lo stesso. Noto il campo, la forza su una carica qualsiasi $q$ posta in quel punto è

$$\boldsymbol{F} = q\boldsymbol{E}$$

Se $q$ è positiva la forza ha il verso del campo; se è negativa, come per un elettrone, ha verso *opposto*. Un protone e un elettrone posti nello stesso punto subiscono forze di uguale intensità e di verso contrario.

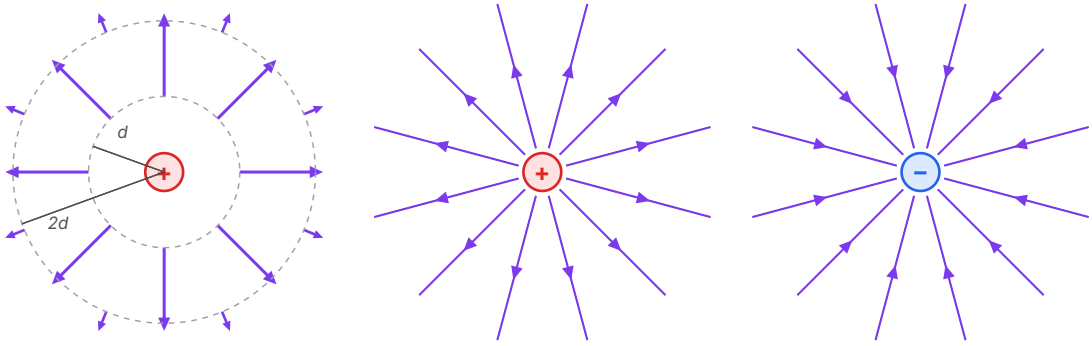
Il campo elettrico associa un vettore a ogni punto dello spazio: è un **campo vettoriale**, come il campo gravitazionale o la velocità del vento in una carta meteorologica. Una carta delle temperature, che associa a ogni punto un semplice numero, è invece un **campo scalare**; nel capitolo 3 ne incontrerai uno elettrico, il potenziale.

### 2.2.2 Il campo di una carica puntiforme

Una carica puntiforme $Q$ esercita su una carica di prova $q$, a distanza $r$, una forza di intensità $k_0 Q\, q/r^2$. Dividendo per $q$, l'intensità del campo è

$$E = k_0 \frac{Q}{r^2}$$

Qui $Q$ si prende in valore assoluto; direzione e verso si leggono dal segno. Il campo è radiale: punta *lontano* dalla carica se $Q$ è positiva, *verso* la carica se è negativa (Figura 2.1). La carica di prova è scomparsa dalla formula: il campo dipende solo dalla carica che lo genera e dalla posizione. A distanza doppia vale un quarto, a distanza tripla un nono: è la stessa legge dell'inverso del quadrato del campo gravitazionale. Una carica di 1,0 nC, per esempio, a 10 cm di distanza produce un campo di $k_0 Q/r^2 = 8{,}99 \times 10^9 \cdot 1{,}0 \times 10^{-9} / (0{,}10)^2$ N/C $\approx 9{,}0 \times 10^2$ N/C.




a) vettori campo a distanza d e 2d — b) linee di una carica positiva — c) linee di una carica negativa

**Figura 2.1** Il campo di una carica puntiforme. a) Vettori campo di una carica positiva su due circonferenze di raggio $d$ e $2d$: a distanza doppia la lunghezza è un quarto. b) Le linee di campo di una carica positiva sono semirette uscenti; c) quelle di una carica negativa sono semirette entranti.

### 2.2.3 La sovrapposizione dei campi

Se il campo è generato da più cariche, la forza su una carica di prova è la somma vettoriale delle forze dovute a ciascuna (principio di sovrapposizione, capitolo 1). Dividendo per $q$, lo stesso vale per i campi: il campo prodotto da più cariche è la *somma vettoriale* dei campi che ciascuna produrrebbe da sola,

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{E}_1 + \boldsymbol{E}_2 + \boldsymbol{E}_3 + \dots$$

Le somme si eseguono come nel terzo anno: con la regola del parallelogramma oppure, più comodamente, per componenti, usando seno e coseno degli angoli.

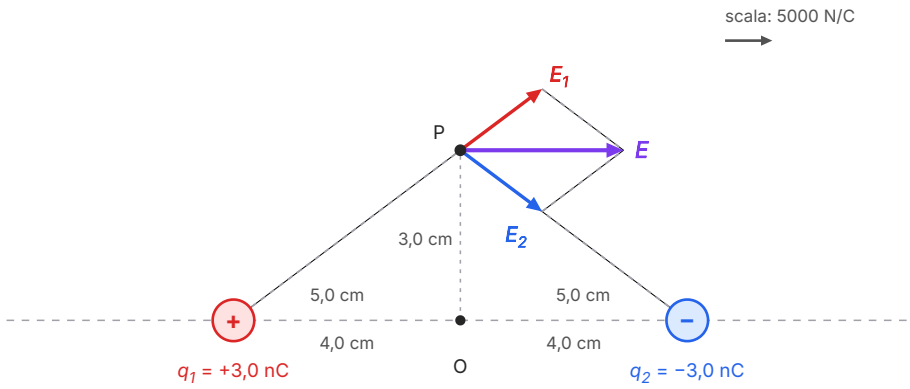



**Figura 2.2** Sovrapposizione dei campi di due cariche opposte nel punto P dell'esempio, disegnata in scala sia per le distanze sia per i vettori: $\boldsymbol{E}_1$ si allontana da $q_1$, $\boldsymbol{E}_2$ punta verso $q_2$ e la somma $\boldsymbol{E}$ (regola del parallelogramma) è parallela al segmento che unisce le cariche.

I campi elettrici che si incontrano in natura e nella tecnica coprono molti ordini di grandezza (Tabella 2.1). Il più intenso della tabella è quello che il protone dell'atomo di idrogeno produce alla distanza tipica dell'elettrone, $5{,}29 \times 10^{-11}$ m: $k_0 e/r^2 \approx 5{,}1 \times 10^{11}$ N/C. Il più debole, quello dell'atmosfera nelle giornate serene, è lì sopra le nostre teste ogni giorno, ma non lo avvertiamo.

**Tabella 2.1** Ordini di grandezza di alcuni campi elettrici (valori indicativi; l'ultimo è calcolato con la legge di Coulomb).

| Situazione | $E$ (N/C) |
|---|---|
| atmosfera vicino al suolo, con il bel tempo | circa $10^2$ |
| al suolo, sotto una nube temporalesca | circa $10^4$ |
| tra le piastre di deflessione dell'esempio svolto sul moto dell'elettrone | $1{,}0 \times 10^4$ |
| scarica nell'aria secca (rigidità dielettrica) | circa $3 \times 10^6$ |
| attraverso la membrana di una cellula nervosa | circa $10^7$ |
| prodotto dal protone alla distanza dell'elettrone nell'atomo di idrogeno | $5{,}1 \times 10^{11}$ |

ESEMPIO SVOLTO

### Il campo di due cariche opposte

**Problema.** Due cariche $q_1 = +3{,}0$ nC e $q_2 = -3{,}0$ nC distano 8,0 cm. Calcola il campo elettrico a) nel punto medio O; b) nel punto P che si trova a 3,0 cm da O sull'asse del segmento (Figura 2.2).

**a) Nel punto medio** ciascuna carica dista 4,0 cm. Le intensità sono uguali: $E_1 = E_2 = 8{,}99 \times 10^9 \cdot 3{,}0 \times 10^{-9} / (0{,}040)^2$ N/C $\approx 1{,}69 \times 10^4$ N/C. Il campo di $q_1$ si allontana da essa, quello di $q_2$ punta verso di essa: in O sono entrambi diretti da $q_1$ verso $q_2$ e si sommano, $E = 2 \cdot 1{,}69 \times 10^4$ N/C $\approx 3{,}4 \times 10^4$ N/C.

**b) Nel punto P** ciascuna carica dista $\sqrt{(4{,}0^2 + 3{,}0^2)}$ cm = 5,0 cm, e $E_1 = E_2 = 8{,}99 \times 10^9 \cdot 3{,}0 \times 10^{-9} / (0{,}050)^2$ N/C $\approx 1{,}08 \times 10^4$ N/C. Prendiamo l'asse $x$ da $q_1$ verso $q_2$ e l'asse $y$ da O verso P; l'angolo $\alpha$ tra ciascun vettore e l'asse $x$ ha $\cos\alpha = 4{,}0/5{,}0 = 0{,}80$ e $\operatorname{sen}\alpha = 3{,}0/5{,}0 = 0{,}60$. $\boldsymbol{E}_1$ si allontana da $q_1$: componenti $(+E_1\cos\alpha;\ +E_1\operatorname{sen}\alpha)$. $\boldsymbol{E}_2$ punta verso $q_2$: componenti $(+E_2\cos\alpha;\ -E_2\operatorname{sen}\alpha)$.

Sommando, le componenti $y$ si annullano e restano le $x$: $E = 2 \cdot 1{,}08 \times 10^4$ N/C $\cdot\ 0{,}80 \approx 1{,}7 \times 10^4$ N/C, parallelo al segmento, da $q_1$ verso $q_2$.

**Controllo.** Allontanandosi da O lungo l'asse il campo diminuisce (da 3,4 a $1{,}7 \times 10^4$ N/C) ma resta parallelo al segmento: lo conferma la simmetria della figura, che scambia le due cariche e insieme il loro segno.

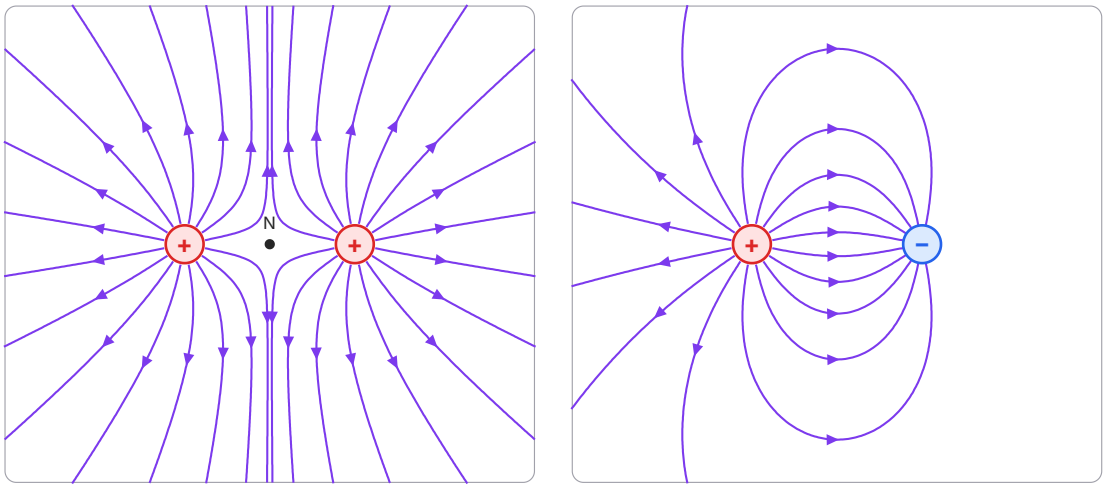
## 2.3 Le linee di campo

Come per la gravità, il campo elettrico si rappresenta con le linee di campo, che sono le linee di forza di Faraday. Si costruiscono con quattro regole.

1. In ogni punto la linea è tangente al vettore $\boldsymbol{E}$ e orientata come esso.

2. Le linee escono dalle cariche positive ed entrano nelle cariche negative (o vanno all'infinito, o vengono dall'infinito).
3. Due linee non si incrociano mai: in ogni punto il campo ha una sola direzione.
4. Il numero di linee che escono da una carica, o vi entrano, è proporzionale alla carica; dove le linee sono più fitte il campo è più intenso.

Per una carica isolata le linee sono semirette (Figura 2.1): a distanza doppia attraversano una sfera di superficie quattro volte maggiore, e la loro densità scende a un quarto, proprio come l'intensità del campo. Con due cariche le linee si piegano (Figura 2.3). Fra due cariche positive uguali si respingono, quasi a «evitarsi», e nel punto medio N il campo è nullo: i due contributi sono uguali e opposti. Una coppia di cariche uguali e opposte si chiama **dipolo elettrico**: le linee partono dalla carica positiva e si richiudono sulla negativa, fitte nella regione tra le due. Molte molecole, come quella dell'acqua, si comportano come piccoli dipoli, ed è anche per questo che il filo d'acqua dell'introduzione si piega verso il pettine.




a) due cariche positive uguali

b) dipolo: cariche uguali e opposte

**Figura 2.3** Linee di campo calcolate per due cariche nel piano che le contiene, ottenute seguendo passo passo la direzione del campo. a) Due cariche positive uguali: nel punto N, a metà strada, il campo è nullo. b) Un dipolo: le linee escono dalla carica positiva ed entrano nella negativa.

Il confronto con le linee del campo gravitazionale (Fisica 4, capitolo 5) è istruttivo. Le masse sono di un solo segno e si attraggono sempre: le linee gravitazionali *entrano* soltanto, nei pianeti e nelle stelle, e non esiste nulla di simile a un dipolo. Le cariche, invece, possono essere positive o negative, e le linee elettriche hanno un inizio e una fine.

**ERRORE FREQUENTE**

**Le linee di campo non sono traiettorie**

Una linea di campo dice in che direzione è la *forza*, cioè l'accelerazione, non la velocità. Una carica lasciata ferma parte lungo la linea, ma se la linea è curva, appena acquista velocità la abbandona: la forza la piega, e la velocità resta indietro, come per un'automobile che curva troppo in fretta. Una carica segue esattamente una linea di campo solo quando la linea è una retta e la carica parte ferma, o con velocità diretta lungo la retta.

**COLLEGAMENTI**

**Le parole della fisica**

**Campo** viene dal latino *campus*, «pianura, spazio aperto»: il *Campus Martius* era la pianura di Roma lungo il Tevere. In fisica la parola indica una regione di spazio considerata con la grandezza che vi assume un valore in ogni punto; l'inglese *field*, usato da Faraday e da Maxwell, ha lo stesso senso concreto di «terreno aperto».

**Flusso** viene dal latino *fluxus*, participio di *fluere*, «scorrere»: l'immagine è quella dell'acqua che attraversa una rete. Nel campo elettrico non scorre nulla; resta l'idea di contare quante linee attraversano una superficie.

**Dipolo** unisce il prefisso greco δι-, «due», a πόλος, «perno»: in origine il perno attorno a cui ruota la volta celeste, da cui i poli della Terra e quelli di una calamita. Un dipolo è un sistema con «due poli», uno positivo e uno negativo.

## 2.4 Il flusso del campo e il teorema di Gauss

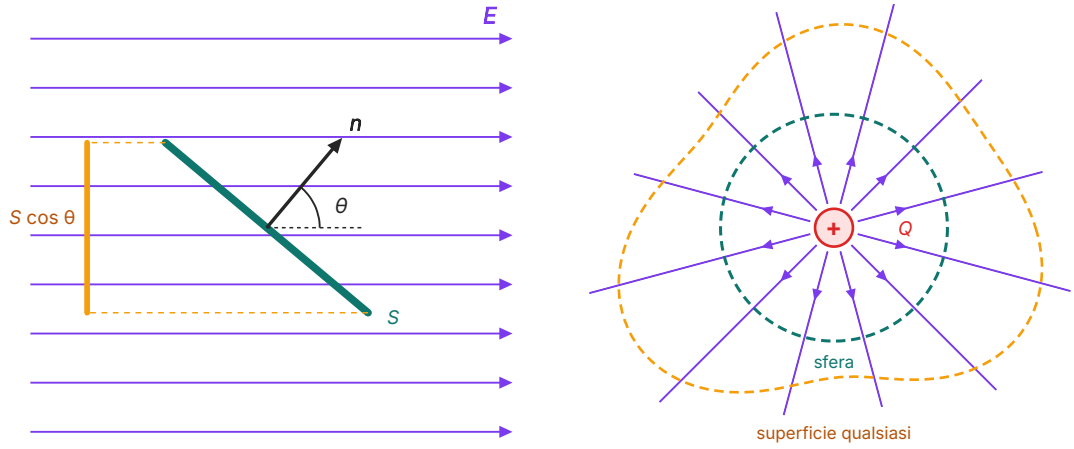
### 2.4.1 Il flusso attraverso una superficie

Le linee di campo suggeriscono un modo nuovo di misurare il campo: contare quante linee attraversano una superficie. La grandezza che traduce questa idea è il flusso. Considera una superficie piana di area $S$ in un campo uniforme $\boldsymbol{E}$ e la sua normale $\boldsymbol{n}$, un vettore perpendicolare alla superficie; sia $\theta$ l'angolo tra $\boldsymbol{E}$ e $\boldsymbol{n}$ (Figura 2.4a). Il **flusso del campo elettrico** attraverso la superficie è

$$\Phi(\boldsymbol{E}) = E\,S\cos\theta$$

Si misura in $\mathrm{N\cdot m^2/C}$ ed è uno scalare. Il prodotto $S\cos\theta$ è l'area della «sagoma» della superficie vista lungo le linee di campo, cioè l'area efficace che le linee attraversano. Se la superficie è perpendicolare al campo ($\theta = 0°$) il flusso è massimo, $E\,S$; se è parallela al campo ($\theta = 90°$) nessuna linea la attraversa e il flusso è nullo. Per esempio, in un campo di 500 N/C una superficie di 0,20 $\mathrm{m^2}$ inclinata di $\theta = 60°$ è attraversata da un flusso di $500 \cdot 0{,}20 \cdot \cos 60° = 50\ \mathrm{N\cdot m^2/C}$.

Per una superficie chiusa, che delimita una regione di spazio come la buccia di un'arancia, si sceglie la normale rivolta verso l'esterno: il flusso è positivo dove le linee escono, negativo dove entrano. Una superficie curva si pensa divisa in tanti piccoli pezzi quasi piani, e il flusso totale è la somma dei flussi attraverso i pezzi.




a) flusso attraverso una superficie piana

b) due superfici chiuse attorno alla stessa carica

**Figura 2.4** a) Il flusso attraverso una superficie piana di area $S$, inclinata in un campo uniforme: $\theta$ è l'angolo tra il campo e la normale $\boldsymbol{n}$, e le linee attraversano l'area efficace $S\cos\theta$. b) Una sfera e una superficie chiusa di forma qualsiasi attorno alla stessa carica $Q$: ciascuna linea le attraversa entrambe una volta, quindi il flusso è lo stesso.

### 2.4.2 Il teorema di Gauss

Calcoliamo il flusso attraverso una sfera di raggio $r$ centrata in una carica puntiforme positiva $Q$. Su tutta la sfera il campo ha la stessa intensità $k_0 Q/r^2$ ed è perpendicolare alla superficie, diretto verso l'esterno: $\cos\theta = 1$. Il flusso è quindi il campo per l'area della sfera, $4\pi r^2$:

$$\Phi = k_0 \frac{Q}{r^2} \cdot 4\pi r^2 = 4\pi k_0 Q = \frac{Q}{\varepsilon_0}$$

perché $k_0 = 1/(4\pi\varepsilon_0)$. Il raggio è scomparso: qualunque sfera attorno alla carica è attraversata dallo stesso flusso, come era da aspettarsi, perché tutte sono attraversate dalle stesse linee. E lo stesso vale per una superficie chiusa di forma qualsiasi (Figura 2.4b): ogni linea che esce dalla carica la attraversa, e il conto delle linee non dipende dalla forma. Una carica che sta *fuori* dalla superficie, invece, non contribuisce: ogni sua linea che entra da una parte esce dall'altra, e i due contributi si annullano.

Questi ragionamenti, resi rigorosi dal matematico tedesco Carl Friedrich Gauss (1777–1855), portano a uno dei teoremi fondamentali dell'elettromagnetismo, che qui enunciamo senza di-

mostrazione. **Teorema di Gauss**: il flusso del campo elettrico attraverso una superficie chiusa qualsiasi è uguale alla carica totale racchiusa dalla superficie, divisa per $\varepsilon_0$:

$$\Phi(\boldsymbol{E}) = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0}$$

La superficie chiusa a cui si applica il teorema si chiama **superficie gaussiana**: non è un oggetto materiale, ma una superficie immaginaria che si sceglie di volta in volta. La carica $Q_{\text{int}}$ è la somma algebrica delle cariche interne, con il loro segno: se una superficie racchiude +2 nC e −2 nC il flusso totale è nullo, anche se il campo, punto per punto, non lo è. Il teorema è equivalente alla legge di Coulomb, ma permette di calcolare in poche righe i campi di distribuzioni di carica molto simmetriche.

### 2.4.3 Tre campi calcolati con il teorema di Gauss

**Una sfera carica.** Una sfera con carica $Q$ distribuita in modo uniforme, sulla superficie o in tutto il volume, produce all'esterno un campo radiale con la stessa intensità in tutti i punti alla stessa distanza dal centro. Su una superficie gaussiana sferica di raggio $r$ maggiore di quello della sfera il teorema dà $E \cdot 4\pi r^2 = Q/\varepsilon_0$, cioè $E = k_0 Q/r^2$: *fuori dalla sfera il campo è quello di una carica puntiforme posta nel centro*. È l'equivalente elettrico del teorema di Newton sulle sfere (Fisica 4, capitolo 4), per cui la Terra attira come se tutta la sua massa fosse nel centro: le due leggi hanno la stessa forma, e la stessa conseguenza.

**Un piano carico.** Considera un piano molto esteso (al limite, infinito) con carica distribuita uniformemente; la **densità superficiale di carica** $\sigma = Q/S$ è la carica per unità di area, in C/m$^2$. Per simmetria il campo è perpendicolare al piano, uscente da entrambe le parti se $\sigma$ è positiva. Scegliamo come superficie gaussiana un cilindretto che attraversa il piano, con le basi di area $S$ parallele a esso. Attraverso la superficie laterale il flusso è nullo (il campo le è parallelo); attraverso ciascuna base vale $E\,S$. Il cilindro racchiude la carica $\sigma S$, quindi $2E\,S = \sigma S/\varepsilon_0$ e

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$$

Il risultato sorprende: il campo di un piano infinito *non dipende dalla distanza*. Le linee che escono dal piano sono parallele e non si allargano, quindi la loro densità resta la stessa a qualunque distanza (Figura 2.5a). Per un piano reale, di dimensioni finite, il risultato vale bene finché la distanza è piccola rispetto alle dimensioni del piano e ci si tiene lontani dai bordi.

**Due piastre con cariche opposte.** Due piastre piane parallele, vicine rispetto alle loro dimensioni, portano cariche opposte con densità $+\sigma$ e $-\sigma$. Ciascuna produce un campo $\sigma/(2\varepsilon_0)$: quello della piastra positiva uscente, quello della negativa entrante. Nella regione tra le piastre i due campi hanno lo stesso verso, dalla positiva alla negativa, e si sommano; all'esterno hanno versi opposti e si annullano (Figura 2.5b):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \text{ tra le piastre, } E = 0 \text{ all'esterno}$$

Tra le piastre il campo è lo stesso vettore in ogni punto: è un campo elettrico uniforme, l'equivalente elettrico del campo gravitazionale vicino al suolo. È il modo più semplice di ottenerlo in laboratorio, ed è il cuore del condensatore che studierai nel capitolo 3. Con $\sigma = 1{,}0\ \mu C/m^2$, per esempio, $E = 1{,}0 \times 10^{-6} / 8{,}85 \times 10^{-12}\ N/C \approx 1{,}1 \times 10^5\ N/C$.

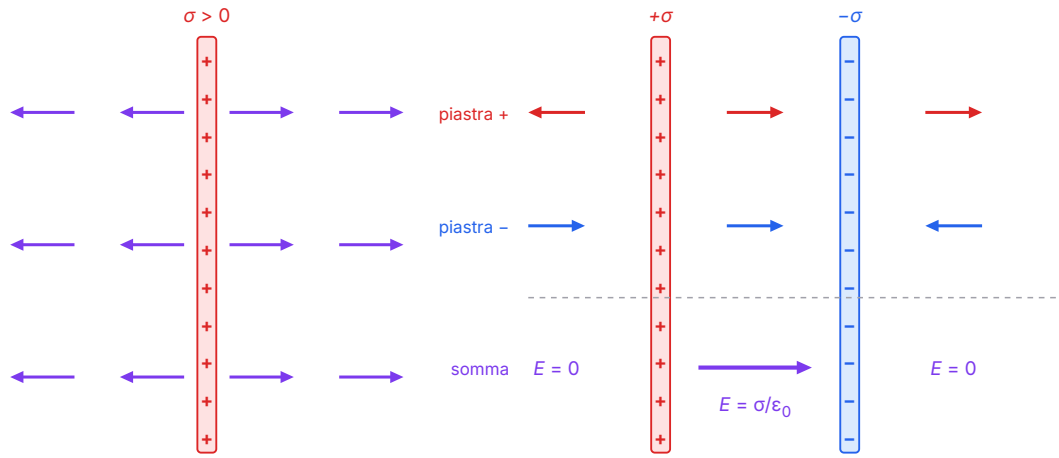



**Figura 2.5** a) Un piano carico molto esteso produce da entrambe le parti un campo perpendicolare di intensità $\sigma/(2\varepsilon_0)$, la stessa a ogni distanza. b) Due piastre con cariche opposte: i campi delle due piastre (in rosso e in blu) si sommano tra le piastre e si annullano all'esterno.

**ERRORE FREQUENTE**

### $\sigma/(2\varepsilon_0)$ o $\sigma/\varepsilon_0$?

Il campo di *un* piano carico è $\sigma/(2\varepsilon_0)$; quello tra *due* piastre con cariche opposte è $\sigma/\varepsilon_0$, il doppio, perché i contributi delle due piastre si sommano. Prima di usare una formula chiediti quante superfici cariche ci sono e da che parte ti trovi: fuori da due piastre opposte il campo è nullo, fuori da un solo piano no.

COLLEGAMENTI

### In laboratorio: le linee di campo e il campo tra due piastre

**Materiali.** Per la dimostrazione: una vaschetta di vetro con olio di ricino e semolino, due elettrodi (due punte, poi due lamine parallele), un generatore elettrostatico. Per il laboratorio virtuale: una simulazione che calcola il campo di cariche con la legge di Coulomb, con una «sonda» che ne legge l'intensità.

**Procedimento.** L'insegnante collega gli elettrodi al generatore: i granelli si polarizzano come piccoli dipoli e si allineano al campo. Due punte opposte danno la figura del dipolo (Figura 2.3b); due lamine danno, tra di esse, linee rettilinee ed equidistanti. Al computer si costruiscono poi due piastre quadrate di 30 cm di lato, distanti 2,0 cm, con $\sigma = \pm 1{,}00\ \mu C/m^2$; si misura il campo lungo l'asse delle piastre e si ripete raddoppiando $\sigma$ (Tabella 2.2).

**Tabella 2.2** Laboratorio virtuale: intensità del campo lungo l'asse di due piastre quadrate di 30 cm di lato, distanti 2,0 cm (piastra positiva in $x = 0$, negativa in $x = 2{,}0$ cm). Risoluzione della sonda: 1 kN/C.

| posizione $x$ (cm) | regione | $E$ (kN/C) con $\sigma = 1{,}00\ \mu C/m^2$ | $E$ (kN/C) con $\sigma = 2{,}00\ \mu C/m^2$ |
|---|---|---|---|
| −2,0 | esterna | 6 ± 1 | 13 ± 1 |
| −1,0 | esterna | 7 ± 1 | 13 ± 1 |
| 0,5 | interna | 106 ± 1 | 212 ± 1 |
| 1,0 | interna | 106 ± 1 | 212 ± 1 |
| 1,5 | interna | 106 ± 1 | 212 ± 1 |
| 3,0 | esterna | 7 ± 1 | 13 ± 1 |
| 4,0 | esterna | 6 ± 1 | 13 ± 1 |

**Che cosa concludere.** Tra le piastre il campo è lo stesso in tutti i punti misurati, e raddoppia quando raddoppia $\sigma$: è uniforme e proporzionale alla densità di carica, come prevede $E = \sigma/\varepsilon_0$. Il valore misurato, 106 kN/C, è però circa il 6% minore di quello previsto per piastre infinite, $\sigma/\varepsilon_0 = 113$ kN/C, e all'esterno il campo non è zero ma circa il 6% di quello interno: le piastre sono finite, e una parte delle linee si allarga oltre i bordi. Avvicinando le piastre a 1,0 cm la simulazione dà 110 kN/C: il modello delle piastre infinite migliora quando la distanza è piccola rispetto al lato.

**Sicurezza.** La dimostrazione con il semolino usa tensioni di migliaia di volt ed è riservata all'insegnante: gli studenti osservano a distanza, e nessuno tocca gli elettrodi o la vaschetta finché il generatore non è spento e scaricato.

**Per la relazione.** Segui lo schema di Fisica 3, capitolo 4. Disegna il grafico di $E$ in funzione di $x$ per i due valori di $\sigma$, confronta i valori interni con $\sigma/\varepsilon_0$ e spiega lo scarto. Quale misura faresti per capire se il campo interno resta uniforme anche vicino ai bordi delle piastre?

## 2.5 Il moto di una carica in un campo uniforme

Una particella di carica $q$ e massa $m$ in un campo uniforme $\boldsymbol{E}$ subisce una forza costante $q\boldsymbol{E}$; per il secondo principio della dinamica la sua accelerazione è costante:

$$\boldsymbol{a} = \frac{q\boldsymbol{E}}{m}$$

È la situazione di un sasso nel campo gravitazionale vicino al suolo, con $q\boldsymbol{E}/m$ al posto di $\boldsymbol{g}$, e si risolve con gli stessi strumenti.

**DA RICORDARE**

**Dal volume del terzo anno: il moto del proiettile**

Con accelerazione costante $a$ e velocità iniziale $v_0$ nella stessa direzione, $v = v_0 + a\,t$ e $s = v_0 t + \tfrac{1}{2} a\,t^2$; partendo da fermi, $v^2 = 2a\,s$ (Fisica 3, capitolo 11). Se la velocità iniziale è perpendicolare all'accelerazione i due moti sono indipendenti: uniforme nella direzione di $v_0$, uniformemente accelerato nella direzione di $a$; la traiettoria è un arco di parabola (Fisica 3, capitolo 12).

### 2.5.1 Lungo le linee di campo

Un elettrone lasciato fermo in un campo uniforme di $1{,}0 \times 10^4$ N/C subisce una forza $e\,E = 1{,}60 \times 10^{-19}\ \text{C} \cdot 1{,}0 \times 10^4\ \text{N/C} = 1{,}6 \times 10^{-15}$ N, opposta al campo, e accelera di $a = e\,E/m_e = 1{,}6 \times 10^{-15}\ \text{N} / 9{,}11 \times 10^{-31}\ \text{kg} \approx 1{,}8 \times 10^{15}\ \text{m/s}^2$: quasi duecentomila miliardi di volte l'accelerazione di gravità. Dopo un solo centimetro viaggia a $\sqrt{(2a\,s)} \approx 5{,}9 \times 10^6$ m/s, il 2% della velocità della luce, e ci ha messo poco più di tre miliardesimi di secondo.

Il peso dell'elettrone, $m_e g = 9{,}11 \times 10^{-31}\ \text{kg} \cdot 9{,}8\ \text{m/s}^2 \approx 8{,}9 \times 10^{-30}$ N, è quasi $2 \times 10^{14}$ volte più piccolo della forza elettrica: nei problemi sul moto di elettroni e protoni nei campi elettrici *la gravità si trascura*. Non così per una goccia d'olio o un granello di polvere, la cui massa è milioni di miliardi di volte maggiore: lì peso e forza elettrica possono essere confrontabili, ed è l'idea dell'esperimento di Millikan (Approfondimento più avanti).

### 2.5.2 Attraverso il campo: la deflessione

Un elettrone entra con velocità $v_0$ perpendicolare al campo uniforme che c'è tra due piastre cariche (Figura 2.6). Nella direzione di $v_0$ non agisce nessuna forza, e il moto è uniforme; nella direzione del campo il moto è uniformemente accelerato, verso la piastra positiva. Come un proiettile lanciato orizzontalmente, l'elettrone descrive un arco di parabola; uscito dalle piastre prosegue in linea retta, perché lì il campo è nullo. È il principio dei **tubi a raggi catodici**, i tubi a vuoto in cui un fascio di elettroni colpisce uno schermo fluorescente e accende un punto luminoso. Nei vecchi oscilloscopi il fascio passava tra due coppie di **piastre di deflessione**, oriz-

zontali e verticali: cambiando il campo tra le piastre si spostava il punto sullo schermo e si disegnavano grafici di tensioni elettriche. (Nei televisori a tubo la deflessione era invece magnetica: capitolo 7.)

**ESEMPIO SVOLTO**

### Un elettrone tra le piastre di deflessione

**Problema.** Un elettrone entra con velocità $v_0 = 2{,}0 \times 10^7$ m/s, parallela alle piastre, nel campo uniforme $E = 1{,}0 \times 10^4$ N/C che c'è tra due piastre lunghe $L = 4{,}0$ cm e distanti 2,0 cm, entrando a metà strada. Calcola a) lo spostamento verticale all'uscita dalle piastre; b) l'angolo di cui è deviato; c) a che altezza colpisce uno schermo posto 10 cm oltre le piastre.

**a)** L'accelerazione, diretta verso la piastra positiva, vale $a = e\,E/m_e \approx 1{,}76 \times 10^{15}$ m/s$^2$. Il tempo tra le piastre è quello del moto uniforme: $t = L/v_0 = 0{,}040$ m / $2{,}0 \times 10^7$ m/s $= 2{,}0 \times 10^{-9}$ s. Lo spostamento è $y = \tfrac{1}{2} a\,t^2 = \tfrac{1}{2} \cdot 1{,}76 \times 10^{15} \cdot (2{,}0 \times 10^{-9})^2$ m $\approx 3{,}5 \times 10^{-3}$ m $= 3{,}5$ mm, meno del centimetro che separa l'elettrone dalla piastra: l'elettrone esce senza urtarla.

**b)** All'uscita la componente della velocità nella direzione del campo è $v_y = a\,t \approx 3{,}5 \times 10^6$ m/s; l'angolo $\alpha$ con la direzione iniziale ha $\operatorname{tg}\alpha = v_y/v_0 \approx 0{,}176$, da cui $\alpha \approx 10°$.

**c)** Oltre le piastre l'elettrone va in linea retta, salendo di 0,176 mm per ogni millimetro percorso: in 100 mm sale di altri 17,6 mm. Sullo schermo il punto si trova a 3,5 mm + 17,6 mm ≈ 21 mm dalla posizione che avrebbe senza campo.

**Controllo.** I valori sono quelli della Figura 2.6, che disegna la traiettoria calcolata. La velocità è il 7% di quella della luce: la meccanica di Newton è ancora una buona approssimazione. Si noti l'«effetto leva»: lo schermo lontano trasforma una deflessione di pochi millimetri in uno spostamento sei volte maggiore.

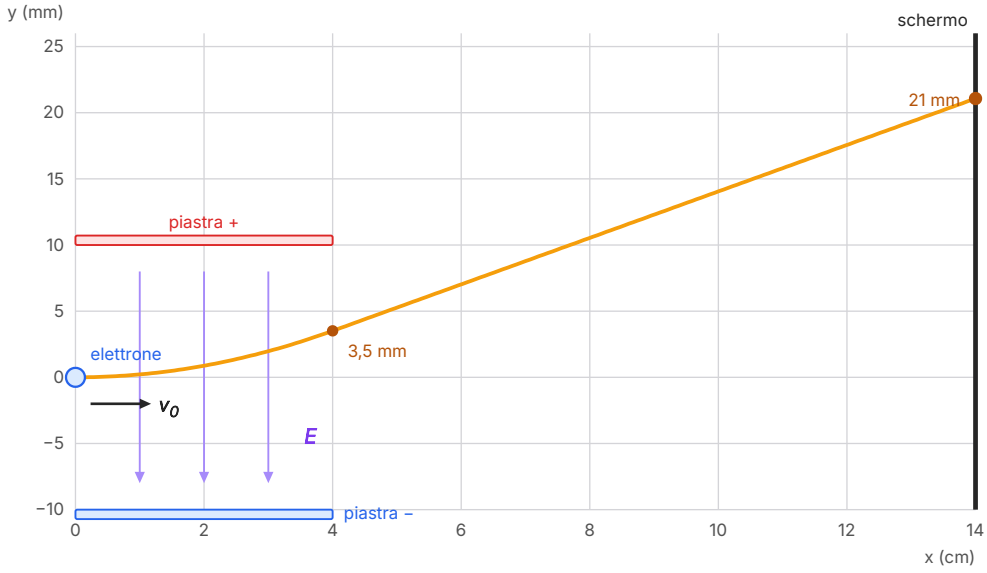



**Figura 2.6** Traiettoria calcolata dell'elettrone dell'esempio svolto ($E$ = 1,0 × $10^4$ N/C, $v_0$ = 2,0 × $10^7$ m/s, piastre lunghe 4,0 cm). Tra le piastre è un arco di parabola, oltre è una retta. Le due scale sono diverse: in orizzontale centimetri, in verticale millimetri.

**APPROFONDIMENTO**

### Millikan e le goccioline d'olio

Nel 1897 J. J. Thomson aveva scoperto l'elettrone. Ma la carica è davvero fatta di «granelli» tutti uguali? Tra il 1909 e il 1913 il fisico americano Robert A. Millikan, all'Università di Chicago, rispose con un esperimento elegante.

Con uno spruzzatore produceva goccioline d'olio, alcune delle quali si caricavano per strofinio, e ne osservava una alla volta al microscopio tra due piastre orizzontali. A piastre scariche la goccia cadeva lentamente nell'aria, e dalla velocità di caduta si ricavava la sua massa. Caricando le piastre agiva anche la forza elettrica $q\,E$: regolando il campo si poteva tenere la goccia sospesa, con $q\,E = m\,g$, o farla risalire, e ricavarne la carica. La stessa goccia poteva acquistare o perdere carica (anche grazie ai raggi X, che ionizzano l'aria) ed essere misurata più volte.

Tutte le cariche misurate risultavano multipli interi di uno stesso valore, la carica elementare. Nel 1913 Millikan ottenne 1,592 × $10^{-19}$ C, meno dell'1% sotto il valore attuale: lo scarto era dovuto a un dato inesatto sulla viscosità dell'aria. Nel 1923 ricevette il premio Nobel per la fisica, anche per le sue misure sull'effetto fotoelettrico (capitolo 13). Dai suoi quaderni risulta che non pubblicò tutte le gocce misurate, e si discute ancora se quella scelta fosse giustificata; la quantizzazione della carica è stata comunque confermata da tutti gli esperimenti successivi.

ESEMPIO SVOLTO

**Leggere i dati: la carica è quantizzata?**

**Problema.** In un esperimento del tipo di Millikan si misurano le cariche (in valore assoluto) di sei goccioline, in unità di $10^{-19}$ C: 3,19; 4,82; 6,38; 8,03; 9,58; 12,81 (dati simulati). Mostra che sono multipli di una stessa carica e stimane il valore.

**Le differenze.** Ordinati i valori, le differenze tra due successivi sono 1,63; 1,56; 1,65; 1,55; 3,23. Le prime quattro sono vicine a 1,6, l'ultima al suo doppio: le cariche sembrano crescere «a gradini» di circa $1{,}6 \times 10^{-19}$ C.

**I multipli.** Dividendo ciascuna carica per 1,6 si ottengono 1,99; 3,01; 3,99; 5,02; 5,99; 8,01: numeri molto vicini agli interi 2, 3, 4, 5, 6, 8. Nessuna goccia ha una carica «intermedia».

**La stima.** Il valore migliore della carica elementare si ottiene dividendo la somma delle cariche per la somma dei multipli: $e \approx 44{,}81 \times 10^{-19}\ \text{C} / 28 \approx 1{,}600 \times 10^{-19}$ C.

**Osservazione.** Sei gocce rendono il risultato solo plausibile: Millikan ne misurò centinaia, e fu proprio l'assenza di valori intermedi a renderlo convincente.

## 2.6 I conduttori in equilibrio elettrostatico

In un conduttore metallico alcuni elettroni sono liberi di muoversi (capitolo 1). Se c'è un campo, li spinge; essi si spostano e si accumulano finché le cariche spostate producono un campo che annulla quello che le muoveva. In una frazione di secondo si raggiunge l'**equilibrio elettrostatico**, lo stato in cui nel conduttore nessuna carica si muove più. Da questa sola condizione seguono tre proprietà.

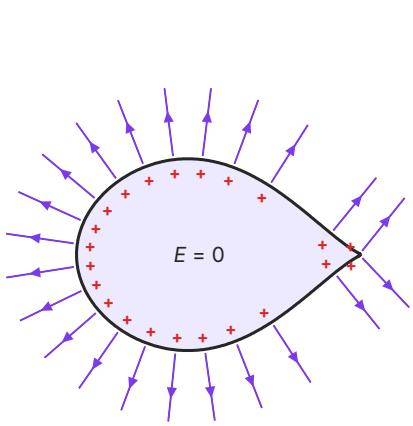
1. **All'interno del conduttore il campo è nullo.** Se non lo fosse, gli elettroni liberi si muoverebbero, e l'equilibrio non ci sarebbe.
2. **La carica in eccesso si trova sulla superficie.** Una superficie gaussiana tracciata tutta dentro il metallo ha flusso nullo, perché lì $E = 0$; per il teorema di Gauss non racchiude carica. Non potendo stare all'interno, la carica in eccesso sta tutta sulla superficie, come risultato della repulsione tra cariche dello stesso segno che le spinge il più lontano possibile le une dalle altre.
3. **Appena fuori, il campo è perpendicolare alla superficie** e vale $\sigma/\varepsilon_0$, dove $\sigma$ è la densità di carica in quel punto. Se avesse una componente parallela alla superficie, sposterebbe le cariche lungo di essa. L'intensità si ricava con un cilindretto gaussiano a cavallo della superficie: il flusso passa solo dalla base esterna, perché all'interno il campo è nullo, e $E\,S = \sigma S/\varepsilon_0$.

La Figura 2.7a mostra queste proprietà per un conduttore carico di forma irregolare: le linee escono perpendicolari alla superficie, e sono più fitte dove la superficie è più curva. Attenzione: campo nullo all'interno non vuol dire che il conduttore sia scarico, né che lì «non succeda nul-

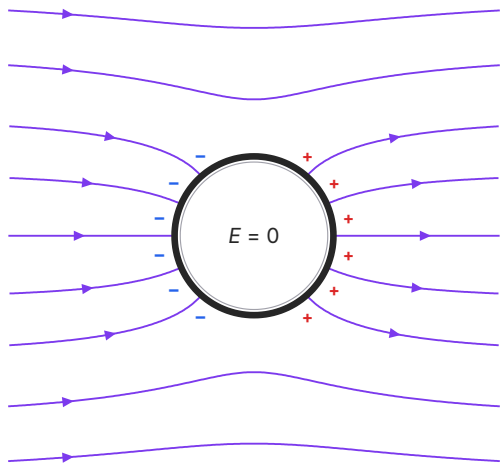
la»; nel capitolo 3 vedrai che un'altra grandezza, il potenziale, all'interno è costante ma in genere diverso da zero.

### 2.6.1 La gabbia di Faraday

Se il conduttore è cavo e nella cavità non ci sono cariche, il campo è nullo anche nella cavità, qualunque cosa accada fuori: le cariche indotte sulla superficie esterna si dispongono in modo da annullare all'interno il campo esterno (Figura 2.7b). Un involucro conduttore che protegge così il suo interno si chiama **gabbia di Faraday**, o **schermo elettrostatico**, e funziona anche se è fatto di rete, purché le maglie siano fitte. Nel 1836 Faraday ne fece la prova su sé stesso: si fece costruire una camera cubica di dodici piedi di lato (circa 3,7 m), rivestita di rete e fogli metallici, vi entrò con i suoi strumenti più sensibili mentre l'esterno veniva caricato fino a far scoccare scintille, e all'interno non rilevò alcun effetto.




a) conduttore carico: cariche sulla superficie, più fitte sulla punta (schematico)




b) tubo metallico in un campo uniforme: dentro il campo è nullo (sezione)

**Figura 2.7** a) Un conduttore carico in equilibrio (schematico): la carica sta sulla superficie, il campo interno è nullo e le linee escono perpendicolari alla superficie, più fitte sulla punta. b) Sezione di un lungo tubo metallico in un campo uniforme, linee calcolate: sul tubo si inducono cariche negative da una parte e positive dall'altra, le linee arrivano perpendicolari alla superficie e dentro il tubo il campo è nullo.

Un'automobile colpita da un fulmine protegge chi sta dentro soprattutto perché la carrozzeria metallica fa da gabbia: la corrente del fulmine scorre all'esterno, sulla lamiera, e raggiunge il terreno con un arco attraverso l'aria o lungo la superficie bagnata degli pneumatici; gli pneumatici di gomma, con pochi centimetri di spessore, non fermerebbero una scarica che ha appena attraversato chilometri d'aria. Per la stessa ragione un aereo di linea colpito da un fulmine prosegue il volo: la fusoliera metallica, o una rete metallica inglobata nei materiali compositi, fa da schermo. Il forno a microonde è una gabbia rovesciata: la rete metallica dello sportello

trattiene all'interno le microonde, la cui lunghezza d'onda, circa 12 cm, è molto maggiore dei fori. (Con i campi che cambiano rapidamente lo schermo funziona solo se le aperture sono piccole rispetto alla lunghezza d'onda: capitolo 10.)

### 2.6.2 Il potere delle punte

Su un conduttore carico la carica non si distribuisce in modo uniforme: si addensa dove la superficie è più curva, cioè sugli spigoli e sulle punte, e lì il campo appena fuori, $\sigma/\varepsilon_0$, è più intenso. Lo dimostrerai nel capitolo 3. È il **potere delle punte**. Quando il campo vicino a una punta supera la **rigidità dielettrica** dell'aria, il campo massimo che un isolante sopporta senza diventare conduttore (circa $3 \times 10^6$ N/C per l'aria secca), le molecole vicine vengono ionizzate e la carica si disperde nell'aria in una scarica debole e silenziosa, a volte accompagnata da un tenue bagliore: l'**effetto corona**. I marinai lo vedevano in cima agli alberi delle navi durante i temporali e lo chiamavano «fuoco di Sant'Elmo».

Il parafulmine, proposto da Benjamin Franklin a metà del Settecento, sfrutta le punte: un'asta metallica appuntita sul tetto, collegata a terra con un grosso conduttore, offre al fulmine un percorso preferenziale e lo scarica nel terreno senza che attraversi l'edificio. Per la stessa ragione, nei laboratori di alta tensione i conduttori hanno forme arrotondate e lisce: una punta disperderebbe la carica.

**IN SINTESI**

#### Le formule del capitolo e il loro significato

**Campo elettrico:** $\boldsymbol{E} = \boldsymbol{F}/q$, in N/C: la forza per unità di carica che agirebbe su una carica di prova positiva; la forza su una carica qualsiasi è $\boldsymbol{F} = q\boldsymbol{E}$, opposta al campo se $q < 0$.

**Carica puntiforme:** $E = k_0 Q/r^2$, radiale, uscente se $Q > 0$ ed entrante se $Q < 0$; vale anche fuori da una sfera carica uniformemente. Più cariche: somma *vettoriale* dei campi.

**Flusso:** $\Phi(\boldsymbol{E}) = E\,S\cos\theta$, in N·m$^2$/C, con $\theta$ angolo tra campo e normale: misura quante linee attraversano la superficie.

**Teorema di Gauss:** $\Phi(\boldsymbol{E}) = Q_{\text{int}}/\varepsilon_0$ per ogni superficie chiusa: conta solo la carica interna, con il suo segno.

**Piano carico:** $E = \sigma/(2\varepsilon_0)$ da entrambe le parti, indipendente dalla distanza. **Due piastre opposte:** $E = \sigma/\varepsilon_0$ uniforme tra le piastre, nullo fuori. $\sigma = Q/S$ in C/m$^2$.

**Moto in un campo uniforme:** $\boldsymbol{a} = q\boldsymbol{E}/m$, costante: moto uniformemente accelerato lungo il campo, parabola se la velocità iniziale è perpendicolare. Per elettroni e protoni il peso è trascurabile.

**Conduttore in equilibrio:** $E = 0$ all'interno e nelle cavità vuote; carica sulla superficie; campo esterno perpendicolare alla superficie e uguale a $\sigma/\varepsilon_0$, più intenso sulle punte.

Il campo ha sostituito l'azione a distanza, ma finora l'hai descritto solo con le forze. Nel prossimo capitolo lo guarderai dal punto di vista dell'energia: il lavoro che il campo compie su una carica, il potenziale elettrico e i condensatori, che nel campo tra due piastre immagazzinano energia.

**SINTESI**

- Nel modello dell'azione a distanza una carica agisce direttamente su un'altra, istantaneamente; nel modello del campo una carica modifica lo spazio attorno a sé e l'altra risponde al campo nel punto in cui si trova. Faraday lo immaginava con le linee di forza.
- Il campo elettrico in un punto è $\boldsymbol{E} = \boldsymbol{F}/q$, misurato con una carica di prova positiva; si misura in N/C ed è indipendente dalla carica di prova. La forza su una carica è $\boldsymbol{F} = q\boldsymbol{E}$.
- Una carica puntiforme produce un campo radiale di intensità $E = k_0 Q/r^2$, uscente dalle cariche positive ed entrante nelle negative. Il campo di più cariche è la somma vettoriale dei singoli campi.
- Le linee di campo sono tangenti al campo, escono dalle cariche positive ed entrano nelle negative, non si incrociano e sono più fitte dove il campo è più intenso. Non sono traiettorie.
- Un dipolo elettrico è una coppia di cariche uguali e opposte; le sue linee escono dalla carica positiva e si chiudono sulla negativa.
- Il flusso del campo attraverso una superficie piana è $\Phi = E\,S\cos\theta$; per una superficie chiusa si conta positivo il flusso uscente.
- Teorema di Gauss: il flusso attraverso una superficie chiusa è $Q_{\text{int}}/\varepsilon_0$, dove $Q_{\text{int}}$ è la carica totale racchiusa. È equivalente alla legge di Coulomb.
- Fuori da una sfera carica uniformemente il campo è quello di una carica puntiforme nel centro; un piano infinito produce $\sigma/(2\varepsilon_0)$ a ogni distanza; tra due piastre opposte il campo è uniforme, $\sigma/\varepsilon_0$, e fuori è nullo.
- In un campo uniforme una carica ha accelerazione costante $q\boldsymbol{E}/m$: moto rettilineo uniformemente accelerato lungo il campo, parabolico se entra perpendicolarmente. Per gli elettroni la gravità è trascurabile.
- L'esperimento di Millikan (1909–1913) ha mostrato che ogni carica è un multiplo intero della carica elementare.
- In un conduttore in equilibrio il campo interno è nullo, la carica in eccesso sta sulla superficie e il campo esterno è perpendicolare alla superficie. Un involucro conduttore scherma il suo interno (gabbia di Faraday).
- La carica si addensa sulle punte, dove il campo può superare la rigidità dielettrica dell'aria (circa $3 \times 10^6$ N/C): è il potere delle punte, sfruttato dal parafulmine.

## ESERCIZI

### Comprendere e ricordare

1. ● In un punto P una carica di prova $q$ subisce una forza $\boldsymbol{F}$. Se in P si mette una carica di prova $2q$, il campo elettrico in P:
   - **A.** raddoppia
   - **B.** si dimezza
   - **C.** non cambia
   - **D.** si annulla

2. ● L'unità di misura del campo elettrico nel Sistema Internazionale è:
   - **A.** N/C
   - **B.** N·C
   - **C.** C/N
   - **D.** $\text{N/m}^2$

3. ● Le linee del campo elettrico:
   - **A.** possono incrociarsi dove il campo è molto intenso
   - **B.** sono le traiettorie delle cariche positive
   - **C.** sono più rade dove il campo è più intenso
   - **D.** escono dalle cariche positive ed entrano nelle cariche negative

4. ● Il campo di una carica puntiforme vale 900 N/C a 2,0 cm dalla carica. A 6,0 cm vale:
   - **A.** 300 N/C
   - **B.** 100 N/C
   - **C.** 450 N/C
   - **D.** 2700 N/C

5. ●● Una superficie chiusa racchiude una carica $+Q$ e una carica $-Q$. Il flusso del campo elettrico attraverso di essa:
   - **A.** è nullo
   - **B.** vale $2Q/\varepsilon_0$
   - **C.** vale $Q/\varepsilon_0$
   - **D.** dipende dalla forma della superficie

6. ●● Due grandi piastre parallele hanno cariche opposte con densità $+\sigma$ e $-\sigma$. Il campo elettrico:
   - **A.** vale $\sigma/(2\varepsilon_0)$ tra le piastre ed è nullo fuori
   - **B.** vale $\sigma/\varepsilon_0$ ovunque
   - **C.** vale $\sigma/\varepsilon_0$ tra le piastre ed è nullo fuori
   - **D.** è nullo tra le piastre e vale $\sigma/\varepsilon_0$ fuori

7. ● All'interno di un conduttore metallico carico, in equilibrio elettrostatico, il campo elettrico:
   **A.** è uguale a quello sulla superficie
   **B.** è diretto verso il centro
   **C.** dipende dalla forma del conduttore
   **D.** è nullo

### Vero o falso

8. ● Il campo elettrico in un punto esiste anche se in quel punto non c'è nessuna carica che lo avverta. V / F

9. ● Un protone e un elettrone posti nello stesso punto di un campo elettrico subiscono la stessa forza. V / F

10. ●● Il campo prodotto da un piano molto esteso, carico in modo uniforme, diminuisce allontanandosi dal piano. V / F

11. ●● Il flusso del campo elettrico attraverso una sfera che racchiude una carica puntiforme non dipende dal raggio della sfera. V / F

12. ●● Durante un temporale, chi sta in un'automobile è protetto dai fulmini soprattutto perché gli pneumatici di gomma isolano l'auto dal suolo. V / F

### Applicare

13. ● Una carica di prova di 2,0 nC, posta nel punto P, subisce una forza di $6{,}0 \times 10^{-5}$ N diretta verso est. a) Calcola il campo elettrico in P (intensità, direzione e verso). b) Quale forza subirebbe in P una carica di −5,0 nC?

14. ● Calcola l'intensità del campo elettrico prodotto da una carica puntiforme di +5,0 μC a 30 cm di distanza, e indicane il verso.

15. ● Completa. Le linee del campo elettrico escono dalle cariche _____ ed entrano nelle cariche _____ ; in ogni punto sono _____ al vettore campo; dove sono più fitte il campo è più _____ ; sulla superficie di un conduttore in equilibrio arrivano _____ alla superficie.

16. ● In un campo uniforme di 400 N/C si trova una superficie piana di 0,50 $m^2$. Calcola il flusso del campo attraverso la superficie quando l'angolo tra il campo e la normale vale 0°, 60° e 90°.

17. ●● Una superficie chiusa racchiude tre cariche: +3,0 nC, −5,0 nC e +1,0 nC; fuori dalla superficie c'è una quarta carica di +8,0 nC. Calcola il flusso del campo elettrico attraverso la superficie e spiega il significato del segno.

18. ●● Tra due grandi piastre parallele con cariche opposte si vuole un campo uniforme di $1{,}0 \times 10^4$ N/C. a) Quale densità superficiale di carica serve? b) Quanto vale il campo all'esterno delle piastre?

19. ● Leggi sulla Figura 2.6 lo spostamento verticale dell'elettrone all'uscita dalle piastre e nel punto in cui colpisce lo schermo. Perché, dopo le piastre, la traiettoria diventa una retta? Verso quale piastra viene deviato l'elettrone, e perché?

### Problemi

20. ●● Due cariche puntiformi $q_1 = +2{,}0$ nC e $q_2 = +8{,}0$ nC distano 30 cm. a) In quale punto del segmento che le unisce il campo elettrico è nullo? b) Calcola il campo nel punto medio del segmento (intensità e verso).

21. ●●● Due cariche $q_A = +4{,}0$ nC e $q_B = -4{,}0$ nC occupano due vertici A e B di un triangolo equilatero di lato 10 cm. a) Calcola il campo elettrico nel terzo vertice C, per componenti. b) Quale forza (intensità, direzione e verso) subirebbe un elettrone posto in C?

22. ●●● Un elettrone entra a metà strada tra due piastre lunghe 5,0 cm e distanti 2,0 cm, con velocità di $2{,}5 \times 10^7$ m/s parallela alle piastre; tra le piastre il campo è uniforme e vale $1{,}5 \times 10^4$ N/C. a) Calcola l'accelerazione dell'elettrone e il tempo che passa tra le piastre. b) Di quanto è deviato all'uscita? Esce senza toccare le piastre? c) Calcola l'angolo di deviazione. d) Di quante volte la forza elettrica supera il peso dell'elettrone? (Usa le leggi del moto del proiettile, Fisica 3, capitolo 12.)

23. ●●● Una goccia d'olio sferica di raggio 1,2 μm e densità 880 kg/m$^3$ resta sospesa, ferma, tra due piastre orizzontali in cui il campo elettrico vale $9{,}7 \times 10^4$ N/C. a) Calcola la massa e il peso della goccia. b) Calcola la sua carica e il numero di cariche elementari che porta. c) La goccia ha elettroni in eccesso: la piastra positiva è quella in alto o quella in basso? Giustifica la risposta.

24. ●● Attorno a una sfera carica si misura il campo elettrico a varie distanze $r$ dal centro: 7190 N/C a 10 cm, 1800 N/C a 20 cm, 800 N/C a 30 cm, 450 N/C a 40 cm. a) Mostra che il campo è inversamente proporzionale a $r^2$ calcolando il prodotto $E\,r^2$. b) Ricava la carica della sfera. c) La sfera è un conduttore di raggio 5,0 cm: quanto valgono il campo nel suo centro, il campo appena fuori dalla superficie e la densità superficiale di carica?

### Ragionare e argomentare

25. ●● Commenta la fonte. Nella prefazione del *Trattato su elettricità e magnetismo* (1873) Maxwell scrive: «Faraday, con l'occhio della mente, vedeva linee di forza attraversare tutto lo spazio là dove i matematici vedevano centri di forza che si attraggono a distanza; Faraday vedeva un mezzo là dove essi non vedevano altro che distanza» (traduzione della redazione). Quali sono i due modelli messi a confronto? Per cariche ferme, si può decidere con un esperimento quale dei due sia giusto? Quale fenomeno, studiato più avanti nel volume, darà ragione a Faraday?

26. ●● Trova l'errore. Uno studente scrive: «Le linee del campo di un dipolo sono le strade che seguono le cariche: un protone lasciato fermo vicino alla carica positiva percorrerà esattamente la linea curva che la collega alla carica negativa». Individua l'errore e correggi il ragionamento. In quale caso una carica segue davvero una linea di campo?

27. ●●● Stima. L'aria secca diventa conduttrice quando il campo supera circa $3 \times 10^6$ N/C. a) Qual è la carica massima che può portare una sfera metallica di raggio 10 cm prima che si scarichi nell'aria? b) A quanti elettroni in eccesso corrisponde, se la carica è negativa? c) Una sfera di raggio dieci volte minore quanta carica può portare? Spiega il legame con il potere delle punte.

### Verso l'esame

28. ●● **Dal documento.** «Durante la salita, un aereo di linea attraversa una nube temporalesca. Un lampo accecante avvolge la cabina, si sente un forte boato; dopo l'atterraggio i tecnici trovano soltanto piccoli segni di bruciatura in punta all'ala e in coda. Nessun passeggero ha subito danni.» a) Quale fenomeno elettrico spiega perché i passeggeri non hanno subito danni? b) Quali proprietà dei conduttori in equilibrio elettrostatico entrano in gioco (aiutati con la Figura 2.7)? c) Collegamento con l'Educazione civica: quali comportamenti consiglieresti, sulla base della fisica di questo capitolo, a chi è sorpreso da un temporale all'aperto o in automobile?

29. ●● **Trattazione sintetica.** In 10–15 righe spiega che cos'è il campo elettrico e perché la fisica lo ha preferito all'azione a distanza, distinguendo ciò che puoi già affermare con l'elettrostatica da ciò che sarà chiaro solo con le onde elettromagnetiche.

30. ●●● **Problema breve commentato.** Nell'atomo di idrogeno l'elettrone si trova in media a $5{,}29 \times 10^{-11}$ m dal protone. a) Calcola il campo elettrico prodotto dal protone a quella distanza e la forza sull'elettrone. b) Calcola la forza gravitazionale tra le due particelle e il rapporto tra le due forze. Commenta il risultato: che cosa dice sul ruolo della gravità negli atomi? Confronta il campo calcolato con quello che fa scoccare una scintilla nell'aria.

## PER APPROFONDIRE

- [FAR] M. Faraday, *Experimental Researches in Electricity*: le serie in cui Faraday introduce le linee di forza e racconta l'esperimento della camera schermata.
- [MAX] J.C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*: la prefazione, con il celebre confronto tra il punto di vista di Faraday e quello dei matematici.
- [EIN] A. Einstein, L. Infeld, *L'evoluzione della fisica*: la nascita del concetto di campo e il suo significato per la fisica moderna, raccontati senza formule.
- [FEY] R.P. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands, *La fisica di Feynman*, vol. II: i capitoli sul campo elettrico, sul teorema di Gauss e sui conduttori, con molte osservazioni sul senso fisico delle linee di campo.
- [HRW] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fondamenti di fisica*: i capitoli sul campo elettrico e sulla legge di Gauss, con molti esercizi graduati.

# Glossario del capitolo

**Azione a distanza**
Modello in cui un corpo agisce su un altro direttamente, attraverso lo spazio vuoto e istantaneamente, senza nulla che trasmetta l'azione.

**Campo elettrico**
Proprietà dello spazio attorno a una o più cariche, per cui una carica posta in un punto subisce una forza; si descrive con il vettore $\boldsymbol{E} = \boldsymbol{F}/q$, in N/C.

**Campo scalare**
Grandezza che associa un numero a ogni punto dello spazio, come la temperatura in una carta meteorologica.

**Campo vettoriale**
Grandezza che associa un vettore a ogni punto dello spazio, come il campo elettrico o il campo gravitazionale.

**Carica di prova**
Carica positiva così piccola da non disturbare le cariche che generano il campo; serve a misurare il campo in un punto.

**Densità superficiale di carica**
Carica per unità di area di una superficie, $\sigma = Q/S$, in $\mathrm{C/m^2}$.

**Dipolo elettrico**
Coppia di cariche uguali e opposte a breve distanza; le sue linee escono dalla carica positiva ed entrano nella negativa.

**Effetto corona**
Scarica debole e silenziosa che si produce vicino a punte cariche, dove il campo ionizza l'aria; è il «fuoco di Sant'Elmo».

**Equilibrio elettrostatico**
Stato di un conduttore in cui nessuna carica si muove: il campo interno è nullo e la carica in eccesso sta sulla superficie.

**Flusso del campo elettrico**
Per una superficie piana in un campo uniforme, $\Phi = E\,S\cos\theta$, con $\theta$ angolo tra il campo e la normale; si misura in $\mathrm{N\cdot m^2/C}$.

**Gabbia di Faraday**
Involucro conduttore, anche a rete, all'interno del quale il campo elettrico è nullo qualunque sia il campo esterno statico; detto anche schermo elettrostatico.

**Linee di forza**
Nome dato da Faraday alle linee di campo, che egli considerava enti fisici reali.

**Piastre di deflessione**
Coppie di piastre cariche che, con il loro campo uniforme, deviano il fascio di elettroni di un tubo a raggi catodici.

**Potere delle punte**
Tendenza della carica di un conduttore ad addensarsi nelle parti più appuntite, dove il campo esterno è più intenso.

**Rigidità dielettrica**
Campo elettrico massimo che un isolante sopporta senza diventare conduttore; per l'aria secca circa $3 \times 10^6$ N/C.

**Superficie gaussiana**
Superficie chiusa immaginaria, scelta per applicare il teorema di Gauss.

**Teorema di Gauss**
Il flusso del campo elettrico attraverso una superficie chiusa è uguale alla carica totale racchiusa divisa per $\varepsilon_0$.

**Tubo a raggi catodici**
Tubo a vuoto in cui un fascio di elettroni, deviato da campi elettrici o magnetici, colpisce uno schermo fluorescente.

# Soluzioni

**1.** C. Il campo è una proprietà del punto: raddoppiando la carica di prova raddoppia la forza, ma il rapporto $\boldsymbol{F}/q$ non cambia.

**2.** A. $E = F/q$ si misura in newton al coulomb (equivalente a V/m, capitolo 3).

**3.** D. Le linee escono dalle cariche positive ed entrano nelle negative; non si incrociano, non sono traiettorie e sono più fitte dove il campo è più intenso.

**4.** B. A distanza tripla il campo è $1/3^2 = 1/9$: 900 N/C / 9 = 100 N/C.

**5.** A. Per il teorema di Gauss il flusso è $Q_{\text{int}}/\varepsilon_0$ e la carica interna totale è $+Q - Q = 0$.

**6.** C. I campi delle due piastre, $\sigma/(2\varepsilon_0)$ ciascuno, si sommano tra le piastre e si annullano all'esterno.

**7.** D. Se il campo interno non fosse nullo, gli elettroni liberi si muoverebbero e non ci sarebbe equilibrio.

**8.** V. Il campo è una proprietà dello spazio attorno alle cariche che lo generano; la carica di prova serve solo a misurarlo.

**9.** F. Le forze hanno la stessa intensità *e E* ma versi opposti; anche le accelerazioni sono diverse, perché le masse sono diverse.

**10.** F. Il campo di un piano infinito vale $\sigma/(2\varepsilon_0)$ a qualunque distanza: le linee sono parallele e non si diradano.

**11.** V. Il flusso vale $Q/\varepsilon_0$ per ogni sfera, perché la superficie cresce come $r^2$ e il campo diminuisce come $1/r^2$.

**12.** F. Protegge la carrozzeria metallica, che fa da gabbia di Faraday: il campo all'interno resta nullo e la scarica corre all'esterno; pochi centimetri di gomma non fermano un fulmine.

**13.** a) $E = F/q = 6{,}0 \times 10^{-5}$ N / $2{,}0 \times 10^{-9}$ C = $3{,}0 \times 10^4$ N/C, diretto verso est. b) $F = |q|E = 5{,}0 \times 10^{-9}$ C · $3{,}0 \times 10^4$ N/C = $1{,}5 \times 10^{-4}$ N, diretta verso ovest (carica negativa: verso opposto al campo).

**14.** $E = k_0 Q/r^2 = 8{,}99 \times 10^9 \cdot 5{,}0 \times 10^{-6} / (0{,}30)^2$ N/C ≈ $5{,}0 \times 10^5$ N/C, radiale e uscente dalla carica (positiva).

**15.** positive; negative; tangenti; intenso; perpendicolari.

**16.** $\Phi = E\,S \cos\theta$: con $\theta = 0°$, $\Phi = 400 \cdot 0{,}50$ N·m²/C = $2{,}0 \times 10^2$ N·m²/C; con $\theta = 60°$, $\Phi = 2{,}0 \times 10^2 \cdot 0{,}50$ N·m²/C = $1{,}0 \times 10^2$ N·m²/C; con $\theta = 90°$, $\Phi = 0$ (la superficie è parallela al campo).

**17.** Conta solo la carica interna: $Q_{\text{int}} = (3{,}0 - 5{,}0 + 1{,}0)$ nC = −1,0 nC. $\Phi = Q_{\text{int}}/\varepsilon_0 = -1{,}0 \times 10^{-9}$ C / $8{,}85 \times 10^{-12}$ F/m ≈ $-1{,}1 \times 10^2$ N·m²/C. Il segno meno indica che, complessivamente, entrano più linee di quante ne escano. La carica esterna di +8,0 nC non contribuisce.

**18.** a) Da $E = \sigma/\varepsilon_0$: $\sigma = \varepsilon_0 E = 8{,}85 \times 10^{-12} \cdot 1{,}0 \times 10^4$ C/m² ≈ $8{,}9 \times 10^{-8}$ C/m². b) Nullo (per piastre molto estese rispetto alla loro distanza): i campi delle due piastre all'esterno sono opposti.

**19.** All'uscita circa 3,5 mm; sullo schermo circa 21 mm. Oltre le piastre il campo è nullo: nessuna forza agisce sull'elettrone, che prosegue di moto rettilineo uniforme nella direzione che aveva all'uscita. L'elettrone è deviato verso la piastra positiva, perché la sua carica è negativa e la forza è opposta al campo, che va dalla piastra positiva alla negativa.

**20.** a) Nel punto a distanza $x$ da $q_1$ i campi sono opposti; si annullano se $k_0 q_1/x^2 = k_0 q_2/(0{,}30\text{ m} - x)^2$, cioè $(0{,}30\text{ m} - x)/x = \sqrt{(q_2/q_1)} = 2$, da cui $x = 0{,}10$ m: a 10 cm da $q_1$ (e 20 cm da $q_2$). b) Nel punto medio, a 0,15 m da entrambe: $E_1 = 8{,}99 \times 10^9 \cdot 2{,}0 \times 10^{-9} / (0{,}15)^2$ N/C ≈ 799 N/C, diretto verso $q_2$; $E_2 = 8{,}99 \times 10^9 \cdot 8{,}0 \times 10^{-9} / (0{,}15)^2$ N/C ≈ 3196 N/C, diretto verso $q_1$. Risultante: $E \approx 2{,}4 \times 10^3$ N/C, diretto verso $q_1$.

**21.** a) Ciascuna carica dista 0,10 m da C: $E_A = E_B = 8{,}99 \times 10^9 \cdot 4{,}0 \times 10^{-9} / (0{,}10)^2$ N/C ≈ $3{,}6 \times 10^3$ N/C.

Asse $x$ da A verso B, asse $y$ dal lato AB verso C. $\vec{E}_A$ si allontana da A: componenti ($E_A \cos 60°$; $E_A \operatorname{sen} 60°$). $\vec{E}_B$ punta verso B: componenti ($E_B \cos 60°$; $-E_B \operatorname{sen} 60°$). Somma: $E_y = 0$, $E_x = 2 \cdot 3{,}6 \times 10^3 \cdot 0{,}50$ N/C $\approx 3{,}6 \times 10^3$ N/C, parallelo ad AB, da A verso B. b) $F = e\,E = 1{,}60 \times 10^{-19}$ C $\cdot\, 3{,}6 \times 10^3$ N/C $\approx 5{,}8 \times 10^{-16}$ N, parallela ad AB e diretta da B verso A (elettrone: verso opposto al campo).

**22.** a) $a = e\,E/m_e = 1{,}60 \times 10^{-19} \cdot 1{,}5 \times 10^4 / 9{,}11 \times 10^{-31}$ m/s$^2 \approx 2{,}6 \times 10^{15}$ m/s$^2$; $t = L/v_0 = 0{,}050$ m $/ 2{,}5 \times 10^7$ m/s $= 2{,}0 \times 10^{-9}$ s. b) $y = \tfrac{1}{2} a\,t^2 = \tfrac{1}{2} \cdot 2{,}63 \times 10^{15} \cdot (2{,}0 \times 10^{-9})^2$ m $\approx 5{,}3 \times 10^{-3}$ m $= 5{,}3$ mm: meno di 10 mm (metà della distanza tra le piastre), quindi l'elettrone esce senza toccarle. c) $v_y = a\,t \approx 5{,}3 \times 10^6$ m/s; tg $\alpha = 5{,}3 \times 10^6 / 2{,}5 \times 10^7 \approx 0{,}21$, $\alpha \approx 12°$. d) $e\,E/(m_e g) = 2{,}4 \times 10^{-15}$ N $/ 8{,}9 \times 10^{-30}$ N $\approx 2{,}7 \times 10^{14}$: il peso è del tutto trascurabile.

**23.** a) $m = \rho \cdot (4/3)\pi r^3 = 880 \cdot (4/3)\pi \cdot (1{,}2 \times 10^{-6})^3$ kg $\approx 6{,}4 \times 10^{-15}$ kg; $m\,g \approx 6{,}2 \times 10^{-14}$ N. b) In equilibrio $q\,E = m\,g$: $q = 6{,}24 \times 10^{-14}$ N $/ 9{,}7 \times 10^4$ N/C $\approx 6{,}4 \times 10^{-19}$ C; $q/e = 6{,}4 \times 10^{-19} / 1{,}60 \times 10^{-19} \approx 4{,}0$: quattro cariche elementari. c) La forza elettrica deve essere verso l'alto; su una carica negativa la forza è opposta al campo, quindi il campo è verso il basso, dalla piastra positiva alla negativa: la piastra positiva è quella in alto.

**24.** a) $E\,r^2$ vale $7190 \cdot 0{,}010 = 71{,}9$; $1800 \cdot 0{,}040 = 72{,}0$; $800 \cdot 0{,}090 = 72{,}0$; $450 \cdot 0{,}16 = 72{,}0$ N·m$^2$/C: costante, quindi $E$ è inversamente proporzionale a $r^2$. b) $Q = E\,r^2/k_0 = 72{,}0 / 8{,}99 \times 10^9$ C $\approx 8{,}0 \times 10^{-9}$ C $= 8{,}0$ nC. c) Al centro $E = 0$ (interno di un conduttore in equilibrio). Appena fuori: $E = k_0 Q/R^2 = 8{,}99 \times 10^9 \cdot 8{,}0 \times 10^{-9} / (0{,}050)^2$ N/C $\approx 2{,}9 \times 10^4$ N/C. $\sigma = Q/(4\pi R^2) = 8{,}0 \times 10^{-9} / (4\pi \cdot 0{,}0025)$ C/m$^2 \approx 2{,}5 \times 10^{-7}$ C/m$^2$; controllo: $\sigma/\varepsilon_0 \approx 2{,}9 \times 10^4$ N/C.

**25.** Traccia di risposta. I due modelli sono l'azione a distanza (cariche come «centri di forza» che agiscono attraverso lo spazio vuoto, come nella legge di Coulomb) e il campo (lo spazio stesso, il «mezzo», è sede di qualcosa di reale, le linee di forza). Per cariche ferme i due modelli danno le stesse forze, quindi nessun esperimento di elettrostatica può decidere. La differenza appare quando le cariche si muovono: le onde elettromagnetiche (capitolo 10) mostrano che le perturbazioni del campo viaggiano a velocità finita e trasportano energia, cosa che l'azione a distanza istantanea non può spiegare.

**26.** L'errore è confondere la direzione della forza (e quindi dell'accelerazione) con quella della velocità. Il protone parte lungo la linea, ma dove la linea si incurva la velocità acquistata lo porta fuori da essa: la traiettoria è in genere diversa dalla linea di campo. Una carica segue esattamente una linea di campo solo se la linea è rettilinea e la carica parte ferma o con velocità lungo la linea (per esempio sull'asse del dipolo, o tra due piastre parallele).

**27.** a) Il campo sulla superficie è $k_0 Q/R^2$: $Q_{max} = E\,R^2/k_0 = 3 \times 10^6 \cdot (0{,}10)^2 / 8{,}99 \times 10^9$ C $\approx 3 \times 10^{-6}$ C, pochi microcoulomb. b) $N = Q/e \approx 3{,}3 \times 10^{-6} / 1{,}60 \times 10^{-19} \approx 2 \times 10^{13}$ elettroni, una frazione minuscola degli elettroni del metallo. c) $Q_{max}$ è proporzionale a $R^2$: con raggio dieci volte minore, cento volte meno carica (circa $3 \times 10^{-8}$ C). Una superficie molto curva raggiunge il campo di scarica con poca carica: le punte, che sono come sfere di raggio piccolissimo, disperdono la carica nell'aria.

**28.** Traccia di risposta. a) La fusoliera conduttrice fa da gabbia di Faraday: il campo all'interno resta nullo e la corrente del fulmine percorre l'esterno dell'aereo. b) In un conduttore in equilibrio il campo interno (e nelle cavità vuote) è nullo, la carica sta sulla superficie esterna e si addensa sulle parti più appuntite (potere delle punte): per questo i segni di bruciatura sono in punta all'ala e in coda. c) All'aperto: evitare di essere il punto più alto o di stare vicino a punti alti isolati (alberi), allontanarsi da creste e specchi d'acqua; in automobile restare all'interno con i finestrini chiusi, senza toccare le parti metalliche collegate alla carrozzeria. La protezione viene dalla carrozzeria metallica, non dagli pneumatici; un'auto decappottabile o con la carrozzeria non metallica non protegge allo stesso modo.

**29.** Traccia di risposta (10–15 righe). Definizione: il campo elettrico in un punto è la forza per unità di carica, $\vec{E} = \vec{F}/q$, che agirebbe su una carica di prova positiva; esiste anche senza la carica di prova. Due modelli: nell'azione a distanza una carica agisce direttamente e istantaneamente su un'altra; nel mo-

dello del campo la carica modifica lo spazio e l'altra risponde al campo locale. Faraday lo rappresentò con le linee di forza, Maxwell lo tradusse in equazioni. In elettrostatica i due modelli danno le stesse forze, e il campo è soprattutto uno strumento potente (sovrapposizione, linee, teorema di Gauss). La ragione profonda per preferirlo arriva con le cariche in moto: il campo trasporta energia e le sue variazioni si propagano a velocità finita, la velocità della luce, come mostrano le onde elettromagnetiche. Un buon testo cita Newton e il suo disagio per l'azione a distanza, e distingue ciò che è già provato da ciò che verrà mostrato più avanti.

**30.** a) $E = k_0 e/r^2 = 8{,}99 \times 10^9 \cdot 1{,}60 \times 10^{-19} / (5{,}29 \times 10^{-11})^2$ N/C $\approx 5{,}1 \times 10^{11}$ N/C; $F = e\,E \approx 8{,}2 \times 10^{-8}$ N. b) $F_g = G\,m_e m_p/r^2 = 6{,}67 \times 10^{-11} \cdot 9{,}11 \times 10^{-31} \cdot 1{,}67 \times 10^{-27} / (5{,}29 \times 10^{-11})^2$ N $\approx 3{,}6 \times 10^{-47}$ N; $F/F_g \approx 2{,}3 \times 10^{39}$. Commento: negli atomi la gravità è del tutto irrilevante; la struttura della materia è decisa dalla forza elettrica. Il campo nell'atomo è circa $10^5$ volte maggiore della rigidità dielettrica dell'aria ($3 \times 10^6$ N/C): campi così intensi esistono solo su scala atomica, e dall'esterno l'atomo neutro appare quasi privo di campo perché le cariche dell'elettrone e del protone si compensano.