

MA0748 - FISICA PER I DISPOSITIVI IOT

Lorenzo Santi

AA 2022/23 – Lezione 3 07/03/2023

Argomenti della lezione di oggi

- La carica elettrica
- L'elettroscopio a foglie d'oro

La carica elettrica

l'esperienza dei nastri adesivi

- Che cosa è la carica elettrica? Esploriamo il concetto con questa piccola esercitazione

Demonstration

Riassumiamo quanto abbiamo visto:

Abbiamo quattro pezzi di nastro adesivo, due attaccati al tavolo (nastri blu in figura) e due sopra i precedenti (nastri rossi).

Dopo averli strappati dal supporto, i due nastri rossi avvicinati si respingono.

Un nastro rosso ed uno blue, si attraggono.

I due nastri blu si respingono.



Riassumiamo i risultati in una tabella

Possiamo generare questa tavola di verità assegnando al nastro tipo «rosso» un valore numero +1 e a quello «blu» un valore -1 e controllando il segno del prodotto.

La tabella si trasforma in una tavola di moltiplicazione, che fornisce la previsione di

- repulsione, se il risultato è +1
- Attrazione, se il risultato è -1

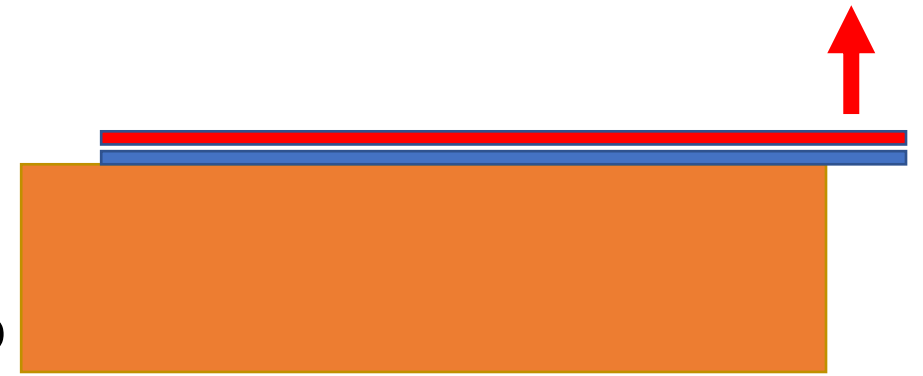
	Nastro 1	Nastro 2
Nastro 1	Repulsione	Attrazione
Nastro 2	Attrazione	Repulsione

	+1	-1
+1	$(+1)*(+1) = 1$ Repulsione	$(-1)*(+1) = -1$ Attrazione
-1	$(+1)*(-1) = -1$ Attrazione	$(-1)*(-1) = 1$ Repulsione

Il valore numerico +1 o -1 è la prima caratterizzazione di una nuova grandezza, chiamata **carica elettrica**.

Come possiamo interpretare questo fenomeno?

Le proprietà adesive di un nastro sono dovute al fatto che la sua colla forma un legame chimico (debole) col materiale della superficie su cui aderisce.



Quando noi strappiamo ad esempio il nastro etichettato rosso, una piccola parte della colla rimane attaccata all'altra superficie: è in questa separazione che il nastro rosso e quello blu acquisiscono le cariche elettriche osservate.

Notare che nello strappo i due nastri acquisiscono cariche opposte: possiamo ipotizzare che complessivamente **tanta carica negativa acquisisce il nastro blu, tanta positiva ne acquisisce quello rosso:**

la carica complessiva dei due nastri è nulla.

Il **processo di caricamento** dei due nastri quindi deriverebbe da una **separazioni di cariche.**

La separazione di due corpi incollati fra di loro non è l'unico procedimento meccanico che permette di caricarli, distribuendo tra i due cariche positive e negative

Ad esempio, strofinando un pezzo di stoffa di cotone sulla pelle, abbiamo il **caricamento per strofinio** (la pelle si carica positivamente, la stoffa negativamente)

Questo fenomeno era noto fino dall'antichità: ordinando vari materiali come nell'elenco a fianco, abbiamo che strofinandone due dell'elenco, quello più in alto nella lista viene caricato positivamente, mentre l'altro negativamente.

Inoltre l'effetto di caricamento è tanto maggiore quanto maggiore è la distanza tra i due materiali nell'elenco.

Per comprendere questo aspetto però abbiamo bisogno di una caratterizzazione più quantitativa del concetto di carica elettrica.

Positivo

Pelle umana
Pelliccia di coniglio
Vetro
Capelli umani
Nylon
Lana
Cotone
Ambra
Gomma
Rayon
Polistirene
Polietilene
Teflon

Negativo

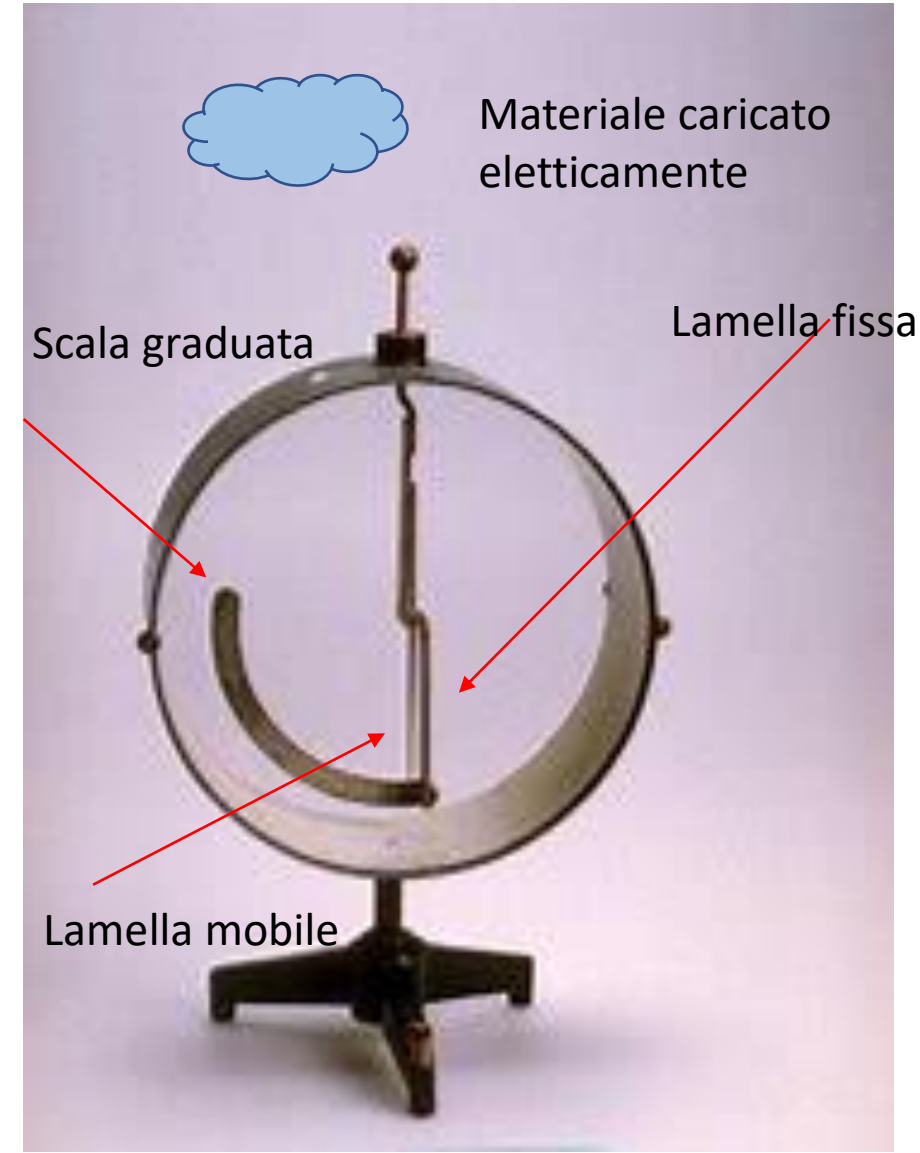
La carica elettrica

L'elettroscopio a foglie d'oro

Uno strumento che permette una caratterizzazione quantitativa della carica elettrica è l'elettroscopio.

È composto da due lamine, una mobile estremamente leggera, l'altra fissa.

L'intensità della carica che viene comunicata al dispositivo (sia alla lamina mobile, che a quella fissa e quindi il tutto si risolve in una repulsione) può essere letta su una scala, che quantifica quanto la lamella mobile si allontana (ruota) rispetto a quella fissa.





TROSCOPE:

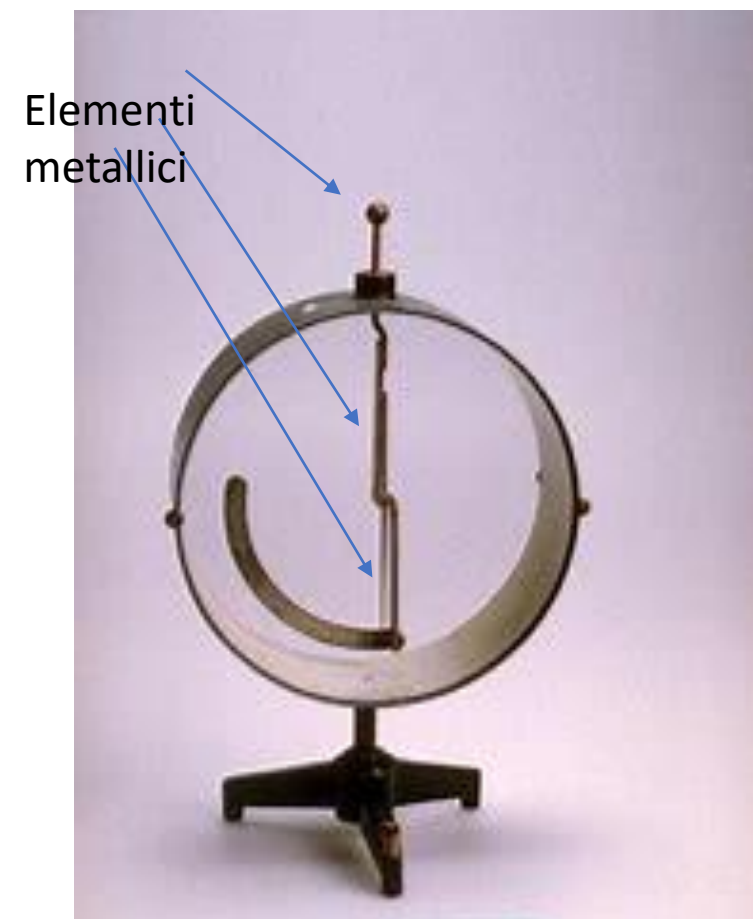
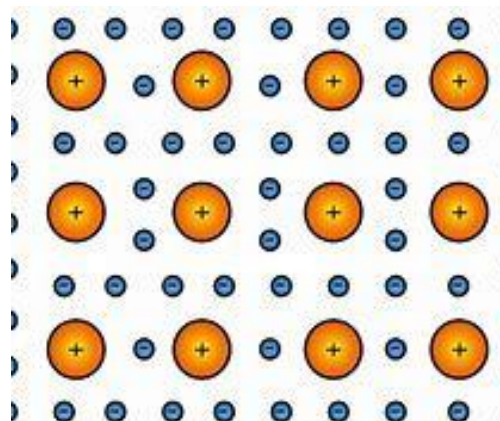
1. detecting the presence of very weak electrical charges at rest on a body
2. determine the nature of the electrical charges

La carica elettrica

Interpretazione del funzionamento dell'elettroscopio a foglie d'oro

Il terminale di contatto esterno, l'asta di supporto interna e le lamelle sono fatte di metallo, nel quale delle **cariche elettriche positive** sono disposte su un reticolo formato da **ioni** della specie chimica del metallo e delle **cariche elettriche negative (elettroni)** che sono relativamente libere di muoversi nello spazio tra gli ioni positivi.

Complessivamente il materiale sarà elettricamente neutro in un punto se ivi il numero di cariche positive e quello delle cariche negative sono eguali.



Supponiamo di partire da una situazione in cui l'elettroscopio sia elettricamente neutro (scarico).

Avvicinando un corpo carico negativamente (stoffa di cotone strofinata) al terminale di contatto, gli elettroni presenti in tale zona (essendo carichi negativamente) vengono respinti verso le lamelle. Ciò lascia una carica positiva netta nei pressi del terminale.

Questo fenomeno viene chiamato **induzione elettrica** e produce una **polarizzazione** delle cariche dell'oggetto (in questo caso l'elettroscopio) cioè una **separazione tra cariche positive e negative in un oggetto elettricamente neutro**.

(Il fatto che ci sia carica sulle lamelle è testimoniato dalla loro repulsione reciproca)

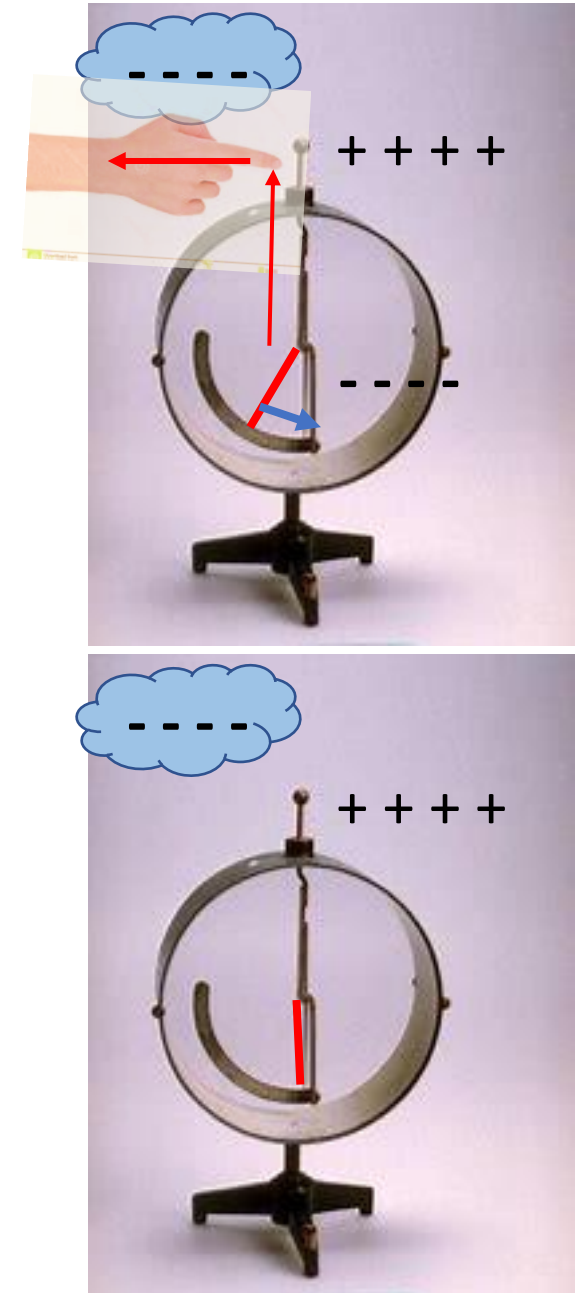


Successivamente, nella stessa configurazione, lo sperimentatore tocca con la mano il terminale, permettendo a parte degli elettroni di sfuggire dall'elettroscopio attraverso il corpo dello sperimentatore.

(La ragione per cui degli elettroni sfuggono dall'elettroscopio è che nella zona delle lamelle si respingono uni con gli altri e tendono a migrare verso l'esterno)

Nell'elettroscopio risulta così una mancanza di elettroni, che determina una concentrazione di cariche positive nel pressi del terminale, mentre le lamine ora sono neutre (ed infatti non si respingono più).

Allontanando la mano non cambia niente nella distribuzione di cariche e le lamelle rimangono collassate.

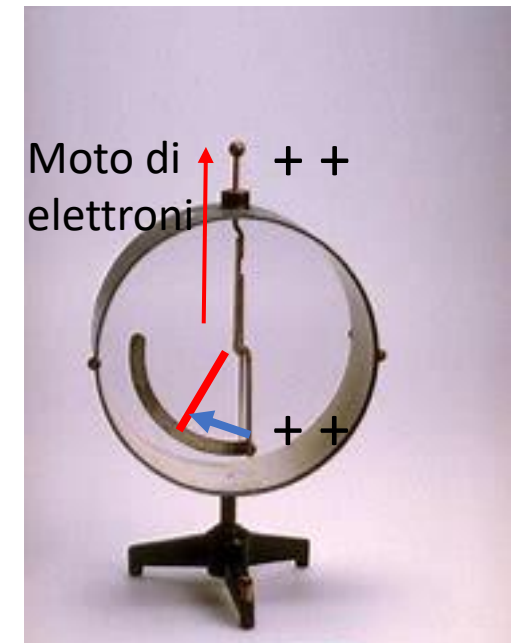
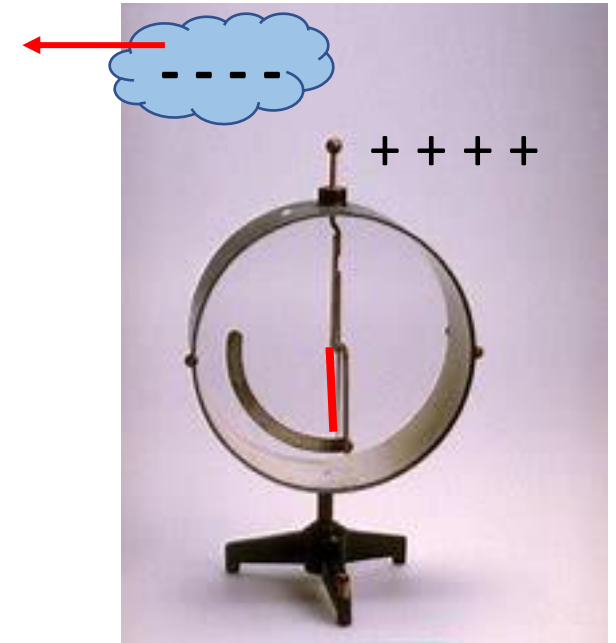


Complessivamente, l'elettroscopio ora è carico positivamente (ricordiamo, ne sono usciti degli elettroni negativi).

Se adesso allontaniamo il corpo carico negativamente, gli elettroni si ridistribuiscono nell'elettroscopio, diminuendo le differenze di cariche tra i vari punti.

Ne risulta che le lamelle, originalmente neutre, ora sono cariche positivamente (si sono allontanati degli elettroni attratti dalle cariche positive al terminale).

Il risultato visibile è che ora le lamelle si respingono.



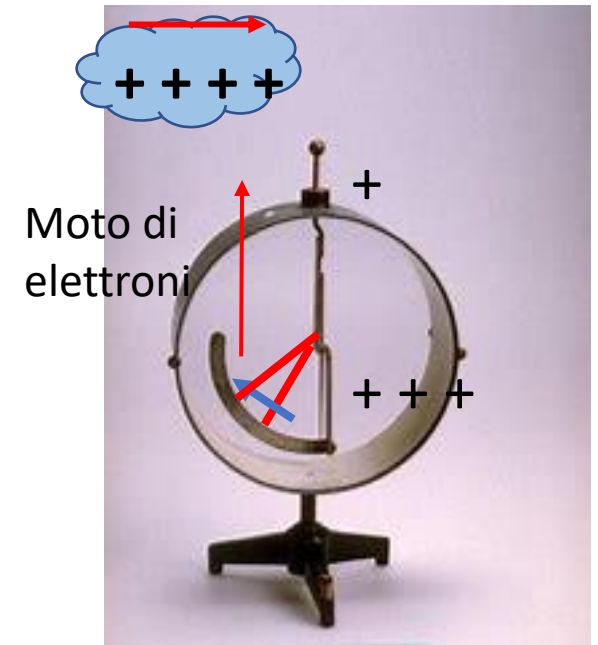
All'elettroscopio carico positivamente, avviciniamo un corpo carico positivamente (nel video dovrebbe essere una bacchetta di bachelite strofinata).

Alcuni elettroni vengono attratti dalla zona delle lamelle verso il terminale, aumentando la carica positiva presso le lamelle e riducendola presso il punto di contatto.

Il risultato è che le lamelle ora sono più cariche e divergono in maniera maggiore.

La carica complessiva in un punto dell'elettroscopio dipende dal numero di elettroni in più (o in meno se la carica netta è positiva) rispetto alla situazione elettricamente neutra.

In effetti è stata verificata sperimentalmente l'ipotesi secondo la quale tutte le cariche possono essere espresse in termini di multipli di una **carica elementare e**, la carica dell'elettrone.



Riassumiamo i concetti incontrati in questa esplorazione dell'elettroscopio.

- Un materiale di tipo metallico, complessivamente neutro dal punto di vista elettrico, normalmente contiene cariche elettriche positive (ioni organizzati in un reticolo) e cariche elettriche negative (**elettroni di conduzione**, liberi di muoversi nello spazio occupato dal materiale).
- In presenza di un corpo carico esterno, gli elettroni del metallo ne vengono attratti o respinti, a seconda del segno della carica esterna. Il flusso di elettroni che ne deriva genera una ridistribuzione nel metallo di cariche positive e negative (polarizzazione elettrica).
- La carica complessiva presente in un punto del metallo dipende dal surplus (carica negativa) o deficit (carica positiva) nel numero di elettroni rispetto alla situazione elettricamente neutra. La carica complessiva può essere espressa quantitativamente in termini di un numero di cariche elementari (quella dell'elettrone).

La **carica elettrica** così definita viene espressa nel SI in termini **dell'unità di misura Coulomb (C)**. Non è una unità fondamentale (nel campo delle interazioni elettriche quella fondamentale è Ampere, l'unità di misura della corrente).

La **carica elementare e** in questo sistema vale **$-1,602176565 \times 10^{-19}$ Coulomb**.

(interessante è vedere che è estremamente piccola, non il suo valore esatto)

L'interazione elettrica

il potenziale elettrico

Quello che succede tra due corpi caricati elettricamente dipende da una interazione chiamata elettrica.

Anche per questa interazione è possibile definire un termine di energia potenziale nell'espressione dell'energia totale di un sistema meccanico:

$$U_{\text{elettrico}}$$

dipendente dalla posizione del corpo considerato.

A differenza dei casi visti in precedenza però $U_{\text{elettrico}}$ può essere estremamente complesso da scrivere formalmente.

Non tanto perché l'interazione sia complessa in sé per sé (è descritta dalla **legge di Coulomb**, che è relativamente semplice) ma perché i particolari dipendono dalla forma della distribuzione delle cariche esterne con cui il corpo interagisce, che può essere molto complessa).

A parte casi particolari, ciò in generale costituisce un problema estremamente complesso.

Una proprietà dell'energia potenziale elettrica è però facilmente esprimibile: l'effetto dell'interazione elettrica su un corpo carico, a parità delle cariche esterne, è tanto maggiore quanto maggiore è la carica Q posseduta dal corpo.

Questa correlazione positiva tra carica Q ed effetto della interazione elettrica si traduce in una relazione di proporzionalità tra $U_{elettrico}$ e Q

$$U_{elettrico} \propto Q$$

Per tenere conto di questa proporzionalità, viene definita una nuova grandezza, chiamata **potenziale elettrico** V

$$V = U_{elettrico}/Q$$

Nel Sistema Internazionale il valore del potenziale viene espresso in Joule/Coulomb, una unità che assume anche il nome di **Volt**.

V dipende dalla posizione del corpo e dalla distribuzione complessiva delle cariche esterne, ma non dalla carica specifica posseduta dal corpo.

Quindi, per una certa distribuzione di cariche esterne, il valore di ottenuto in qualche modo per un corpo di carica Q , vale per qualsiasi corpo con qualsiasi carica Q' posseduta.

Esaminiamo ora in maniera qualitativa cosa ci dice il principio di conservazione di energia.

L'energia totale di un sistema sottoposto ad interazione elettrica, in assenza di altre interazioni, può essere scritta come

$$E = Q V + K(v)$$

(ci possono essere dei termini che tengono conto di effetti dissipativi, simili a quelli dovuti all'attrito. In questo caso però, se partiamo con cariche in quiete, sono trascurabili almeno negli istanti iniziali del moto)

Partendo da quiete, la conservazione dell'energia ci dice

$$0 = \Delta E = \Delta(Q V + K(v)) = Q \Delta V + K_{fin}$$

(perché l'energia cinetica iniziale è nulla). Il moto avviene nel verso che permette di avere un valore positivo di energia cinetica e quindi deve essere

$$Q \Delta V < 0$$

Cioè una **carica positiva si muove da una posizione a potenziale elettrico maggiore ad una minore, e viceversa per un elettrone** (carica negativa)

Esaminiamo ora una delle situazioni che abbiamo visto con l'elettroscopio: quella in cui l'elettroscopio inizialmente neutro elettricamente viene avvicinato da un corpo carico negativamente.

Poiché in questa situazione, si ha un movimento di elettroni verso le lamelle, significa che il corpo esterno carico negativamente ha reso la situazione delle lamelle a potenziale elettrico maggiore rispetto a quello del terminale (le cariche negative si muovono da una posizione a potenziale minore ad una a potenziale maggiore)



Quando poi il flusso di elettroni si ferma, il potenziale elettrico sulle lamelle deve essere uguale a quello sul terminale dell'elettroscopio.

Questo perché, se ci fosse una differenza, gli elettroni migrerebbero in una direzione oppure in quella opposta.

Questo è un risultato generale:

In un materiale metallico, in assenza di spostamenti di cariche, il potenziale elettrico è lo stesso su tutto il volume del materiale.



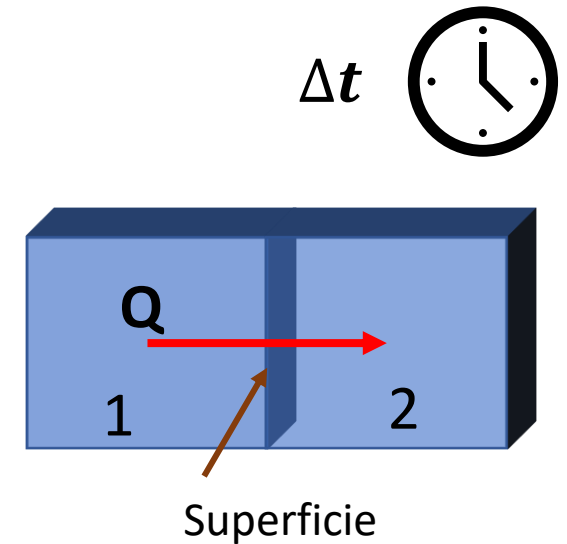
La corrente elettrica

Esaminando il funzionamento dell'elettroscopio abbiamo visto come un concetto importante coinvolto è il flusso di carica realizzato dal moto complessivo degli elettroni nel metallo.

Una caratterizzazione quantitativa del flusso di carica può essere fatta introducendo il concetto di **corrente elettrica**.

Supponiamo che una quantità di carica Q si sposti dal volume 1 al volume 2 di figura, attraversando la superficie di separazione in un intervallo di tempo Δt : chiameremo corrente elettrica I attraverso tale superficie la grandezza definita dal rapporto

$$I = Q / \Delta t$$



Nel Sistema Internazionale l'unità di misura con cui viene espresso il valore della corrente elettrica è l'**Ampere**.

È l'unità di misura fondamentale per i fenomeni elettrici: vedremo la sua definizione formale più avanti, quando parleremo di circuiti elettrici e delle grandezze che caratterizzano il loro funzionamento.

Dal punto di vista delle unità di misura, Ampere, Coulomb e Volt sono legate fra di loro nel seguente modo

- 1 Coulomb è la quantità di carica che fluisce in 1 secondo per correnti di 1 Ampere
- Volt Ampere risulta essere una unità di misura derivata del tipo

$$\text{Volt Ampere} = (\text{Joule/Coulomb}) \text{ Ampere} =$$

$$\text{Joule} / (\text{Ampere secondo}) \text{ Ampere} = \text{Joule/secondo}$$

Joule/secondo è l'unità di misura (comunemente chiamata **Watt**) della grandezza fisica **potenza**. Vedremo come tale grandezza sia importante nell'analisi dei circuiti elettrici.

In questa slide ci limiteremo a segnalare una curiosità: l'unità Volt Ampere ora (o un suo sottomultiplo, Volt milliAmpere ora) viene usata per caratterizzare la capacità di immagazzinamento di energia di una batteria ricaricabile ($1 \text{ V mA h} = 3.6 \text{ Joule}$)

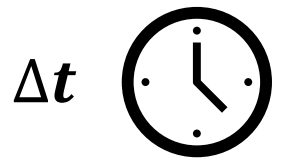
La conservazione della carica elettrica e l'equazione di continuità

Nella discussione che abbiamo fatto sul funzionamento dell'elettroscopio abbiamo utilizzato una ipotesi sottintesa: che la carica netta in un punto qualsiasi dello strumento può variare solo se c'è un flusso di cariche in ingresso (o in uscita) nel volume considerato.

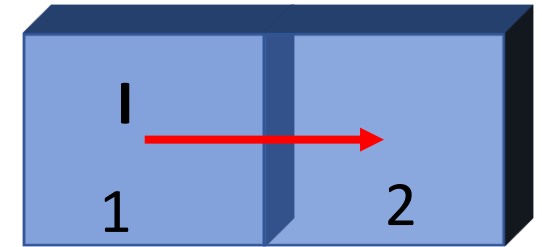
Ciò è conseguenza di un **principio** della fisica: **la carica netta di un sistema isolato** (cioè che non ha interazioni con l'ambiente esterno) **si conserva**.

Si possono generare (creare) cariche positive ma nel processo vengono create anche cariche negative, in maniera che il bilancio complessivo sia nullo.

Questo può essere fatto separando cariche positive e negative preesistenti (come nel caricamento per strofinio) oppure creando nuove particelle (ad esempio creando nuovi elettroni). Nel secondo caso (che coinvolge energie estremamente elevate) però nel processo vengono create anche particelle di carica opposta ed il bilancio della carica netta rimane invariato.



L'unico modo per fare variare la quantità di carica netta in un certo volume di spazio è quello di far fluire (in ingresso o in uscita) delle cariche attraverso la superficie che delimita tale volume.



Nell'esempio che abbiamo visto in precedenza, ciò significa fare entrare una corrente I attraverso la superficie che racchiude il volume 2, in maniera tale che la carica Q_2 in essa contenuta vari della quantità

$$\Delta Q_2 = I \Delta t$$

Questa relazione è una prima forma della **legge di conservazione della carica**, espressa come un'**equazione**, detta **di continuità**, di bilancio tra le correnti entranti in un volume e la variazione della carica netta in esso contenuta.

Per precisare meglio la legge della conservazione della carica dobbiamo generalizzarne l'espressione.

Supponiamo che attraverso la superficie che delimita un volume nello spazio fluiscano un certo numero di correnti I_i : considereremo queste correnti in valore positivo se tendono a fare aumentare il valore della carica contenuta nel volume, negativo in caso contrario.

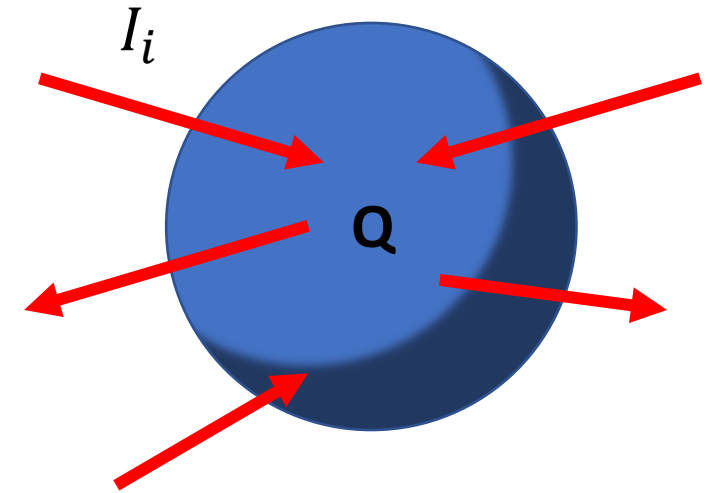
Il bilancio dei flussi di carica nel volume risulta così

$$\sum I_i \Delta t = \Delta Q$$

oppure

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \sum I_i$$

Cioè la variazione nel tempo della carica contenuta in un volume è pari alla somma algebrica delle correnti (cioè, tenendo conto del segno associato al fatto se la corrente è entrante oppure uscente dal volume).



La conduzione elettrica nei materiali

una esplorazione fenomenologica

Nell'analisi delle correnti circolanti nell'elettroscopio, abbiamo considerato quelle attraverso l'asta metallica che connette il terminale di contatto esterno con le lamelle.

Nel video però non sono i soli fenomeni di circolazione di correnti in un metallo: ad esempio, quando lo sperimentatore tocca il punto di contatto, vi è una corrente circolante anche nel suo corpo.

Alla fine del video vi è poi l'avvertimento che l'esperimento non funziona bene quando l'umidità dell'aria è troppo elevata.

La ragione è che anche l'aria può condurre delle correnti elettriche, mediante il movimento di molecole cariche (ioni): le molecole di acqua eventualmente presenti si ionizzano (si caricano elettricamente) in maniera relativamente facile e quindi contribuiscono grandemente al flusso di cariche da o per il terminale e le lamelle, scaricandole.

Quest'ultimo fenomeno è ancora più evidente nella formazione degli archi voltaici: tra due terminali metallici isolati con l'aria, posti ad una differenza di potenziale estremamente elevata, può scoccare una scarica.

Su distanze tra i terminali non troppo grandi, questo fenomeno si osserva per differenze di potenziale di svariate migliaia di Volt (chilo Volt, o KV).

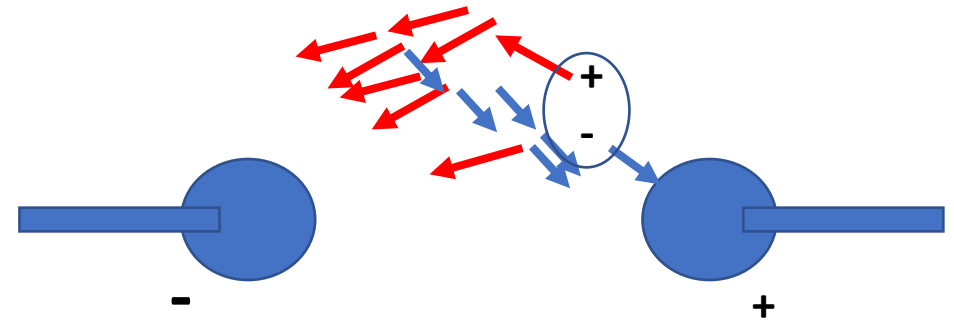


La scarica viene generata dagli ioni naturalmente presenti nell'aria, che vengono accelerati a causa della differenza di potenziale esistente tra i due terminali.

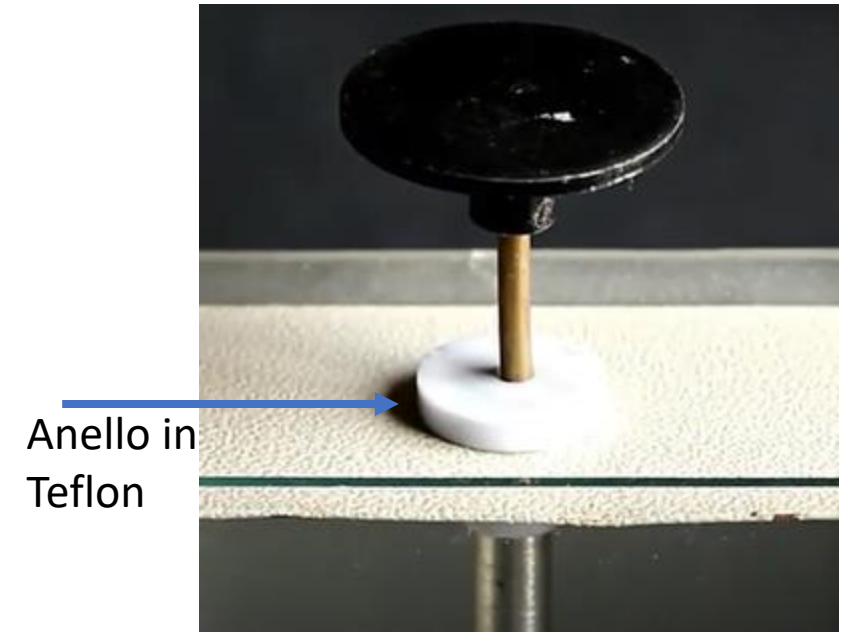
Se acquisiscono sufficiente energia cinetica, nell'urto con altre molecole dell'aria gli ioni generano altre coppie di ioni positivi e negativi. I nuovi ioni, migrando verso i terminali a potenziale opposto al segno della propria carica, accelerano e negli urti successivi creano nuove coppie di ioni.

Il numero di ioni che si muovono cresce così esponenzialmente, permettendo la circolazione di correnti estremamente elevate tra i due terminali.

(la luce prodotta nella scarica è dovuta a parte dell'energia scambiata nell'urto, che eccita gli ioni e successivamente viene rilasciata sotto forma appunto di luce)



Ritorniamo all'elettroscopio: l'asta di ottone penetra nella cassa dello strumento attraverso un anello di teflon, che assicura l'isolamento elettrico dell'asta dalla cassa: nel teflon non può circolare corrente, è un **materiale isolante**.



In realtà questa affermazione è vera solo approssimativamente: vi sono correnti circolanti ma sono di intensità svariati ordini di grandezza inferiori a quelle che si hanno in un metallo, a parità di differenza di potenziale, e quindi trascurabili nelle considerazioni sul funzionamento dello strumento.

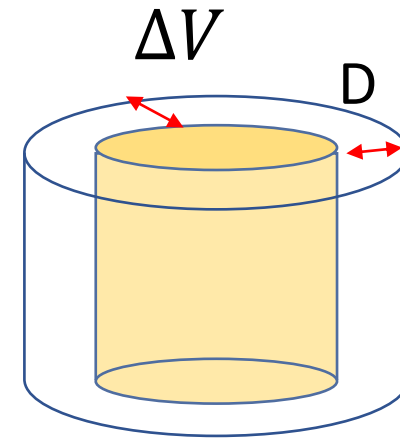
Un materiale isolante è costituito da atomi i cui elettroni sono per la maggior parte strettamente legati agli atomi a cui appartengono: non sono disponibili per la conduzione di una corrente elettrica.

Una frazione molto piccola degli elettroni però riesce a «liberarsi» dall'atomo ed è disponibile alla conduzione (elettroni di conduzione). Questa frazione cresce all'aumentare della temperatura del materiale (è come se l'energia termica contribuisce in misura crescente alla ionizzazione del materiale), aumentando quindi le cariche libere capaci di condurre corrente.

Anche per un materiale isolante come il teflon esiste il fenomeno di scarica, che abbiamo visto nel caso dell'aria.

Se la differenza di potenziale tra l'interno e l'esterno dell'anello supera un certo limite, gli elettroni di conduzione, negli urti con gli atomi possono produrre ionizzazione ed innescare un processo di valanga nella creazione di nuovi elettroni di conduzione.

Questo innesca un enorme aumento della corrente (scarica). Tale scarica è tipicamente distruttiva per il materiale.

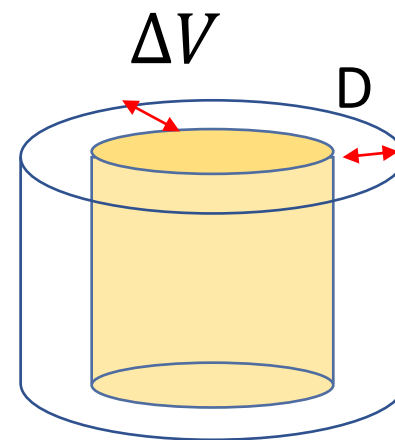


Un parametro importante per valutare se in un isolante si può avere una scarica è il rapporto

$$\Delta V / D$$

ove D è lo spessore attraverso il quale la corrente elettrica deve fluire.

Per spessori D sufficientemente piccoli questo rapporto approssima bene il valore di una grandezza fisica di tipo elettrico, l'**intensità del campo elettrico**.



Se il campo elettrico in un punto del materiale supera un valore critico di soglia (chiamato **rigidità dielettrica** del materiale) si innesca la scarica.

La rigidità dielettrica viene espressa in unità Volt/metro o, più comunemente a causa del suo alto valore per i materiali isolanti, kV/mm (chilo Volt per millimetro).

La rigidità dielettrica nei due casi di scarica visti risulta essere

aria \cong 3 kV / mm

Teflon \cong 20 kV / mm