

## LA FORZA ELETTROSTATICA

### A) Elettrizzazione dei corpi

1. La più elementare esperienza di elettrostatica (la Fisica delle cariche elettriche in quiete) è quella della *elettrizzazione per strofinio*: un oggetto di plastica, strofinato con un panno di lana, acquista una proprietà fisica particolare: diventa capace di attrarre a sé altri corpi, purché sufficientemente vicini e sufficientemente leggeri (un pezzetto di carta, un capello, il pulviscolo atmosferico). E la stessa proprietà acquista il panno di cui ci siamo serviti.

2. È chiaro che tale attrazione non ha niente a che fare con l'attrazione gravitazionale: siamo in presenza di un'interazione di altra natura<sup>[1]</sup>. Seguendo una terminologia che risale ad almeno sei secoli prima di Cristo<sup>[2]</sup>, diremo che con l'operazione di strofinio abbiamo «elettrizzato», o «caricato di elettricità», l'oggetto di plastica e il panno di lana. E chiameremo «carica elettrica» la proprietà fisica che i due corpi hanno in tal modo acquisito.

3. Nei laboratori scolastici questi esperimenti vengono effettuati elettrizzando bacchette di vetro o di ebanite (una resina artificiale), e servendosi del cosiddetto *pendolo elettrostatico*: una leggerissima pallina di sughero (o di midollo di sambuco, o di materiale analogo) appesa a un filo. La pallina funge da rivelatore di carica, risultando particolarmente sensibile all'attrazione esercitata da un corpo elettrizzato.

4. Fenomeni di questo genere non costituiscono tuttavia una caratteristica esclusiva di materiali come plastica, lana, ebanite o vetro: risultati analoghi si potrebbero ottenere (salvo eventualmente maggiori difficoltà operative ed effetti meno appariscenti) sottoponendo a sfregamento un materiale qualsiasi.<sup>[3]</sup>

5. Per elettrizzare un corpo può anche essere sufficiente metterlo a contatto con un corpo già carico. Mentre i materiali che chiamiamo *isolanti* (o *dieletrici*), sono particolarmente adatti a esperienze di elettrizzazione per strofinio, i materiali *conduttori* (tipicamente, i metalli) si prestano bene a trasmettere la carica elettrica per semplice contatto.

---

<sup>1</sup> L'attrazione gravitazionale è legata al valore della massa, che non risulta certo modificato da un'operazione di strofinio, e resta in ogni caso lontanissima dai grandi valori che sarebbero necessari per dar luogo ad effetti attrattivi così vistosi.

<sup>2</sup> Per esperienze di questo genere veniva utilizzata l'ambra, in greco *électron*.

<sup>3</sup> Il semplice contatto tra materiali di tipo diverso è già sufficiente a produrre un debolissimo stato di carica nell'uno e nell'altro. L'operazione di sfregamento non fa che moltiplicare l'area di effettivo contatto.

## B) Carica positiva e carica negativa

1. Se la pallina del pendolo elettrostatico è – come in precedenza abbiamo implicitamente supposto – priva di carica elettrica, viene in ogni caso attirata dagli oggetti elettrizzati. Ma quando è carica di elettricità, alcuni oggetti elettrizzati l’attirano, mentre altri la respingono: il che suggerisce l’esistenza di due diversi modi di essere della carica elettrica. Al riguardo, l’esperienza mostra che

a) strofinando un corpo  $A$  con un corpo  $B$ , i due corpi si caricano dei due diversi tipi di carica: se uno dei due attira una pallina già elettrizzata, l’altro la respinge;

b) caricando un corpo  $A$  per contatto con un corpo  $B$  già carico, i due corpi restano in definitiva carichi di elettricità dello stesso tipo: entrambi attraggono, oppure entrambi respingono una pallina carica;

c) corpi dotati di carica elettrica dello stesso tipo si respingono, corpi dotati di carica elettrica di tipo diverso si attraggono. Supponiamo ad esempio di aver caricato un corpo  $A$  strofinandolo con un corpo  $B$ : se la pallina del pendolo elettrostatico – scarica – viene attratta da  $A$  fino al contatto, subito dopo il contatto con  $A$  ne viene respinta, perché  $A$  ha ceduto alla pallina parte della propria carica. Il corpo  $B$  invece esercita sulla pallina – caricata per contatto con  $A$ , e quindi portatrice come  $A$  di una carica di tipo diverso da quella di  $B$  – un’azione attrattiva.

2. Per primo, Benjamin Franklin (1706-1790) suggerì di distinguere i due tipi di carica elettrica parlando di carica *positiva* e di carica *negativa*, in considerazione del fatto che mettendo insieme i due tipi di carica si ottiene un effetto di tendenziale compensazione reciproca, come quando si sommano numeri positivi e negativi. La convenzione fu di chiamare positive le cariche elettriche del tipo di quella che viene prodotta su una bacchetta di vetro strofinata con un panno di lana.

3. A seconda delle particolari modalità del processo di elettrizzazione, uno stesso corpo può caricarsi sia di un segno che dell’altro (se ci riferiamo ai processi di elettrizzazione per contatto, la cosa appare del tutto ovvia): è anche vero però che ogni materiale ha una sua tendenza più o meno grande a caricarsi di un segno piuttosto che del segno contrario. Il fatto che il vetro, strofinato con lana, si carichi di segno più, non esprime dunque una proprietà assoluta del vetro<sup>[4]</sup>, ma semplicemente sta ad indicare che, tra vetro e lana, è il vetro che ha una più forte tendenza ad assumere una carica positiva. Strofinato con altri materiali (ad esempio, pelliccia di gatto), il vetro si caricherebbe di segno meno. La lana poi, che strofinata su vetro si carica di segno meno, si carica di segno più se strofinata su materiali plastici (ebanite, teflon, moplen, PVC, polistirolo, e simili).

---

<sup>4</sup> Come la denominazione di *elettricità vetrosa*, a volte attribuita alla carica positiva in alcuni vecchi manuali, sembra suggerire.

### C) Quantizzazione, conservazione e invarianza della carica

1. Nella prima parte del ventesimo secolo<sup>[5]</sup> è stato accertato che mentre, nel mondo macroscopico, uno stesso corpo può risultare, a seconda delle circostanze, privo di carica elettrica oppure carico di segno più oppure carico di segno meno, per le particelle<sup>[6]</sup> che compongono l'atomo (le particelle «subatomiche») lo stato di carica o di neutralità elettrica rappresenta invece una caratteristica intrinseca e immodificabile. I nuclei atomici sono infatti costituiti da neutroni, per loro natura privi di carica elettrica, e da protoni, per loro natura carichi di segno più. Intorno al nucleo sono in movimento gli elettroni, portatori di una carica uguale e contraria a quella dei protoni, e normalmente in numero uguale, cosicché l'atomo nel suo stato naturale è complessivamente una particella priva di carica.

2. Ma che cosa esattamente significa, a livello di particelle elementari<sup>[7]</sup> parlare di *carica elettrica*? In base a quale criterio si decide che un elettrone possiede carica elettrica e un neutrone no? Dire che una particella è «carica di elettricità» significa semplicemente attribuirle un certo tipo di comportamento: possiamo ad esempio dire che una particella è dotata di carica elettrica se ha la proprietà di esercitare – *anche a distanza* – un'azione repulsiva sulle particelle dello stesso tipo<sup>[8]</sup>.

3. Gli atomi possono venire «ionizzati», possono cioè perdere elettroni o al contrario acquisire elettroni in soprannumero. E conseguentemente i corpi del mondo macroscopico, il cui stato naturale è quello di neutralità elettrica, possono ricevere o cedere elettroni: nel primo caso risulteranno elettrizzati di segno meno, nel secondo di segno più. Elettrizzare un corpo (per strofinio, per contatto o in qualsivoglia altro modo) significa dunque semplicemente spostare elettroni, trasferirli da un corpo ad un altro.

4. A questa interpretazione dei processi di elettrizzazione si ricollegano due fondamentali proprietà della carica elettrica: la *quantizzazione* e la *conservazione*.

a) La carica di un corpo non può essere fatta variare con continuità, ma solo «a gradini»: la più piccola variazione possibile è quella che si otterrebbe aggiungendo o togliendo un unico elettrone. Perciò, la carica di un corpo può assumere *solo certi ben determinati valori*: i valori multipli interi – positivi o negativi – della carica di

<sup>5</sup> La scoperta dell'elettrone risale agli anni 1897-1900, la scoperta del nucleo atomico al 1911, quella del protone al 1914, quella del neutrone al 1932.

<sup>6</sup> La distinzione tra «corpi» e «particelle» risiede essenzialmente nel fatto che un corpo ha il carattere dell'unicità e quindi della distinguibilità da altri corpi, mentre una particella ha il carattere della molteplicità, e quindi della indistinguibilità dalle particelle consimili. Il più impalpabile granellino di sabbia è, sotto questo aspetto, un corpo. Una qualsiasi molecola d'acqua o un qualsiasi atomo sono invece particelle.

<sup>7</sup> Sono elementari le particelle non scomponibili: ad esempio, le particelle costitutive degli atomi (protoni, neutroni, elettroni).

<sup>8</sup> La forza repulsiva si indebolisce ovviamente al crescere della distanza, ma si annulla solo per distanze infinite. Un'azione repulsiva «a contatto» potrebbe essere invece una manifestazione della cosiddetta *interazione forte* (l'interazione che mantiene aggregati – e al tempo stesso separati – protoni e neutroni in un nucleo atomico).

un elettrone: non esistono cariche di valore intermedio. Ciò appare ben comprensibile a livello dei corpi macroscopici, ma risulta in realtà verificato *anche a livello di particelle elementari*, e rappresenta la legge di **quantizzazione della carica elettrica**.

b) Un processo macroscopico di elettrizzazione per strofinio o per contatto non crea dal nulla delle cariche elettriche, ma semplicemente ridistribuisce (distribuisce diversamente) elettroni già preesistenti: il valore complessivo della carica dei corpi coinvolti nel processo non viene quindi modificato. Più in generale, risulta sempre valida (*anche a livello di particelle elementari*) una legge di **conservazione della carica elettrica**, secondo la quale la carica dell'universo ha un valore costante: se da qualche parte compare una carica, da qualche altra parte scompare una carica identica, oppure compare una carica uguale e contraria. Più specificamente, la legge di conservazione della carica elettrica stabilisce che la carica complessiva di un sistema *isolato* è costante.<sup>[9]</sup>

Quando ad esempio un elettrone e un positrone<sup>[10]</sup> interagiscono annientandosi reciprocamente e producendo due fotoni di alta energia, o quando al contrario un fotone di alta energia che interagisce con la materia scompare producendo una coppia elettrone/positrone, la carica complessiva è zero sia prima che dopo (i fotoni non hanno carica). La stessa cosa si verifica quando un neutrone libero decade producendo un protone e un elettrone (più un antineutrino, privo di carica).

c) Una ulteriore, fondamentale proprietà della carica elettrica è la sua **invarianza relativistica**: il fatto cioè che tutti gli osservatori inerziali attribuiscono alla carica di un corpo o di una particella esattamente lo stesso valore. Detto in altro modo: la carica di un corpo o di una particella risulta del tutto indipendente dalla sua velocità<sup>[11]</sup>. Si noti che altre proprietà fisiche che nei sistemi isolati si conservano (come la quantità di moto o il momento angolare) risultano in generale *diverse* in valore e direzione nei diversi riferimenti inerziali, e quindi *non* sono invarianti relativistiche.

---

<sup>9</sup> Strettamente parlando, «isolato» è un insieme di corpi o particelle che interagiscono tra loro ma non con corpi o particelle non appartenenti al sistema. In realtà, perché la carica di un sistema si conservi basta che la superficie chiusa immaginaria che lo delimita *non sia attraversata da materia*: il passaggio di radiazione elettromagnetica non impedirebbe di considerare elettricamente isolato il sistema, e così pure il fatto che tra i corpi del sistema e corpi estranei ci siano interazioni di tipo gravitazionale o di tipo elettromagnetico. Al riguardo, si veda il cap.74 («Quando si dice isolato») in *100 errori di Fisica*.

<sup>10</sup> «Antiparticella» dell'elettrone, di massa identica e carica opposta.

<sup>11</sup> Una prova è l'esatta neutralità elettrica di tutti gli atomi (non ionizzati): il movimento degli elettroni e dei protoni non impedisce che la carica complessiva sia zero.

## D) La legge di Coulomb

1. Elementari esperienze di laboratorio confermano quanto l'intuizione suggerisce: l'interazione attrattivo-repulsiva tra due cariche elettriche è tanto più forte quanto più grande è il valore delle cariche, e diminuisce rapidamente al crescere della distanza tra le due cariche. Una precisa relazione quantitativa tra i valori delle variabili in gioco (le cariche elettriche, la distanza, la forza) è fornita dalla **legge di Coulomb**: *la forza con cui due cariche elettriche interagiscono è direttamente proporzionale al valore delle due cariche ed è inversamente proporzionale al quadrato della distanza tra di esse.*

Possiamo cioè scrivere

$$[A] \quad F = k \frac{|q'q''|}{r^2}$$

dove il simbolo di valore assoluto tiene conto del fatto che il prodotto  $q'q''$  potrebbe risultare negativo (mentre a primo membro figura il modulo, sempre positivo, di una quantità vettoriale), e dove  $k$  è una costante di proporzionalità la cui natura (dimensioni fisiche e valore numerico) dipende dalle convenzioni adottate – in fatto di dimensioni e di unità di misura – relativamente a forza, carica elettrica e lunghezza.

2. A rigore, tale legge vale solo se riferita a cariche elettriche distribuite nello spazio con simmetria sferica: in modo tale cioè che la *densità di carica* (il limite a cui tende il rapporto carica/volume quando il volume tende a zero) abbia lo stesso valore in tutti i punti equidistanti dal centro della sfera. In tal caso, la distanza  $r$  da porre a denominatore della [A] è la distanza tra i centri delle due sfere.

Va da sé che cariche puntiformi (cariche cioè localizzate su corpi descrivibili come semplici punti materiali) soddisfano alla condizione della simmetria sferica: ed è chiaro che più la distanza tra due corpi carichi è grande *in rapporto alle loro dimensioni*, tanto più piccolo è l'errore che si commette schematizzandoli come punti e applicando per essi la legge di Coulomb. Si noti a tale proposito che corpi anche molto piccoli non possono essere considerati puntiformi se la distanza che li separa diventa a sua volta molto piccola: perciò dalla legge di Coulomb non è possibile dedurre il risultato, chiaramente paradossale, che la forza tende a infinito quando la distanza tende a zero.

3. Nel Sistema Internazionale la carica elettrica ha le dimensioni di una intensità di corrente elettrica moltiplicata per un tempo: perciò, la carica unitaria (denominata **coulomb**, simbolo C) corrisponde alla corrente di 1 A (un ampere, unità internazionale per l'intensità di corrente) per il tempo di 1 s. Vale a dire: il coulomb è la carica che attraversa in 1 s le sezioni trasversali di un conduttore nel quale circola una corrente elettrica di intensità costante 1 A <sup>[12]</sup>. Da ciò discende che nel Sistema

<sup>12</sup> In modo equivalente, il coulomb veniva un tempo definito come la carica elettrica che attraversa un voltmetro a nitrato d'argento nell'intervallo di tempo durante il quale il peso dell'argento depositato al catodo (elettrodo negativo) aumenta di 1,118 mg.

Internazionale la costante della legge di Coulomb non è un puro numero ma una grandezza fisica (corrispondente a una forza per una lunghezza al quadrato diviso una carica al quadrato, e misurabile quindi in  $\text{Nm}^2\text{C}^{-2}$ ). Il valore numerico di  $k$  è  $8,99 \times 10^9 \approx 9 \times 10^9$ , e corrisponde, come vedremo, al valore numerico della velocità  $c$  della luce nel vuoto elevato al quadrato e moltiplicato per  $10^{-7}$ .

4. Per ragioni pratiche (legate alla possibilità di esprimere in una forma matematica più comoda le leggi dell'elettromagnetismo) nel Sistema Internazionale si pone  $k =$

$$= \frac{1}{4\pi\epsilon_0}, \text{ e si scrive quindi la legge di Coulomb nella forma}$$

$$[\text{B}] \quad F = \frac{|q'q''|}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

dove  $\epsilon_0$  è una costante, che viene denominata **costante dielettrica** (o *permittività del vuoto*). Le dimensioni fisiche di tale costante sono ovviamente reciproche rispetto a quelle di  $k$ , e corrispondono a quelle di una capacità (rapporto, come si vedrà, tra una carica e una differenza di potenziale) diviso una lunghezza: dato che le unità internazionali sono il farad per la capacità e il metro per la lunghezza, il valore di  $\epsilon_0$  viene di solito espresso in farad a metro:

$$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m.}$$

5. La carica elementare – quella di un protone oppure, con segno negativo, dell'elettrone – vale  $1,60 \times 10^{-19}$  C. Ciò significa che occorrono  $6,25 \times 10^{18}$  (6250 milioni di miliardi) di protoni (o di elettroni) per fare la carica di 1 C. In una comune esperienza di elettrizzazione per strofinio vengono messi in gioco valori di carica inferiori a un decimilionesimo di coulomb (corrispondenti allo spostamento da un corpo all'altro di qualche centinaio di miliardi di elettroni).

La Terra è un oggetto carico di segno meno: misurando il campo elettrico attorno alla Terra si ricava che la carica della Terra vale circa 500000 C.

6. L'esperienza insegna che *l'interazione tra due cariche non è modificata dalla presenza di altre cariche*. Perciò ad esempio l'interazione tra due cariche puntiformi  $q'$  e  $q''$  può in ogni caso essere calcolata con la legge di Coulomb – e quindi esclusivamente in funzione del valore delle due cariche e della relativa distanza – senza dover tenere conto di eventuali concomitanti interazioni di  $q'$  e  $q''$  con altre cariche. In altre parole: *le forze elettrostatiche su una carica elettrica si sovrappongono senza modificarsi*. È il **principio di sovrapposizione** (o «di indipendenza») **delle interazioni elettrostatiche**.