

## 22. LA CARICA ELETTRICA E LA LEGGE DI COULOMB

La nostra esperienza ci dice che la Terra attrae ogni corpo indipendentemente dal fatto che il corpo sia o no a contatto con la Terra. La forza gravitazionale agisce a distanza attraverso il vuoto che separa i corpi interagenti. Sebbene si possa dimostrare che la forza gravitazionale si esercita tra due corpi qualsiasi, essa ha conseguenze pratiche soltanto se uno dei corpi interagenti ha una massa enorme, come per esempio un pianeta. Le forze gravitazionali non sono tuttavia le uniche forze che agiscono a distanza, talvolta infatti possono essere presenti forze molto maggiori. Per esempio, un piccolo magnete riesce a sollevare dal tavolo un chiodo d'acciaio vincendo l'attrazione gravitazionale dell'intera Terra e un pettine strofinato contro la manica solleva pezzetti di carta.

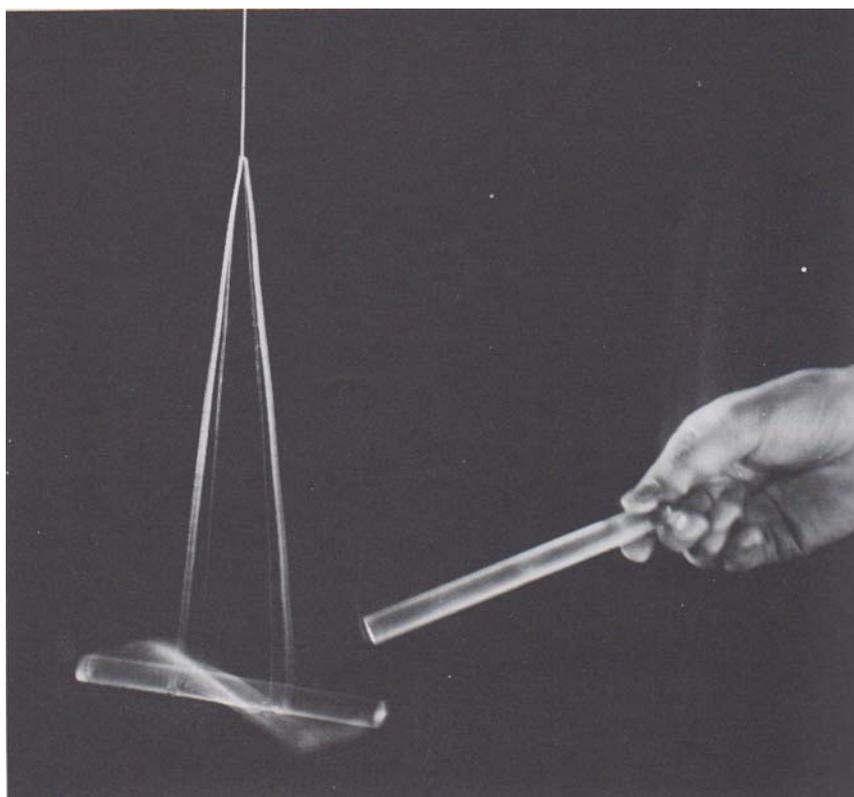
Le forze esercitate dal magnete e dal pettine sono esempi rispettivamente di *forze magnetiche* e di *forze elettriche*. Sebbene l'esistenza di tali forze fosse nota fin dall'antichità, solo durante il diciannovesimo secolo i fisici riuscirono a raggiungere una chiara comprensione di questi fenomeni. Raramente una ricerca ha avuto conseguenze così estese e profonde: le applicazioni dell'energia elettrica e lo sviluppo delle comunicazioni elettriche hanno cambiato interamente il nostro modo di vita. Per ciò che riguarda più propriamente il lato scientifico, abbiamo imparato che le forze elettriche dominano la struttura degli atomi e delle molecole e che l'elettricità è associata a molti processi biologici, per esempio al funzionamento dei nervi e del cervello.

### 22.1. Corpi elettrizzati

Cominciamo col descrivere un semplice esperimento. Strofiniamo una bacchetta di vetro con un panno di seta e poi collochiamola in una staffa orizzontale sospesa a un filo di seta. Strofiniamo quindi una seconda bacchetta di vetro e avviciniamola alla prima. Possiamo osservare che le due bacchette *si respingono*. Ripetiamo l'esperimento con due bacchette di plastica strofinate con un foglio di carta. Le due bacchette si respingono come le precedenti bacchette di vetro (Fig. 22.1).

Infine strofiniamo una bacchetta di vetro con un panno di seta e una bacchetta di plastica con un foglio di carta; poi collochiamo una delle due bacchette nella staffa e avviciniamo l'altra. Le due bacchette *si attraggono*.

Possiamo eseguire esperimenti analoghi con altre sostanze e accade sempre che corpi della stessa sostanza, «elettrizzati» con lo stesso procedimento, si respingono. I corpi elettrizzati possono attrarsi oppure



**Fig. 22.1.** Due bacchette di plastica elettrizzate si respingono quando vengono avvicinate. Questa fotografia è stata ottenuta con una lunga esposizione, mentre una bacchetta veniva avvicinata all'altra. La forza repulsiva ha allontanato l'estremo vicino della

respingersi e sono suddivisi in due gruppi: il gruppo dei corpi che si comportano come la bacchetta di vetro e il gruppo di quelli che si comportano come la bacchetta di plastica. Secondo la consuetudine che risale a Benjamin Franklin si dice che la bacchetta di vetro e tutti gli altri corpi elettrizzati che la respingono sono *carichi positivamente*, mentre la bacchetta di plastica e tutti gli altri corpi elettrizzati che la respingono sono *carichi negativamente*. In generale ogni corpo carico positivamente attrae un corpo carico negativamente. I termini *positivo* e *negativo* derivano dal fatto che le forze esercitate su un dato oggetto da parte di corpi vicini, uno carico positivamente e l'altro negativamente, tendono ad annullarsi.

Quando l'atmosfera è molto secca, i corpi possono elettrizzarsi spontaneamente. Per esempio, una persona che striscia su un sedile di plastica di un'automobile o cammina su certi tappeti può elettrizzarsi. Se poi tocca la maniglia metallica di una porta, tra le dita della persona e la maniglia può scoccare una scintilla. I panni estratti da un'asciugatrice sono di solito carichi elettricamente poiché l'aria all'interno dell'asciugatrice è alla fine del ciclo di asciugatura molto secca.

### Quesiti

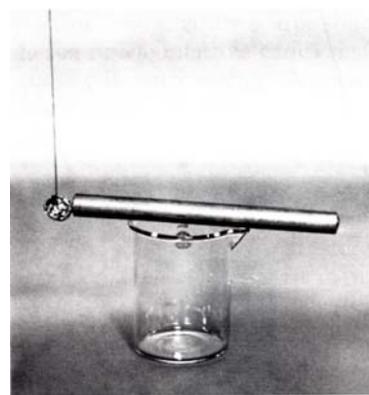
- 22.1. Se due bacchette cariche si respingono, che cosa si può dire del segno della carica su ciascuna bacchetta?
- 22.2. Supponete di avere quattro corpi carichi, *A*, *B*, *C* e *D*. *A* respinge *B*, *A* attrae *C*, e *C* respinge *D*. Se sapete che *D* è carico positivamente, quale tipo di carica ha *B*?

### 22.2. Alcuni esperimenti con corpi carichi e corpi scarichi

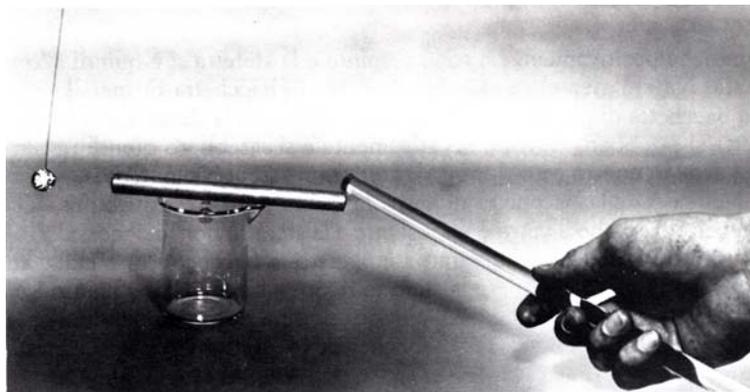
I semplici esperimenti descritti nel paragrafo precedente illustrano qualitativamente come interagiscono due corpi elettrizzati. In che modo però un corpo carico elettricamente interagisce con un corpo scarico? Supponiamo di sospendere una sferetta leggera rivestita di metallo (per es. stagnola) a un filo di nylon e di appoggiare poi una bacchetta metallica sul bordo di un becher in modo che una estremità della

**Fig. 22.2.**

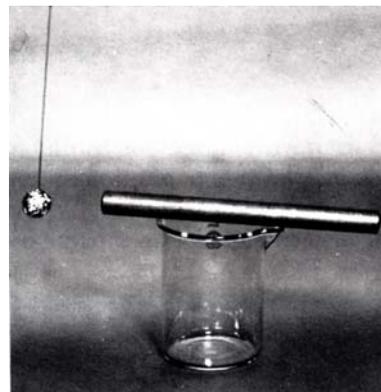
- (a) Una bacchetta metallica appoggiata su un becher è a contatto con una sferetta leggera rivestita di metallo.
- (b) Quando l'estremo della bacchetta di metallo viene toccato con una bacchetta carica, la sferetta all'altro estremo viene respinta.
- (c) Dopo che la bacchetta carica è stata allontanata, la bacchetta di metallo continua a respingere la sferetta.



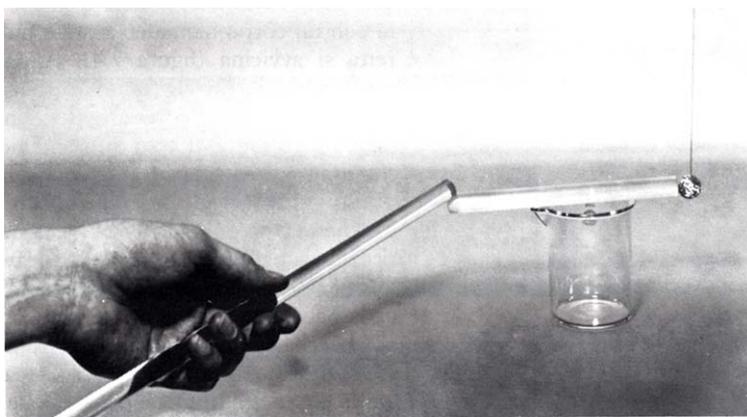
(a)



(b)



(c)



**Fig. 22.3.** Ripetiamo l'esperimento con una bacchetta di vetro al posto di quella di metallo. La sferetta rimane a contatto con la bacchetta di vetro.

bacchetta tocchi la sferetta come è illustrato nella Fig. 22.2(a). Elettrizziamo poi una bacchetta di vetro e tocchiamo l'altra estremità della bacchetta di metallo. Quando tocchiamo il vetro contro il metallo, la sferetta si allontana come è illustrato nella Fig. 22.2(b). Quando allontaniamo la bacchetta di vetro, la sferetta continua a essere respinta dalla bacchetta di metallo come è illustrato nella Fig. 22.2(c).

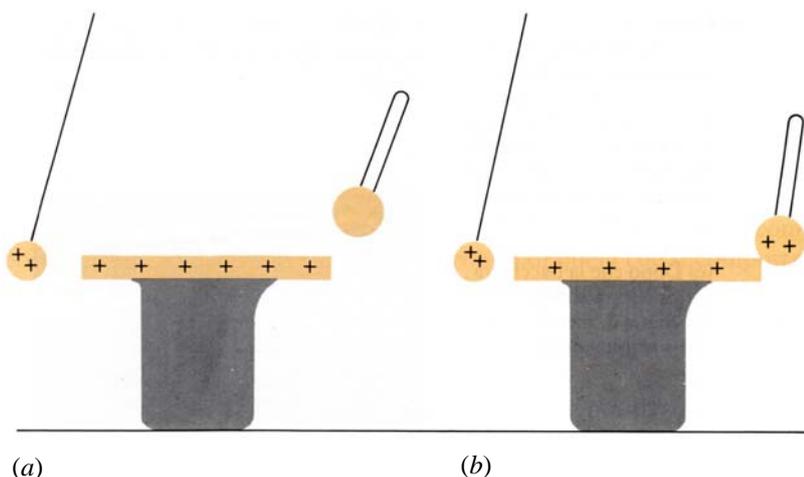
Ripetiamo l'esperimento usando una bacchetta di vetro scarica al posto della bacchetta di metallo. In questo caso la sferetta non si allontana (Fig. 22.3). Dunque possiamo osservare che la bacchetta di vetro e la bacchetta di metallo agiscono in modo diverso. Le sostanze che si comportano come si è comportato il metallo in questo esperimento sono dette *conduttori*, mentre le sostanze che si comportano come il vetro sono dette *isolanti*.

Come possiamo interpretare ciò che è avvenuto nei precedenti esperimenti? Nel caso della bacchetta di metallo la carica positiva è passata dalla bacchetta di vetro alla bacchetta di metallo e si è distribuita immediatamente su di essa e sulla sferetta. La sferetta e la bacchetta, entrambe cariche positivamente, si sono respinte e la sferetta si è quindi allontanata. Naturalmente, se avessimo toccato la bacchetta di metallo con una bacchetta di plastica carica negativamente, sia la sferetta che la bacchetta si sarebbero caricate negativamente e si sarebbero quindi respinte. Anche in questo caso dunque la sferetta si sarebbe allontanata.

Nel caso della bacchetta di vetro la carica non si è distribuita sulla bacchetta dato che il vetro è un isolante e la sferetta non si è mossa. Proprio per questo motivo abbiamo appoggiato la bacchetta di metallo su un becher di vetro e sospeso la sferetta ricoperta di metallo a un filo isolante di nylon. In questo modo la carica non ha potuto abbandonare la bacchetta attraverso il becher né ha potuto lasciare la sferetta attraverso il filo.

Consideriamo, come prima, una bacchetta di metallo montata su un sostegno isolante e supponiamo che la bacchetta sia a contatto con una sferetta rivestita di metallo sospesa a un filo isolante di nylon. Se carichiamo la bacchetta, la sferetta si allontana; se poi tocchiamo la bacchetta con un corpo metallico scarico e dotato di un manico isolante la sferetta si avvicina (Fig. 22.4). Apparentemente, toccandola, abbiamo asportato dalla bacchetta una certa quantità di carica che si è suddivisa tra la bacchetta e il corpo. Se ripetiamo l'esperimento con un corpo metallico più grande dotato di un manico isolante, possiamo notare che la sferetta si avvicina ancora di più alla bacchetta di metallo.

Lo stesso accade se colleghiamo per mezzo di un filo metallico la bacchetta a un grande oggetto di metallo; una parte della carica si trasferisce dalla bacchetta all'oggetto attraverso il filo conduttore. Se



**Fig. 22.4.**

(a) Una bacchetta di metallo carica positivamente e una sferetta sospesa rivestita di metallo si respingono mutuamente.

(b) Tocchiamo la bacchetta con una sfera grande di metallo, scarica, dotata di un manico isolante. La carica si suddivide tra la sfera di metallo e la bacchetta e la sferetta si avvicina alla bacchetta.

l'oggetto metallico è molto grande, quasi tutta la carica si trasferisce su di esso e nella bacchetta rimane una carica così piccola che la sferetta si avvicina alla bacchetta fino a toccarla e a perdere la propria carica. Il più grande oggetto disponibile per ripartire la carica è la Terra e quando colleghiamo la bacchetta di metallo carica alla Terra, quasi tutta la carica abbandona la bacchetta e su di essa ne resta troppo poca per essere rivelabile facilmente. (Il procedimento di ripartizione della carica con la Terra è detto *messa a terra* <sup>(\*)</sup>.)

Se caricate la bacchetta di metallo e poi la toccate con un dito, la sferetta sospesa torna vicino alla bacchetta. Questo significa che se la bacchetta aveva inizialmente un eccesso di carica negativa, la maggior parte di questa carica si è trasferita nel vostro corpo e lo ha attraversato trasferendosi probabilmente alla Terra.

Anche se le vostre scarpe sono isolanti, la bacchetta perde quasi tutta la sua carica, infatti la carica si suddivide tra la bacchetta, la sferetta sospesa e il vostro corpo. Da questo esperimento, traiamo la conclusione che il corpo umano è un conduttore elettrico.

Ora siamo in grado di determinare quali sostanze sono conduttori e quali no. Per esempio, supponete di caricare la bacchetta di metallo un'altra volta e poi di toccarla con un pezzetto di grafite, come ad esempio la punta di una matita. La bacchetta perde immediatamente la sua carica, mostrando così che la grafite è anch'essa un conduttore. D'altra parte, non accade nulla se tocchiamo la bacchetta con un pezzo di vetro scarico, di gomma dura, di porcellana, o di plastica: queste sostanze sono tutte isolanti elettrici. Se tocchiamo un'estremità con un fiammifero di legno, la bacchetta perde carica, ma molto poca: sembra quindi che la carica elettrica si possa muovere anche nel legno, ma non così liberamente come nei metalli; il legno offre dunque una «resistenza» molto maggiore dei metalli al moto della carica elettrica.

### Quesiti

**22.3.** Supponete di toccare la sferetta della Fig. 22.2(c) con una bacchetta di metallo che tenete in mano. Che cosa prevedete che accadrà?

**22.4.** Quando il serbatoio della benzina di un aeroplano viene riempito, l'ugello di metallo della manichetta viene sempre collegato accuratamente al metallo dell'aeroplano con un filo conduttore prima che l'ugello stesso venga inserito nel serbatoio. Che scopo ha secondo voi questo procedimento?

### 22.3. Induzione elettrostatica

Non è necessario toccare un conduttore per determinare su di esso un trasferimento di carica. Per dimostrare questa affermazione prendiamo due bacchette di metallo montate su sostegni isolanti e mettiamole a contatto formando un unico lungo conduttore come nelle Figg. 22.5(a) e 22.6(a).

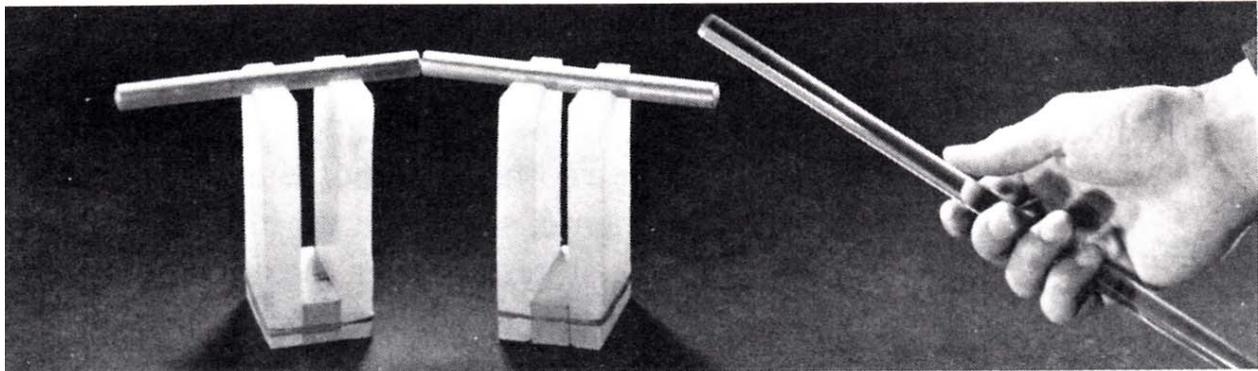
Avviciniamo poi una bacchetta di vetro carica positivamente a una delle estremità del conduttore. La carica positiva della bacchetta di vetro attrae la carica negativa del conduttore e respinge quella positiva. Di conseguenza l'estremità del conduttore vicino alla bacchetta acquista un eccesso di carica negativa, mentre l'estremità lontana si carica positivamente. Separiamo poi le due bacchette di metallo allontanando i sostegni isolanti senza spostare la bacchetta di vetro carica positivamente come è illustrato nella Fig. 22.5(b). La bacchetta vicina a questa dovrebbe avere carica negativa e la bacchetta lontana dovrebbe invece essere carica positivamente come si può vedere nella Fig. 22.6(b).

Possiamo verificare questa conclusione allontanando la bacchetta di vetro (Fig. 22.6(c)) e avvicinando una sferetta leggera, carica positivamente, sospesa a un filo. Si può osservare che la bacchetta vicina attrae la sferetta carica positivamente, come è illustrato nella Fig. 22.5(c), mentre quella lontana la respinge.

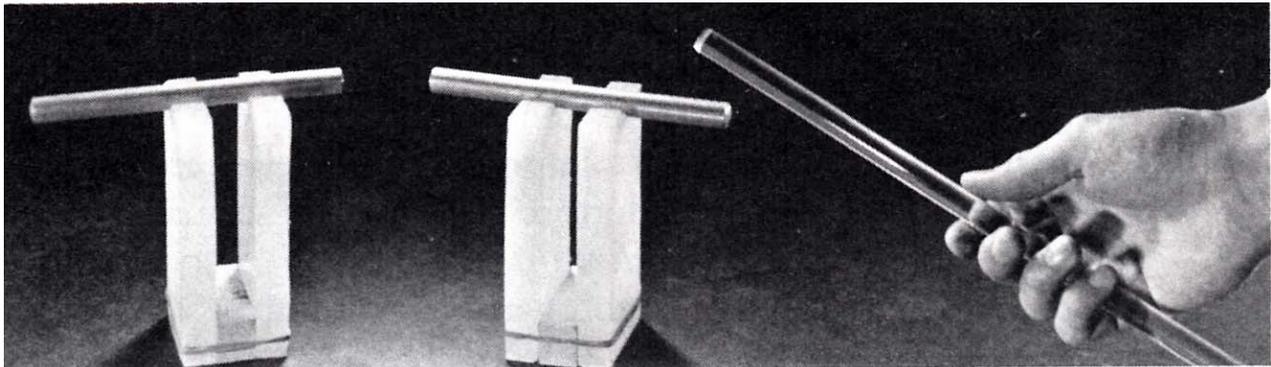
Se si rimettono nuovamente a contatto le due bacchette, non si rileva alcuna carica né a una estremità né all'altra. Le cariche positive e le cariche negative che erano state separate ora si annullano mutuamente in ogni punto delle due bacchette. Si dice allora che le bacchette sono neutre, come erano prima che iniziasse l'esperimento.

La separazione della carica positiva e della carica negativa su un conduttore causata dalla vicinanza di un corpo carico è chiamata *induzione elettrostatica* e le cariche positive e negative che si accumulano su

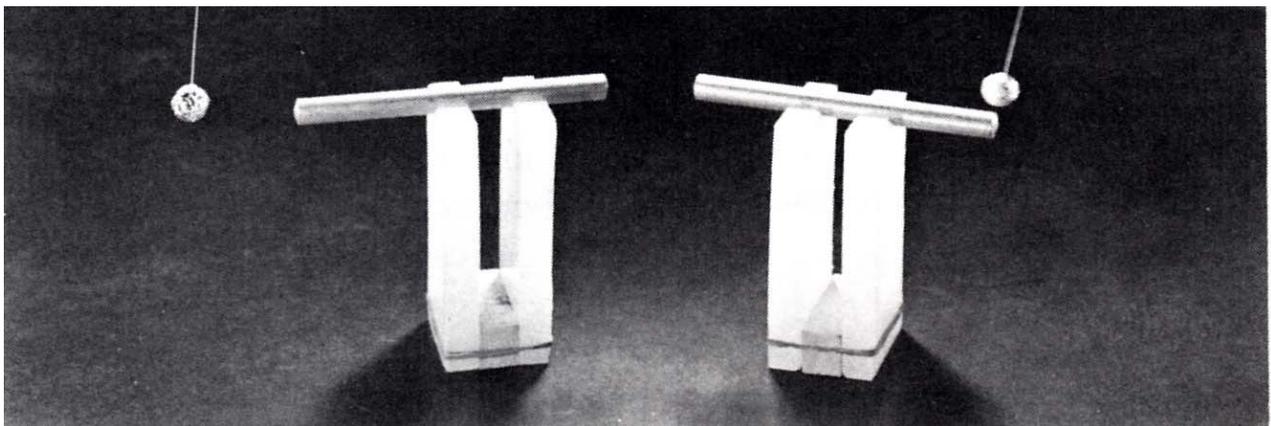
<sup>(\*)</sup> La Terra ha alcune zone non conduttrici (sabbia del deserto, alcune rocce, ecc.), ma sottoterra c'è materiale conduttore sufficiente a distribuire la carica rapidamente in tutta la Terra. Spesso si usa un tubo di metallo, come una conduttura dell'acqua, per assicurare il collegamento elettrico con la zona conduttrice sotterranea.



(a)



(b)



(c)

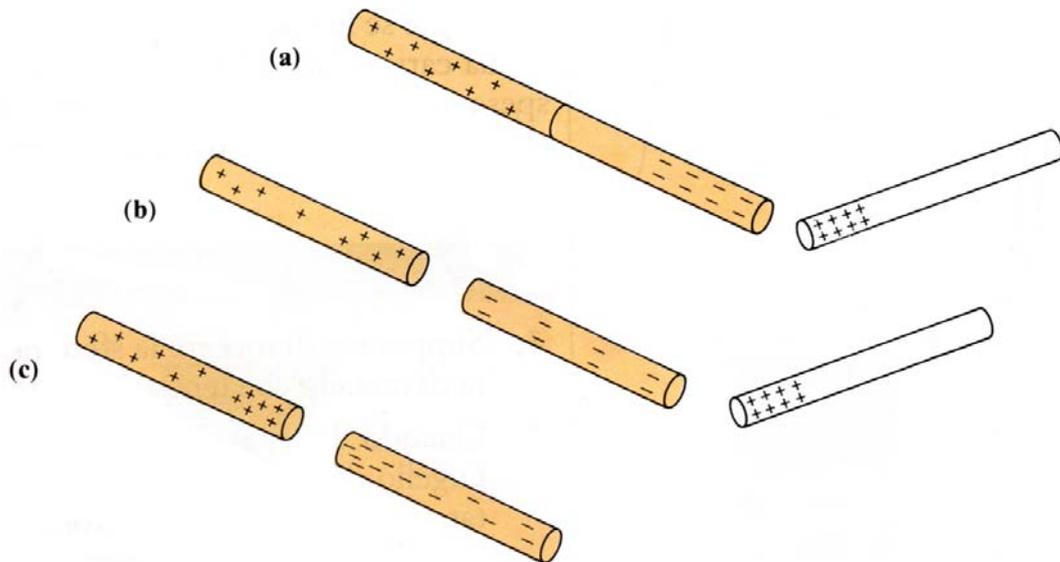
**Fig. 22.5.** Induzione elettrostatica. (a) Bacchette di metallo a contatto; carica positiva vicina. (b) Le bacchette vengono separate. (c) Verifichiamo il segno della carica portata da ciascuna bacchetta con una sferetta carica positivamente. La bacchetta di sinistra respinge la sferetta: è carica positivamente. La bacchetta di destra attrae la sferetta: è carica negativamente.

differenti parti del conduttore sono dette *cariche indotte*.

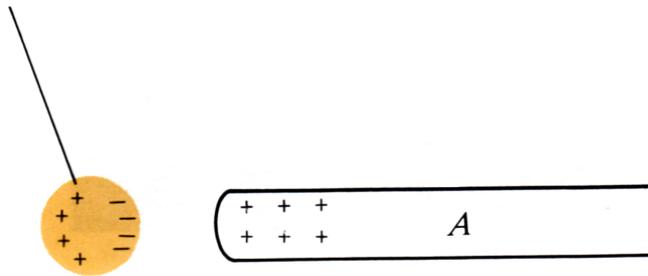
Il fenomeno dell'induzione elettrostatica permette di spiegare la forza attrattiva esercitata da un corpo elettrizzato su un conduttore neutro. Supponiamo che la bacchetta elettrizzata  $A$  nella Fig.22.7 sia carica positivamente.

Essa indurrà una carica negativa sulla parte della sferetta che è più vicina alla bacchetta e una carica positiva sulla parte che è più distante dalla bacchetta.

La carica negativa indotta viene attratta verso la carica positiva di  $A$ , mentre la carica positiva viene respinta. È importante notare che la repulsione è più debole dell'attrazione, perché la carica positiva indotta è più lontana da  $A$  della carica negativa; sulla sferetta si esercita quindi una forza risultante che l'attrae verso  $A$ .

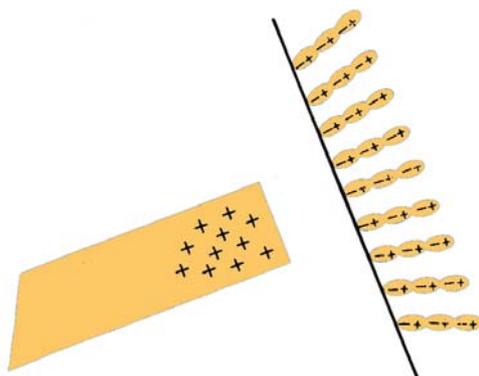


**Fig. 22.6.** Induzione elettrostatica. (a) Due bacchette di metallo sono a contatto; in prossimità c'è un corpo carico positivamente. Le cariche negative si muovono verso destra, lasciando una carica positiva a sinistra. (b) Le bacchette vengono separate mentre il corpo carico è ancora in prossimità. Quella di destra ha una carica negativa e quella di sinistra ha una carica positiva. (c) Le bacchette conservano le loro cariche anche quando il corpo carico è stato allontanato.



**Fig. 22.7.** Attrazione di un conduttore neutro. Quando un conduttore neutro è collocato vicino a un corpo carico positivamente, la carica negativa del conduttore si muove verso il lato vicino al corpo. Nel resto del conduttore rimane una carica positiva. Poiché la carica negativa indotta è più vicina al corpo, positivo, si genera una forza risultante attrattiva.

Esiste anche una forza di attrazione simile, ma più piccola, fra un isolante neutro e una carica ad esso vicina. In un isolante, sia la carica positiva sia quella negativa non possono subire grossi spostamenti. Per esempio, possiamo immaginare che in un isolante la carica positiva sia fissa e che la carica negativa sia tenuta vicino a quella positiva da forze elastiche. Le forze elastiche fanno sì che la carica negativa non si allontani troppo, ma quando avviciniamo all'isolante un corpo carico positivamente, la carica negativa viene attratta verso di esso. Di conseguenza, tale carica si allontana un po' da quella positiva avvicinandosi al corpo che esercita l'attrazione (Fig. 22.8). Poiché la carica negativa è un po' più vicina della corrispondente carica positiva al corpo carico positivamente, la forza di attrazione su essa è un po' maggiore della repulsione esercitata sulla carica positiva: ne consegue una forza risultante attrattiva fra l'isolante e il corpo carico positivamente.



**Fig. 22.8.** Attrazione di un isolante neutro. Un oggetto carico positivamente si trova vicino a un isolante neutro. Negli isolanti non vi sono cariche elettriche libere di muoversi: le cariche positive e negative di ciascuna molecola possono allontanarsi di poco. Le cariche negative sono così tutte un po' più vicine alla carica positiva, dando luogo anche in questo caso ad una forza risultante attrattiva. In realtà le molecole sono estremamente piccole e così pure le cariche: lo schizzo non è realistico.

## Quesiti

---

- 22.5.** Tenete un pettine di plastica vicino ad alcuni pezzetti di carta posti su un tavolo. Non accade nulla. Poi fate scorrere alcune volte il pettine attraverso i capelli e avvicinatelo ai pezzetti di carta. Questa volta i pezzetti di carta «balzano» sul pettine. Spiegate queste osservazioni.
- 22.6.** Che cosa prevedete che accada se ripetete il procedimento descritto nel quesito 22.5 usando un pettine di metallo al posto di quello di plastica?
- 22.7.** Avete due sferette di metallo dello stesso diametro, montate su sostegni isolanti, una striscia di plastica e un foglio di carta. Descrivete ciò che fareste per conferire alle due sferette cariche elettriche uguali (a) dello stesso segno, (b) di segni opposti.
- 22.8.** Supponete di avvicinare una bacchetta carica negativamente a una sferetta conduttrice leggera sospesa a un filo. La sferetta si avvicina alla bacchetta. Che cosa siete in grado di dire riguardo alla carica sulla sferetta?
- 22.9.** Supponete di tenere in mano una bacchetta di metallo e di avvicinare una estremità della bacchetta a una sferetta carica positivamente sospesa a un filo isolante.
- (a) Che cosa vi attendete di osservare?
- (b) Come spiegate questa osservazione?
- 

## 22.4. Un modello per la carica elettrica

Cominciamo a costruire un modello che correli i fenomeni elettrici osservati finora. Anzitutto, è naturale pensare che la forza che si esercita fra due corpi sia la somma vettoriale delle forze che agiscono fra le loro parti costituenti. Poiché due oggetti elettrizzati si attraggono o si respingono mutuamente, facciamo l'ipotesi che esistano analoghe forze di attrazione o di repulsione fra le parti costituenti gli oggetti stessi. Poiché esistono oggetti elettricamente positivi ed elettricamente negativi, supponiamo che le parti contengano due tipi di particelle: particelle *elettricamente positive* e particelle *elettricamente negative*. Due particelle dello stesso segno si respingono e due particelle di segno opposto si attraggono.

Quando normali pezzi di materiali «scarichi» vengono collocati uno vicino all'altro, fra loro non si esercitano forze elettriche apprezzabili. Ciò non significa che si debba abbandonare l'idea che nella materia esistono particelle elettriche positive e negative: poiché una particella positiva e una particella negativa esercitano forze aventi la stessa direzione ma verso opposto su una terza particella carica, ciò significa solo che le forze esercitate dai due tipi di particelle possono annullarsi. Se ogni piccolo volume di un corpo è neutro, la forza risultante esercitata da tutte le particelle elettriche in esso contenute su ogni altra particella elettrica situata all'esterno è nulla. Però, un corpo può essere neutro in media e ciò nonostante contenere concentrazioni locali di carica. In questo caso una particella elettrica vicina a una delle concentrazioni locali è soggetta a una forza.

Aggiungendo alcune particelle positive a un oggetto elettricamente neutro, non c'è più equilibrio: l'effetto delle particelle positive è maggiore di quello delle particelle negative; si dice allora che l'oggetto è carico positivamente. Si può anche caricare positivamente un oggetto togliendo alcune particelle negative e lasciando quindi un eccesso di quelle positive. In maniera analoga, si può rendere elettricamente negativo un oggetto neutro aggiungendo ad esso alcune particelle negative oppure togliendo ad esso alcune particelle positive.

Si è visto che una bacchetta di vetro strofinata con un tessuto di seta diventa elettricamente positiva. Come può accadere ciò? Possiamo immaginare due possibilità: o un trasferimento di particelle positive dalla seta alla bacchetta, o un trasferimento di particelle negative dalla bacchetta alla seta.

In entrambi i casi, la seta deve diventare elettricamente negativa. Si può controllare questa conclusione avvicinando la seta alla bacchetta di vetro sospesa: si trova che la bacchetta è attratta dalla seta. Inoltre, la seta respingerà una bacchetta di plastica carica negativamente.

Per spiegare la differenza fra conduttori e isolanti basta ipotizzare che in un metallo alcune particelle elettriche siano libere di spostarsi da punto a punto, e che invece nella plastica nessuna particella elettrica possa spostarsi liberamente. Supponete, per esempio, che le particelle libere nel metallo siano negative. Quando il vetro carico positivamente tocca la bacchetta di metallo neutra come nel caso illustrato in Fig. 22.2(b), il vetro sottrae alla bacchetta ed alla sferetta di metallo alcune particelle negative libere. Perciò, sia la sferetta sia la bacchetta si caricano positivamente e quindi si respingono. Anche dopo avere allontanato il

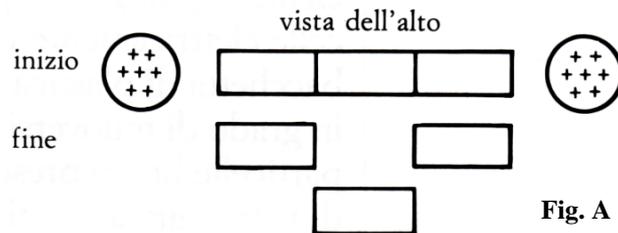
vetro, vi sarà una deficienza di particelle negative sia sulla bacchetta sia sulla sferetta, ed esse continueranno a respingersi, come in Fig. 22.2(c).

In maniera altrettanto ragionevole si può ipotizzare che le particelle libere siano elettricamente positive. In questo caso, quando si tocca la bacchetta metallica con il vetro elettrizzato, delle particelle positive passeranno dal vetro nel metallo e si distribuiranno lungo esso fino alla sferetta. Anche in questo caso, la bacchetta e la sferetta si caricheranno entrambe positivamente e si respingeranno.

Descriviamo ora che cosa accade quando si sostituisce la bacchetta di metallo con quella di plastica. Nella plastica né le particelle positive né quelle negative possono muoversi liberamente, per cui solo la parte di bacchetta che è a diretto contatto con il vetro carico acquista un eccesso di particelle positive; il resto della bacchetta rimane elettricamente neutro, e così pure la sferetta, di conseguenza non si esercita alcuna forza che allontani la sferetta dalla bacchetta. È necessario mettere in evidenza che fino ad ora nella nostra discussione non abbiamo la possibilità di decidere se, durante questi esperimenti, si muovono solamente cariche positive, solamente cariche negative, o entrambe.

## Quesiti

- 22.10.** Nell'elettrizzare un corpo, possiamo aggiungere o sottrargli cariche negative, oppure possiamo aggiungere o sottrargli cariche positive. Quali procedimenti caricano il corpo negativamente?
- 22.11.** Si devono sottrarre tutte le cariche negative a una bacchetta affinché essa diventi carica positivamente?
- 22.12.** Tre blocchi di metallo a contatto poggiano su una tovaglia di plastica, come è illustrato nella Fig. A. Collocate due corpi con intense cariche positive, uno a ciascun estremo della fila di blocchi, in prossimità, ma non a contatto, dei blocchi. Separate poi i blocchi con una bacchetta isolante (scarica) mentre i corpi con cariche positive intense sono mantenuti vicini. Infine allontanate i due corpi carichi positivamente.



(a) Che carica c'è ora su ciascun blocco?

(b) Usando il modello per la carica elettrica, spiegate come i blocchi hanno acquistato queste cariche.

## 22.5. Batterie

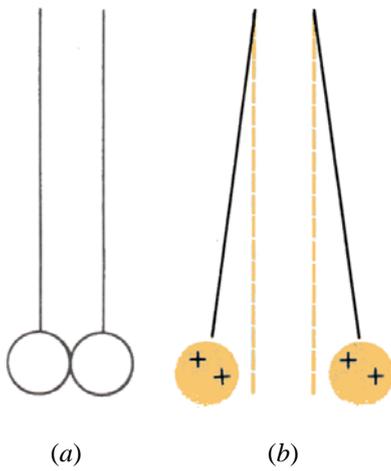
Strofinare insieme due oggetti, come una bacchetta di plastica e un panno di lana, non è il solo metodo per separare particelle elettricamente positive da particelle elettricamente negative. Le batterie e gli altri generatori elettrici sono in realtà macchine per separare le cariche.

Ricopriamo due sfere uguali, piccole e leggere, con materiale conduttore e sospendiamo, l'una vicino all'altra, per mezzo di un sottile filo isolante in modo che si tocchino appena. Colleghiamo un filo metallico ad un polo di una batteria fatta di un numero sufficiente di elementi, e tocchiamo con l'estremità libera del filo metallico le sfere sospese: esse evidentemente si caricano, visto che si respingono reciprocamente ed i fili ai quali sono sospese formano fra loro un certo angolo (Fig. 22.9).

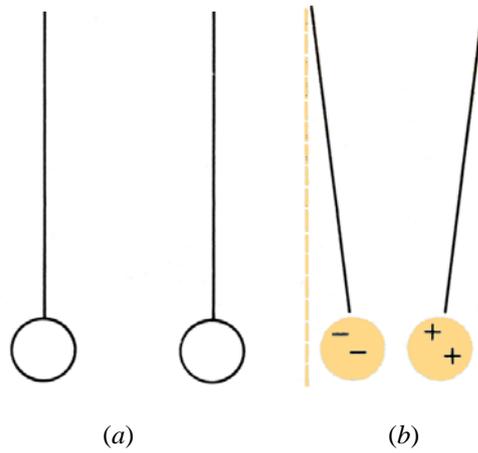
Possiamo controllare il segno della carica presente sulle sfere facendo una prova con un corpo di carica nota. Per esempio, se le sfere sono state toccate con un filo metallico collegato al polo positivo di una batteria, vengono respinte da una bacchetta di vetro carica, quindi hanno carica positiva.

Ora sospendiamo le due sfere in modo che vi sia un po' di spazio fra di loro, poi tocchiamo una sfera con un filo metallico collegato al polo positivo della batteria e l'altra con un filo metallico collegato al polo negativo: le sfere si avvicinano (Fig. 22.10).

Se le due sfere si avvicinano abbastanza da toccarsi, perdono la loro carica e tornano alla loro posizione iniziale e i fili ai quali sono appese tornano verticali. A quanto pare, le cariche prodotte su ciascuna



**Fig. 22.9.** (a) Due sfere leggere, con lo stesso diametro, ricoperte di uno strato conduttore, vengono appese in modo che si tocchino appena. (b) Dopo essere state toccate con un filo metallico collegato ad un polo di una grossa batteria, le sfere si allontanano.

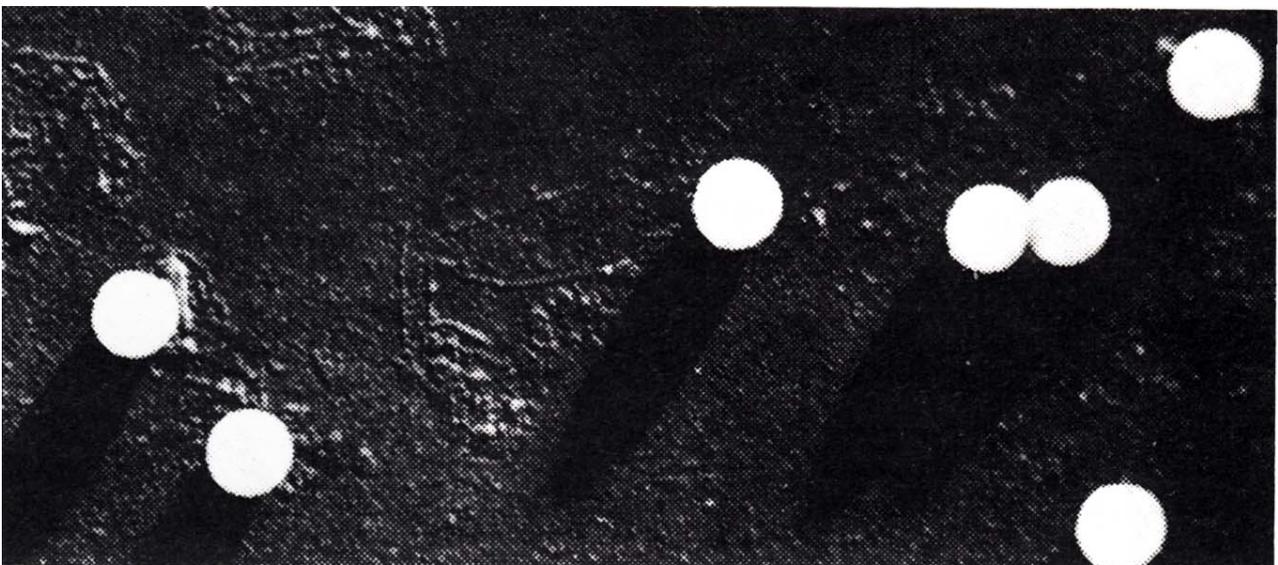


**Fig. 22.10.** (a) Due sfere coperte di uno strato conduttore e scariche vengono appese in modo che rimangano separate. (b) Si attraggono fra loro, dopo che una è stata collegata al polo positivo di una grossa batteria, e l'altra al polo negativo.

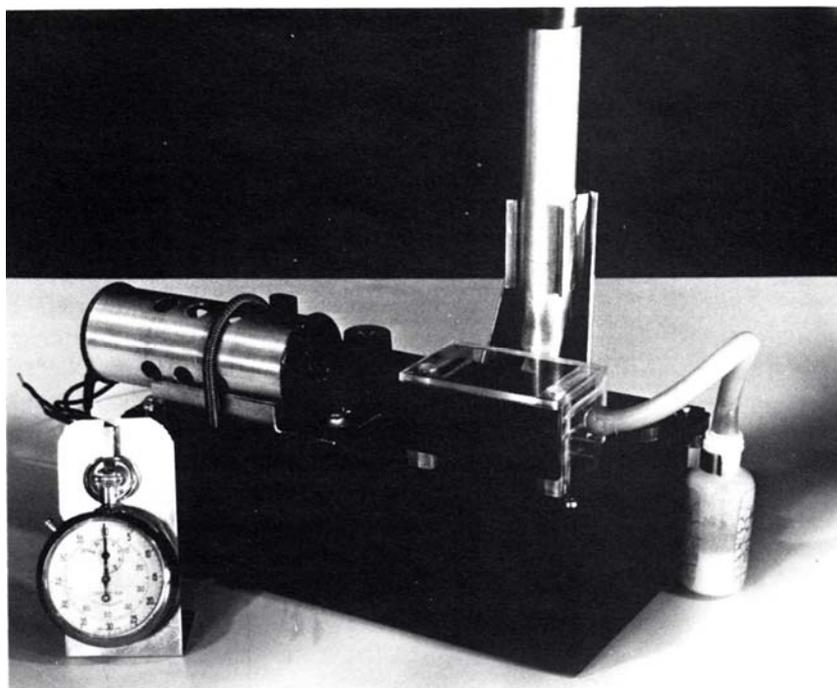
delle sfere avevano lo stesso valore; infatti, dopo essersi toccate, le sfere ritornano neutre.

Una batteria è quindi un dispositivo che, utilizzando reazioni chimiche, mantiene cariche positive su di un polo e cariche negative sull'altro, nonostante che le forze di attrazione elettrica tendano a riunire queste cariche. Quando si tocca un polo di una batteria con una sfera, su di essa si accumulano rapidamente delle cariche; dopo breve tempo, le forze elettriche che spingono le cariche indietro verso il polo della batteria, compensano le forze esercitate dall'azione chimica che tendono a portare le cariche fuori dalla batteria.

Durante questo intervallo di tempo le sfere si sono caricate, e le cariche elettriche si sono mosse attraverso il filo metallico collegato con la batteria. Un tale flusso di carica elettrica viene chiamato corrente elettrica. Le correnti elettriche hanno molte e diverse proprietà (alcune delle quali studieremo più avanti), come riscaldare il filo metallico attraverso il quale passano. Si possono costruire alcuni strumenti per rivelare questi effetti, e quindi le correnti elettriche possono essere misurate.



**Fig. 22.11.** Fotografia al microscopio elettronico di alcune sferette di plastica ingrandite circa 4000 volte.



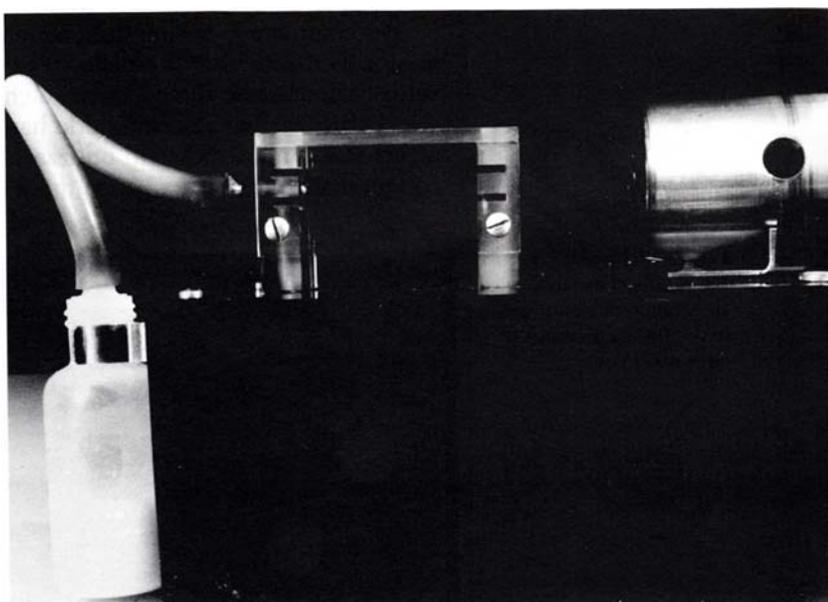
**Fig. 22.12.** La bottiglietta di plastica viene premuta per costringere le sferette di plastica a risalire il tubicino e a penetrare nello spazio tra le due lamine metalliche. Una sorgente di luce intensa, nel centro della fotografia, illumina le sferette in modo da renderle visibili attraverso il microscopio verticale.

## 22.6. Misura di piccole forze elettriche

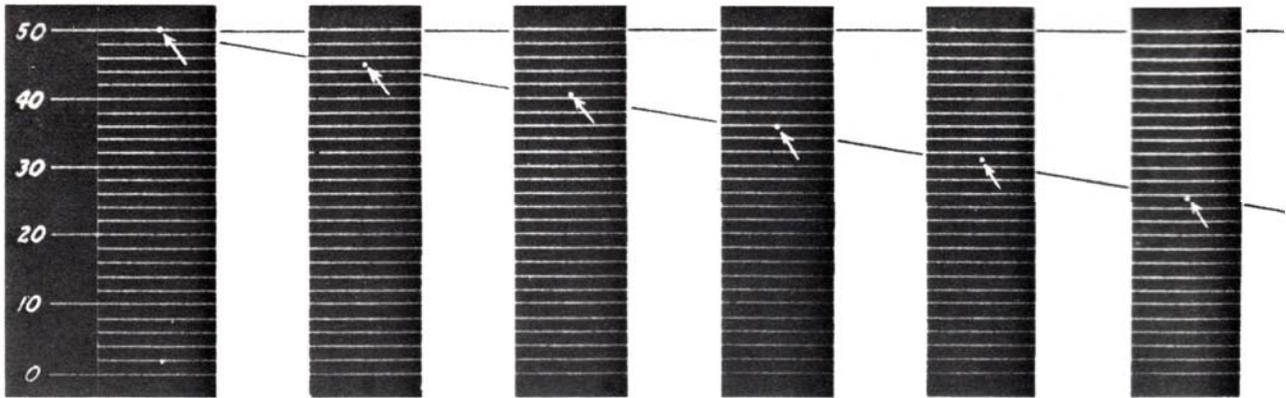
Abbiamo costruito un modello per la carica elettrica supponendo che porzioni di materia ordinaria contengano numeri uguali di particelle positive e negative, e con questo modello siamo riusciti a spiegare tutte le osservazioni che abbiamo fatto finora negli esperimenti sull'elettricità. Possiamo tuttavia notare che un modello che rappresenti la carica elettrica come due differenti tipi di fluido spiegherebbe altrettanto bene queste osservazioni. Una prova fondamentale a favore del modello corpuscolare sarebbe l'esistenza di «atomi» di elettricità, cioè di particelle cariche dotate della stessa quantità di carica. Per potere ricercare tali particelle dobbiamo prima imparare a misurare le piccole forze che si possono esercitare su di esse; fatto questo saremo poi in grado di usare le forze per misurare la carica elettrica.

Per compiere le misure dobbiamo disporre di oggetti che siano tanto grandi da essere visibili e nello stesso tempo tanto piccoli da muoversi sotto l'azione delle forze elettriche che esercitiamo sulle particelle cariche. I corpi visibili a occhio nudo hanno una massa troppo grande per i nostri scopi, ma si possono utilizzare sferette microscopiche di plastica con un diametro di circa  $10^{-6}$  m (Fig. 22.11).

Benché esse siano abbastanza grandi da essere visibili come macchie luminose in un microscopio ottico, la massa di ciascuna è soltanto circa  $10^{-15}$  kg. Queste sferette vengono fabbricate per la taratura delle



**Fig. 22.13.** Vista ravvicinata delle lamine metalliche. Il microscopio è stato tolto per mostrare più chiaramente le lamine.



**Fig. 22.14.** Fotografie di una sferetta di plastica attratta verso il basso dalla forza gravitazionale, eseguite attraverso un microscopio a intervalli di 1 s. Le sferette, cadendo, percorrono all'incirca lo stesso spazio in ogni intervallo di tempo davanti a un reticolo la cui lunghezza totale è lievemente maggiore di 1 mm.

lunghezze osservate al microscopio elettronico; viene a questo scopo utilizzato un gran numero di sferette quasi identiche.

Studieremo il moto di queste sferette con l'apparecchio illustrato nelle Figg. 22.12 e 22.13. Se sulle lamine metalliche non vi è carica, le sferette si muovono piuttosto lentamente. Osservandole, vediamo che cadono a velocità costante (Fig. 22.14): a quanto pare, hanno raggiunto la loro velocità limite di caduta (vedi paragrafo 11.3 a pag. 149).

Usando le informazioni fornite nella didascalia della Fig. 22.15, possiamo determinare tale velocità, che risulta:

$$v = \frac{\text{spazio percorso}}{\text{tempo}} = \frac{12/25 \times 1 \text{ mm}}{5 \text{ s}} = 0.96 \times 10^{-4} \text{ m/s} \quad [22.1]$$

Quando le sferette vengono introdotte attraverso il tubicino nello spazio fra le lamine, molte di esse si elettrizzano, alcune positivamente e altre negativamente.

Perciò, se le lamine metalliche sono cariche, sulle sferette cariche si esercita una forza elettrica che si somma alla forza gravitazionale. La forza *motrice*  $\mathbf{F}_s$  sarà la risultante della forza gravitazionale e della forza elettrica:

$$\mathbf{F}_s = \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_e. \quad [22.2]$$

La forza motrice può essere diretta verso il basso o verso l'alto e ciò dipende dal modulo, dalla direzione e dal verso della forza elettrica.

I dati sperimentali indicano che le sferette raggiungono una velocità limite di caduta anche in presenza di una forza elettrica, quindi la forza elettrica tra le lamine è costante come la forza gravitazionale.

Cerchiamo ora la relazione tra la forza motrice e la velocità limite che ne risulta. Supponiamo che la forza motrice sia il quadruplo della forza gravitazionale e chiediamoci quale effetto avrà sulla velocità limite. Dato che il peso delle sferette è circa  $2.8 \times 10^{-14}$  N, l'intensità della forza motrice sarà:

$$F_s = 4 \times 2.8 \times 10^{-14} \text{ N} = 11.2 \times 10^{-14} \text{ N} \quad [22.3]$$

La forza *risultante*  $\mathbf{F}$  è la somma della forza motrice e della resistenza dell'aria:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_s + \mathbf{F}_a. \quad [22.4]$$

L'intensità della forza risultante sarà allora:

$$F = 11.2 \times 10^{-14} \text{ N} - 2.9 \times 10^{-10} \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}} v - 7.0 \times 10^{-13} \frac{\text{N} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^2} v^2 \quad [22.5]$$

anziché

$$F = 2.8 \times 10^{-14} \text{ N} - 2.9 \times 10^{-10} \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}} v - 7.0 \times 10^{-13} \frac{\text{N} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^2} v^2. \quad [22.6]$$

come avevamo ottenuto nel paragrafo 11.3 a pag. 149 quando la forza motrice era la sola forza gravitazionale.

Per trovare la velocità limite poniamo  $F = 0$  nella relazione [22.6]. Come abbiamo dimostrato nel paragrafo 11.3, il termine contenente  $v^2$  si può trascurare e perciò la velocità limite è:

$$v = \frac{2.8 \times 10^{-14} \text{ N}}{2.9 \times 10^{-10} \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}}} = 0.97 \times 10^{-4} \text{ m/s} \quad [22.7]$$

quando la sferetta cade sotto l'azione della sola forza gravitazionale ed è la stessa velocità che abbiamo misurato utilizzando la Fig. 22.14. Una semplice sostituzione di questo valore nella relazione [22.5] vi persuaderà che il termine contenente  $v^2$  si può trascurare anche per una forza motrice di  $11.2 \times 10^{-14}$  N. Perciò in base alla relazione [22.5], quando  $F = 0$  la velocità limite della sferetta sarà:

$$v = \frac{11.2 \times 10^{-14} \text{ N}}{2.9 \times 10^{-10} \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}}} = 3.9 \times 10^{-4} \text{ m/s} \quad [22.8]$$

pari esattamente al quadruplo della velocità limite sotto l'azione della sola forza gravitazionale.

Da queste considerazioni è evidente che per forze pari ad alcune volte la forza gravitazionale la velocità limite delle sferette è proporzionale alla forza motrice:

$$v \propto F_s. \quad [22.9]$$

Perciò possiamo usare la velocità limite come misura della forza motrice.

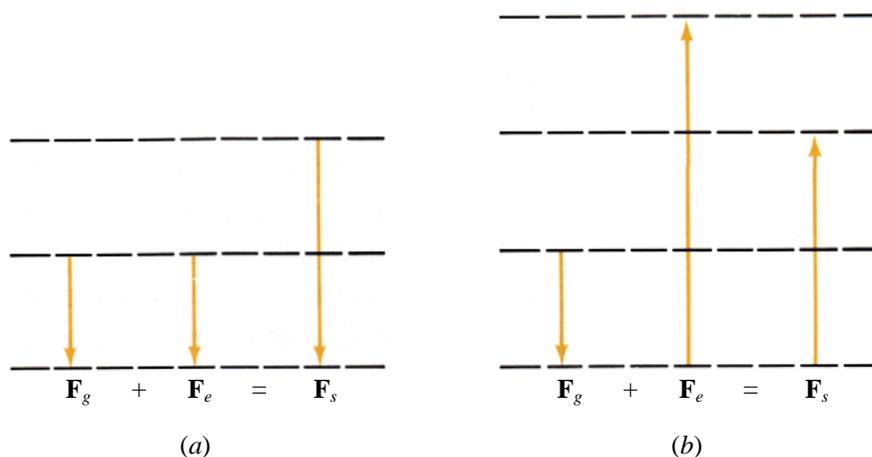
### Quesiti

- 22.13.** Nell'espressione [22.5] confrontate il termine contenente  $v$  con il termine che contiene  $v^2$  nel caso in cui  $v = 3.9 \times 10^{-4}$  m/s.
- 22.14.** Supponete di misurare la velocità delle sferette di plastica, che sono fra le piastre del dispositivo di Fig. 22.13, e di trovare che è uguale ai tre mezzi della velocità che avrebbero le sferette sotto l'influenza della sola forza di gravità. Il peso di una sferetta è  $2.8 \times 10^{-14}$  N.
- (a) Qual è la forza elettrica esercitata su di esse, se si muovono verso l'alto?
- (b) E se si muovono verso il basso?

### 22.7. La carica elettrica elementare

Supponiamo di collocare parecchie sferette come quelle della Fig. 22.11 tra le lamine metalliche dell'apparecchio della Fig. 22.13. Quando le lamine sono scariche, non agisce alcuna forza elettrica e tutte le sferette hanno la stessa velocità limite di caduta; dato che le sferette hanno la stessa massa, la forza motrice costituita dalla forza gravitazionale è pertanto la stessa su ciascuna sferetta. D'altra parte, quando le lamine metalliche sono cariche, le velocità limite non sono più le stesse per ciascuna sferetta, in quanto in questo caso la forza motrice è dovuta in parte alla forza elettrica e in parte alla forza gravitazionale. La velocità limite è la somma della componente dovuta alla forza elettrica e di quella dovuta alla forza motrice gravitazionale.

Come esempio, supponiamo di misurare la velocità delle sferette di plastica tra le lamine metalliche



**Fig. 22.15.** La forza motrice  $F_s$  è sempre la somma vettoriale della forza gravitazionale e della forza elettrica.

dell'apparecchio della Fig. 22.13 e di trovare che è il doppio della loro velocità sotto l'azione della sola forza gravitazionale. Cerchiamo di determinare la forza elettrica che agisce su queste sferette sia quando si muovono verso il basso che quando si muovono verso l'alto. La Fig. 22.15 illustra la risoluzione per entrambi i casi ottenuta per mezzo dei vettori. La forza motrice è sempre la somma vettoriale della forza gravitazionale e della forza elettrica.

L'intensità della forza motrice  $F_s$  è proporzionale alla velocità limite e perciò deve essere pari al doppio della forza gravitazionale. Poiché il peso della sferetta è  $2.8 \times 10^{-14}$  N, in base alla somma vettoriale nel caso del moto verso il basso (Fig. 22.15(a)) la forza elettrica è esattamente uguale al peso della sferetta:

$$F_s = 2.8 \times 10^{-14} \text{ N} \quad (\text{diretta verso il basso}). \quad [22.10]$$

Nel caso del moto verso l'alto (Fig. 22.15(b)):

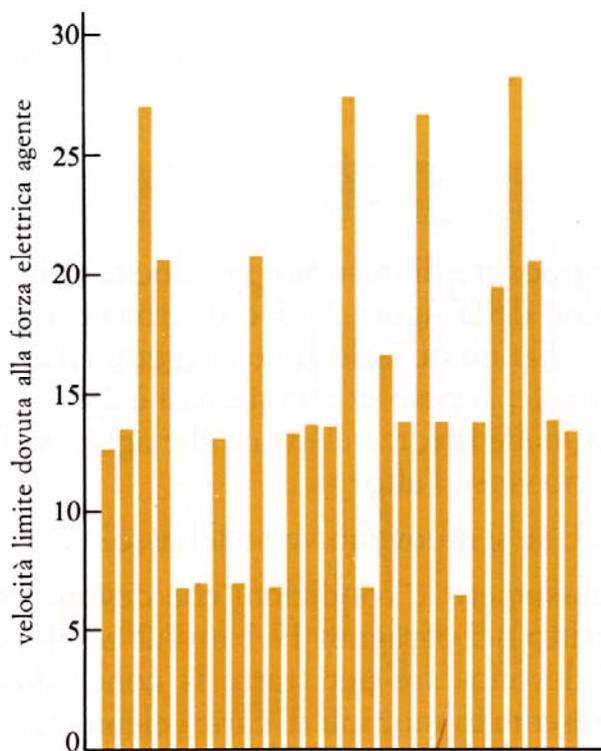
$$F_s = 3 \times 2.8 \times 10^{-14} \text{ N} \quad (\text{diretta verso l'alto}). \quad [22.11]$$

Le velocità limite di parecchie sferette sono state misurate in un esperimento eseguito per mezzo dell'apparecchio delle Figg. 22.12 e 22.13. Da ogni valore osservato è stata sottratta la velocità limite dovuta alla sola forza motrice gravitazionale e le velocità ottenute, dovute alla sola forza motrice elettrica, sono state rappresentate graficamente nella Fig. 22.16. È importante notare che i valori non sono distribuiti casualmente, bensì si raggruppano attorno a certi valori multipli di quello minimo. In questo particolare esperimento le velocità si raggruppano attorno ai valori 6.8, 13.5, 20.4 e 27.3 (in unità che si sono dimostrate convenienti in questo esperimento), come si può vedere riordinandoli in ordine crescente (Fig. 22.17).

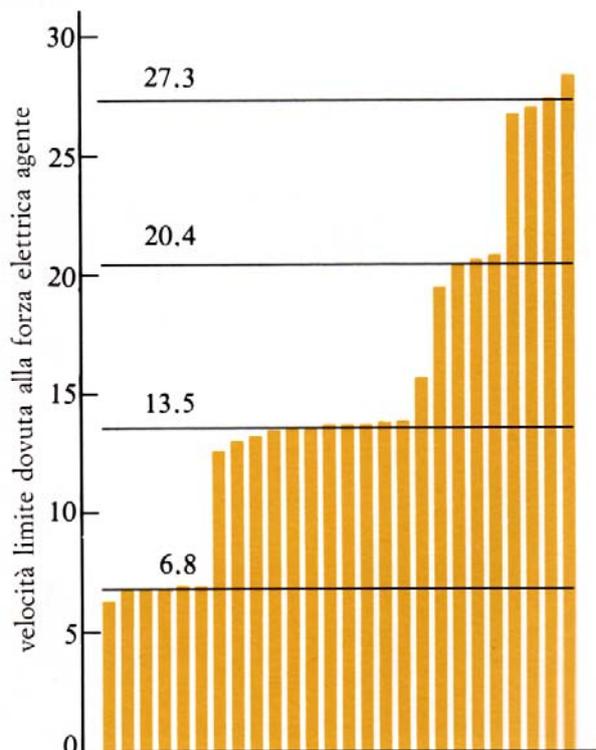
Poiché la velocità limite è proporzionale alla forza motrice, da questi dati traiamo la conclusione che anche la forza elettrica è distribuita intorno a determinati valori.

La forza elettrica dipende dalle cariche sulle sferette e dalla carica sulle lamine. Dato che la carica sulle lamine è stabile durante tutto l'esperimento, le differenze nella forza elettrica che si esercita su ciascuna sferetta devono essere dovute a differenze nella carica elettrica su ciascuna sferetta. Poiché la forza elettrica agente su una sferetta è proporzionale alla carica che essa porta (paragrafo 22.10 a pag. 265), queste differenze uguali nella forza elettrica agente sulle sferette cariche sono dovute a differenze uguali nella carica elettrica sulle sferette.

Se la carica elettrica si presenta realmente in unità uguali distinte (discrete), come l'esperimento



**Fig. 22.16.** Le velocità limite (misurate in unità adatte per questo esperimento) dovute alla componente elettrica della forza motrice agente su parecchie sferette di plastica. La velocità limite dovuta alla componente gravitazionale della forza motrice è stata sottratta dai valori osservati.



**Fig. 22.17.** Le velocità limite della Fig. 22.16 sono riportate in ordine di grandezza crescente. È importante notare che i valori delle velocità limite si raggruppano intorno a valori che sono multipli interi del valore più basso.

sembra indicare, allora esiste una unità naturale di carica elettrica. Questa unità naturale di carica elettrica è chiamata *carica elementare* o *carica fondamentale* ed è denotata di solito con il simbolo  $e$  (il suo valore è pari a  $1.602 \times 10^{-19}$  C). Nel 1909, il fisico americano R.A. Millikan (1868-1953) eseguì una serie di esperimenti che dimostrarono chiaramente l'esistenza dell'unità elementare di carica elettrica, usando un apparecchio simile a quello che abbiamo descritto. Al posto delle sferette di plastica di massa uguale e nota che abbiamo usato noi, egli usò goccioline d'olio di massa variabile e dovette misurarne le masse mentre ne esaminava le cariche. Il nostro esperimento è quindi più facile del suo, ma per il resto è quasi uguale.

### Quesiti

- 22.15.** Riassumete le condizioni che devono esistere nell'esperimento descritto nei paragrafi 22.6 e 22.7 ed elencate le eventuali ipotesi che si devono fare per trarre la conclusione che la carica elettrica si presenta in multipli di carica elementare.
- 22.16.** Potreste eseguire l'esperimento dei paragrafi 22.6 e 22.7 nel vuoto? Esponete il vostro ragionamento.
- 22.17.** Supponete di avere tre sfere conduttrici identiche fra loro e montate su sostegni isolanti. La prima sfera viene caricata con  $N$  cariche elementari. Toccate la prima sfera con la seconda e poi allontanatela, toccate la seconda sfera con la terza e poi allontanatela, infine toccate la terza sfera con la prima e poi allontanatela. Com'è ora distribuita la carica? Spiegate come siete giunti alla vostra conclusione. Supponete che non vi siano legami fra le cariche.

### 22.8. La conservazione della carica

Il nostro modello per le particelle dotate di carica elettrica conduce a formulare l'ipotesi che la carica elettrica si conservi. Quando elettrizziamo i corpi strofinandoli, trasferiamo particelle cariche da un corpo a un altro. Quando carichiamo due piastre parallele con una batteria, la batteria fa passare cariche dall'una all'altra piastra: le cariche delle piastre sono sempre eguali ed opposte. La quantità di carica acquistata da un corpo è uguale alla quantità di carica perduta dall'altro.

In certe situazioni possono venire «create» particelle cariche. Quando ciò accade, le particelle vengono sempre create in coppie e la carica di una particella è uguale e opposta alla carica dell'altra. Talvolta la natura «crea» spontaneamente particelle cariche: per esempio, un neutrone si trasforma in un protone e un elettrone; ma il protone e l'elettrone così creati hanno cariche uguali ed opposte. La carica totale è zero, prima e dopo la creazione.

Tutti i dati disponibili indicano che la quantità totale di carica elettrica rimane invariata. Come la conservazione dell'energia, la conservazione della carica elettrica è una legge di natura la cui validità si estende a tutto ciò che conosciamo.

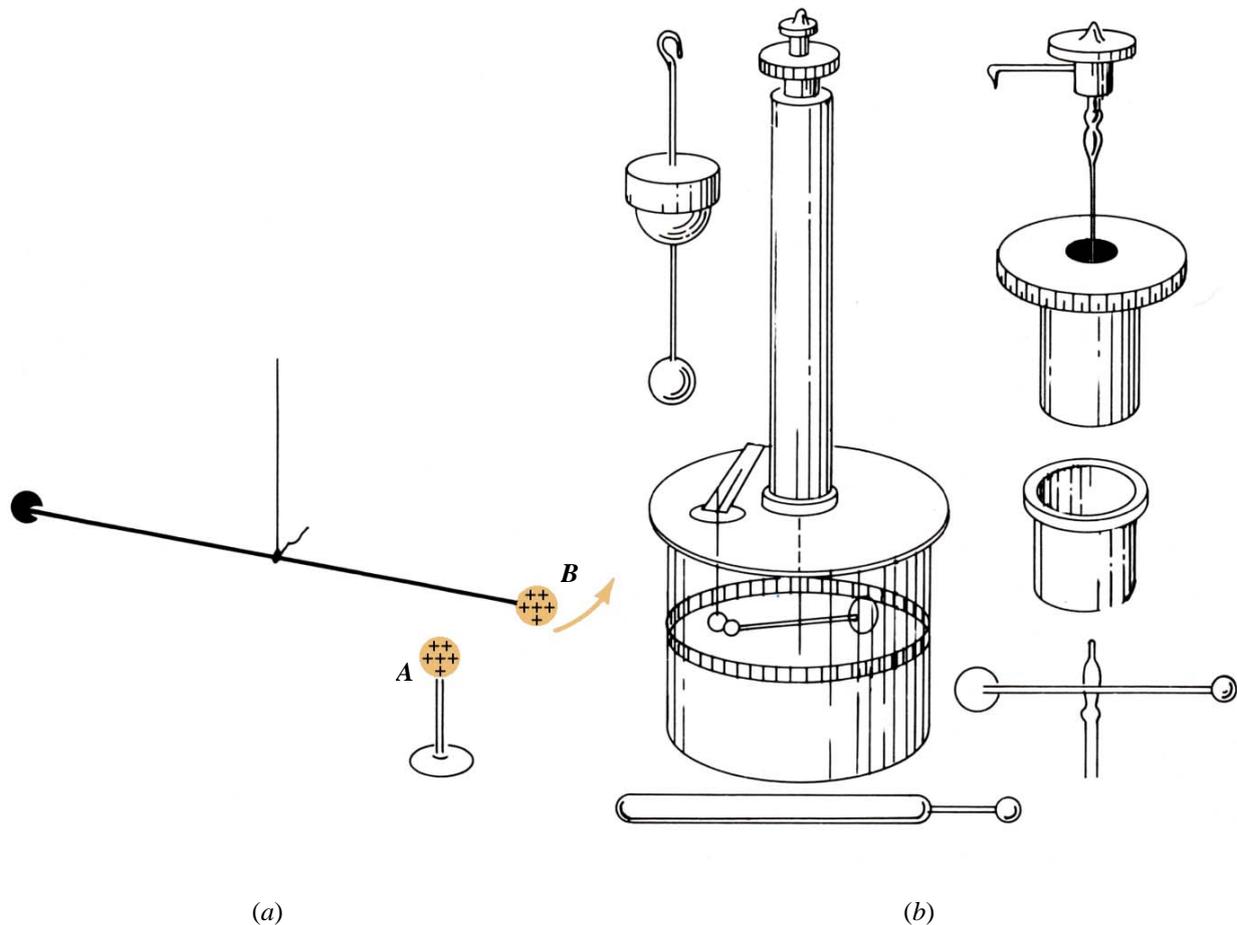
### 22.9. La dipendenza della forza dalla distanza

In che modo l'attrazione (o la repulsione) tra cariche elettriche dipenda dalla distanza fu stabilito sperimentalmente dal fisico francese Charles Coulomb nel 1785. Per i suoi esperimenti Coulomb fece uso di una bilancia di torsione, simile a quella che Cavendish usò più tardi per studiare l'attrazione gravitazionale (paragrafo. 21.11 a pag. 215 e il film “Le Forze” a cura del PSSC). La Fig. 22.18 fornisce uno schema di principio di tale dispositivo. Fissata la sfera carica  $A$ , la forza elettrica che essa esercita sulla sfera carica  $B$  fa ruotare il braccio orizzontale. Questo si ferma in una nuova posizione a cui corrisponde una certa torsione del filo di sospensione.

Quanto maggiore è la torsione, tanto maggiore deve essere la forza. Dall'angolo di torsione Coulomb poté perciò misurare la forza elettrica, e variando la distanza tra le sfere cariche, misurò la forza in funzione della distanza. Poiché le cariche sono distribuite un po' ovunque sulle due sfere, la distanza fra di esse deve essere abbastanza grande rispetto ai loro diametri (\*).

Facendo uso di sfere, cariche sia positivamente sia negativamente, Coulomb mostrò che la forza elettrica è

(\*) Riferendosi a corpi carichi posti a notevole distanza rispetto alle loro dimensioni, si parla spesso di *cariche puntiformi* dato che, in questo caso, le esatte posizioni delle cariche sui corpi non hanno alcuna importanza.



**Fig. 22.18.** (a) Schema del principio di funzionamento della bilancia di torsione di Coulomb. (b) Uno schizzo dell'apparecchio di Coulomb, come appare nel suo lavoro originale.

sempre inversamente proporzionale al quadrato della distanza tra le cariche; egli stabilì questo risultato con una precisione del 3% circa. Successive verifiche indirette, ottenute usando l'effetto di schermaggio dei conduttori, hanno confermato il risultato con precisione molto maggiore. Cavendish ottenne una precisione dell' 1% e, alla fine del XIX secolo, Maxwell stabilì l'esponente della legge (cioè la proporzionalità con l'inverso del quadrato della distanza) a meno di 1 su 40000. Oggi tale valore è stabilito a meno di 1 su  $10^9$ . Osservate che le forze elettriche e quelle gravitazionali variano esattamente nello stesso modo con la distanza; non abbiamo nessuna spiegazione di questa analogia, ma grazie ad essa possiamo spesso trattare gli effetti gravitazionali ed elettrici nello stesso modo.

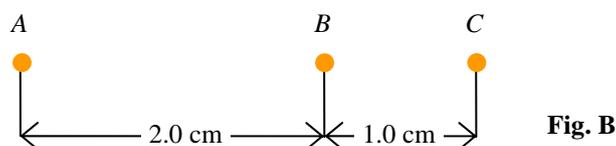
### Quesiti

**22.18.** Due oggetti elettrizzati *A* e *B* si trovano ad una distanza di 0.03 m, e si respingono con una forza di  $4.0 \times 10^{-5}$  N. Se allontaniamo il corpo *A* di altri 0.03 m, qual è la forza elettrica?

**22.19.** Tre corpi che recano cariche uguali sono collocati come è indicato nella Fig. B. La forza elettrica esercitata da *A* su *B* è  $3.0 \times 10^{-6}$  N.

(a) Determinate la forza elettrica esercitata da *C* su *B*.

(b) Determinate la forza elettrica risultante esercitata su *B*.



**Fig. B**

## 22.10. La legge di Coulomb

La forza fra due corpi carichi dipende dalla loro distanza e aumenta al crescere della carica presente su ciascun corpo. Ma come dipende esattamente la forza dalla carica? Utilizzeremo un metodo già noto (si veda il film “la legge di Coulomb” a cura del PSSC) per dividere una carica a metà, in quattro parti, e così via. Supponiamo di porre a contatto una sfera conduttrice carica con una sfera identica scarica: la carica elettrica si muoverà dall'una all'altra sfera fintanto che non si sarà ugualmente ripartita sulle due sfere, in modo che ciascuna di esse abbia metà della carica originaria.

Che cosa accade alle forze elettriche quando le cariche vengono ripartite? Misuriamo la forza di repulsione fra due sfere cariche  $A$  e  $C$  poste a una certa distanza, dimezziamo poi la carica su  $A$  cedendo l'altra metà a una sfera identica  $B$ . Anche la forza di repulsione tra  $A$  e  $C$  (sempre alla stessa distanza) risulta dimezzata, inoltre la stessa forza agisce quando  $A$  è sostituita da  $B$ , la sfera identica con la quale essa ha diviso la sua carica. A quanto pare, la carica e la forza sono proporzionali; questo conferma l'ipotesi, fatta nel paragrafo 22.7, che ci permise di postulare l'esistenza di una unità elementare di carica.

Riassumiamo ora in linguaggio algebrico quello che sappiamo. Il modulo della forza elettrica agente su una carica  $q_1$  è proporzionale al valore assoluto della carica, quindi:

$$F \propto |q_1|. \quad [22.12]$$

Se  $F$  è il modulo della forza di interazione tra la carica  $q_1$  e un altro piccolo corpo di carica  $q_2$ , allora  $F$  sarà proporzionale anche al valore assoluto dell'altra carica  $q_2$ . Possiamo indicare questa proporzionalità a entrambe le cariche nel seguente modo:

$$F \propto |q_1 \cdot q_2|. \quad [22.13]$$

Ora che sappiamo come la forza elettrica dipende dalla carica, possiamo combinare queste conoscenze con i risultati degli esperimenti di Coulomb, i quali ci dicono che la forza è inversamente proporzionale al quadrato della distanza  $r$  fra le cariche. Otteniamo così l'espressione completa del modulo della forza di interazione fra due cariche:

$$F = k \frac{|q_1 \cdot q_2|}{r^2}. \quad [22.14]$$

dove la costante di proporzionalità  $k$  dipende solo dalle unità nelle quali misuriamo le forze, le distanze e le cariche.

Indicando con  $\hat{\mathbf{r}}$  il versore orientato da  $q_1$  verso  $q_2$  possiamo scrivere in forma vettoriale la forza che la carica  $q_1$  esercita sulla carica  $q_2$ :

$$\mathbf{F}_{1 \rightarrow 2} = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad [22.15]$$

La forza che la carica  $q_2$  esercita sulla carica  $q_1$  sarà uguale ed opposta per azione e reazione:

$$\mathbf{F}_{2 \rightarrow 1} = -k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad [22.16]$$

Se le cariche  $q_1$  e  $q_2$  sono dello stesso segno le forze sono repulsive, mentre se le cariche  $q_1$  e  $q_2$  sono di segno opposto le forze sono attrattive. Nel primo caso la forza agente su ogni carica è diretta verso l'esterno lungo la linea congiungente i due corpi; nel secondo caso la forza agente su ogni carica è diretta verso l'interno lungo la linea congiungente i due corpi.

Chiameremo *legge di Coulomb* l'espressione che dà il valore della forza d'interazione fra due cariche e chiameremo *forze di Coulomb* (*forze coulombiane*) le forze che ubbidiscono a questa legge.

Nel paragrafo 22.8 abbiamo visto che la carica elettrica si presenta sempre sotto forma di multiplo della carica elementare  $e$ . Quindi si può esprimere  $q_1$  come  $N_1 e$ , e  $q_2$  come  $N_2 e$ , dove  $N_1$  e  $N_2$  sono numeri interi relativi e rappresentano il numero di cariche elementari presenti rispettivamente in  $q_1$  e  $q_2$ . Possiamo dunque le espressioni della legge di Coulomb anche nella forma

$$F = k \frac{|N_1 \cdot N_2| \cdot e^2}{r^2}, \quad [22.17]$$

equivalente alla [22.14],

$$\mathbf{F}_{1 \rightarrow 2} = k \frac{N_1 \cdot N_2 \cdot e^2}{r^2} \hat{\mathbf{r}}, \quad [22.18]$$

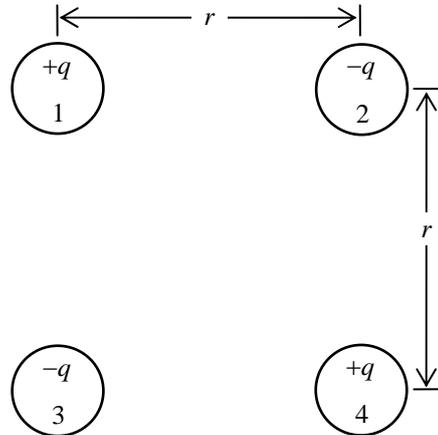
equivalente alla [22.15],

$$\mathbf{F}_{2 \rightarrow 1} = -k \frac{N_1 \cdot N_2 \cdot e^2}{r^2} \hat{\mathbf{r}}, \quad [22.19]$$

equivalente alla [22.16].

**Quesiti**

- 22.20.** Qual è l'effetto sulla forza che si esercita tra due sferette cariche se  
 (a) la carica di ciascuna sferetta raddoppia?  
 (b) la distanza tra i centri delle sferette cariche raddoppia?

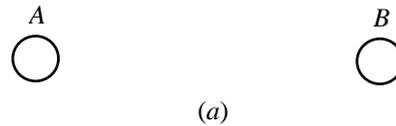


**Fig. C**

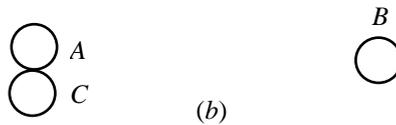
- 22.21.** Quattro sferette conduttrici identiche montate su dischi a ghiaccio secco sono poste su un tavolo orizzontale liscio nei quattro vertici di un quadrato. Due sferette portano ciascuna una carica  $+q$  e ciascuna delle altre due porta una carica  $-q$ , come è indicato nella Fig. C.  
 (a) Disegnate un diagramma vettoriale in scala rappresentando le forze elettriche che agiscono sulla sferetta 1.

- (b) Se tutti i dischi vengono abbandonati a se stessi nello stesso istante, in quale direzione orientata si muoverà ciascuno di essi?

- 22.22.** Se la distanza fra due sferette cariche è stata variata in modo che la forza che si esercita fra esse risulti dimezzata, per quale fattore è stata moltiplicata la distanza?



- 22.23.** Due sferette conduttrici identiche  $A$  e  $B$ , che portano cariche uguali, si respingono mutuamente con una forza di  $2.0 \times 10^{-5}$  N (Fig. D(a)). Un'altra sferetta identica scarica  $C$  viene messa a contatto con  $A$  come è illustrato nella Fig. D(b). Poi  $C$  viene spostata in modo che entri in contatto con  $B$ , come è illustrato nella Fig. D(c).



- (a) Qual è ora la forza elettrica che agisce su  $A$ ?  
 (b) Qual è la forza elettrica risultante che agisce su  $C$  (dopo che  $C$  ha toccato  $A$  e sta andando verso  $B$ ) quando  $C$  è a metà strada fra  $A$  e  $B$ ?



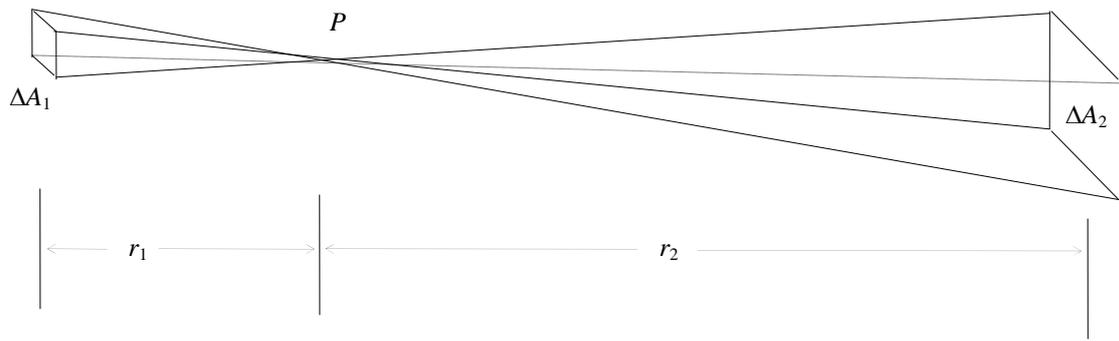
**Fig. D**

**22.11. Effetto zero**

Su una carica di prova  $q$  posta in un punto qualsiasi all'interno di un conduttore sferico cavo caricato con una carica qualsiasi  $Q$  agisce una forza elettrica risultante zero, cioè il campo elettrico è nullo in tutti i punti all'interno del conduttore.

Si consideri un conduttore cavo, in particolare il caso semplice di una sfera cava. Se la sfera viene caricata, sulla sua superficie si crea una distribuzione di carica elettrica uniforme<sup>(\*)</sup>. Poiché la forza risultante totale agente su una carica di prova collocata nel centro della sfera è nulla, l'intensità del campo elettrico nel centro della sfera deve essere nulla. Ma che cosa si può dire degli altri punti situati all'interno della sfera cava? Le Figg. 22.19 e 22.20 rappresentano la geometria della situazione. Si vuole determinare la forza risultante totale agente su una carica di prova collocata nel punto  $P$ . Se si costruiscono due coni concentrici, aventi il vertice in  $P$  ed estendentisi in versi opposti, essi intercettano sulla superficie della sfera due aree

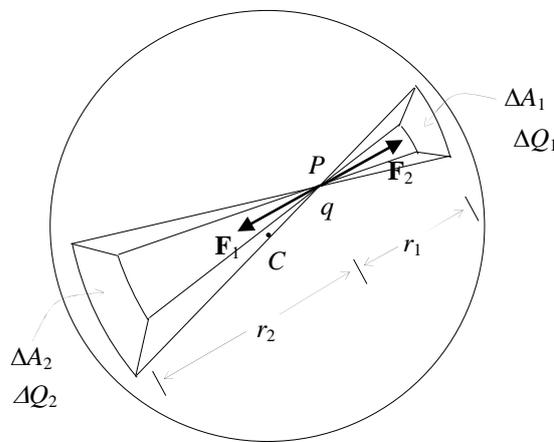
<sup>(\*)</sup> Ciò è assicurato dalla *simmetria* della sfera; poiché non c'è alcuna differenza fra due punti qualsiasi sulla superficie della sfera e le cariche si respingono mutuamente, esse si distribuiscono uniformemente sulla superficie.



**Fig. 22.19.** Con semplici considerazioni geometriche è facile vedere che:  $\frac{\Delta A_2}{\Delta A_1} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$

opposte. Poiché la distribuzione della carica sulla superficie della sfera è uniforme, la forza esercitata sulla carica di prova dalla carica portata dall'una e dall'altra regione intercettata sullo strato sferico è direttamente proporzionale all'area di quella regione. Le due forze hanno orientamenti opposti. Ma l'area maggiore è più distante da  $P$ , e l'aumento della forza dovuto alla maggiore carica presente sull'area maggiore ( $\propto r^2$ ) è compensato dalla diminuzione della forza dovuta alla distanza maggiore ( $\propto 1/r^2$ ). Perciò, le due forze sono uguali in modulo e contrarie in orientamento, e quindi il loro effetto totale è nullo. Poiché si può applicare lo stesso ragionamento al resto della sfera usando coni diversi, la forza risultante totale agente sulla carica di prova è nulla. Un risultato identico si trova per ogni punto situato all'interno della sfera. Quindi, l'intensità del campo elettrico all'interno dello strato sferico è dappertutto nulla.

Usando una matematica più complicata, si può ottenere lo stesso risultato per superfici conduttrici chiuse di forma arbitraria.



**Fig. 22.20.**

Sia  $\sigma$  la densità superficiale di carica:

$$\sigma = \frac{Q}{A} = \frac{\Delta Q_1}{\Delta A_1} = \frac{\Delta Q_2}{\Delta A_2}$$

risulta:

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{\frac{\Delta Q_2 q}{r_2^2}}{\frac{\Delta Q_1 q}{r_1^2}} = \frac{\Delta Q_2}{\Delta Q_1} \frac{r_1^2}{r_2^2} = \frac{\sigma \Delta A_2}{\sigma \Delta A_1} \frac{r_1^2}{r_2^2} = 1$$

## Problemi di fine capitolo

- 22.24.** (a) È probabile che nel toccare un oggetto metallico, come una maniglia di una porta, in una giornata secca d'inverno, vi capiti di vedere una scintilla e di sentire la scossa. Questo fatto si spiega comunemente dicendo che si era prodotta una carica statica. Come fareste a dire di quale segno è la carica di cui siete portatori?
- (b) Se avete accumulato una carica statica e toccate il telaio di legno di una porta, trovate quasi sempre che non si ha né scintilla né scossa, mentre ciò accadrebbe se toccaste la maniglia metallica. Perché?
- (c) Qualche volta, se toccate prima il telaio di legno e poi la maniglia, non si ha né scintilla né scossa in nessuno dei due casi, mentre ciò sarebbe accaduto se aveste toccato prima la maniglia. Proponete una spiegazione.

- 22.25.** Due bacchette di metallo sono montate su blocchetti isolanti ed allineate lungo un asse, con un po' di spazio fra di esse. Una viene caricata positivamente, l'altra negativamente. Una sfera leggera, coperta di uno strato conduttore e sospesa per mezzo di un lungo filo isolante, viene messa nello spazio esistente fra le due bacchette (Fig. E), e poi viene messa a contatto con la bacchetta carica positivamente. Che cosa pensate che accada? Su quale ragionamento basate questa previsione?

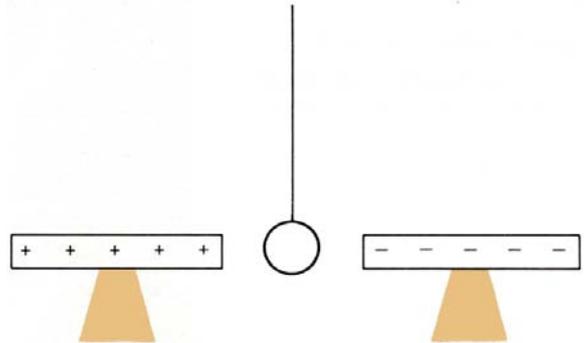


Fig. E

- 22.26.** Un elettroscopio a foglie d'oro è costituito da due sottili foglie d'oro sospese a un'asta di metallo all'interno di un recipiente di vetro, come illustrato nella Fig. F(a). Elettrizzate una bacchetta di plastica e poi avvicinatela al pomo dell'elettroscopio: le foglie si divaricano come è illustrato nella Fig. F(b). Quando allontanate la bacchetta di plastica, le foglie si richiudono. Usando il modello per la carica elettrica, spiegate il comportamento dell'elettroscopio.

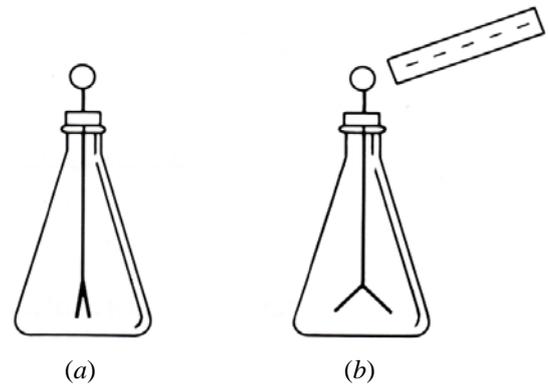


Fig. F

- 22.27.** Le foglie dell'elettroscopio della Fig. F(a) sono verticali. Toccate con una bacchetta di vetro elettrizzata il pomo dell'elettroscopio. Le foglie si divaricano e rimangono divaricate quando allontanate la bacchetta di vetro. Usando il modello per la carica elettrica, spiegate il comportamento dell'elettroscopio.

- 22.28.** Mantenete una bacchetta di plastica carica in prossimità del pomo dell'elettroscopio della Fig. F(a). Toccate il pomo con un dito. Allontanate prima il dito, poi la bacchetta. Le foglie dell'elettroscopio si divaricano e rimangono divaricate. Usando il modello per la carica elettrica, spiegate il comportamento dell'elettroscopio della Fig. F(a). Quale semplice prova potreste fare per verificare la correttezza della vostra spiegazione?

- 22.29.** Supponete che tre sferette cariche e che portano cariche uguali, siano disposte come è indicato in Fig. G e che la sferetta C eserciti sulla sferetta B una forza di  $4 \times 10^{-6}$  N.

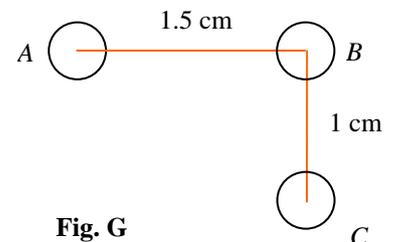


Fig. G

- (a) Quanto vale la forza esercitata da A su B?
- (b) Quanto vale la forza risultante esercitata su B?