

FISICA

ElettroMagnetismo

LA CORRENTE ELETTRICA
NEI METALLI

Autore: prof. Pappalardo Vincenzo

docente di Matematica e Fisica

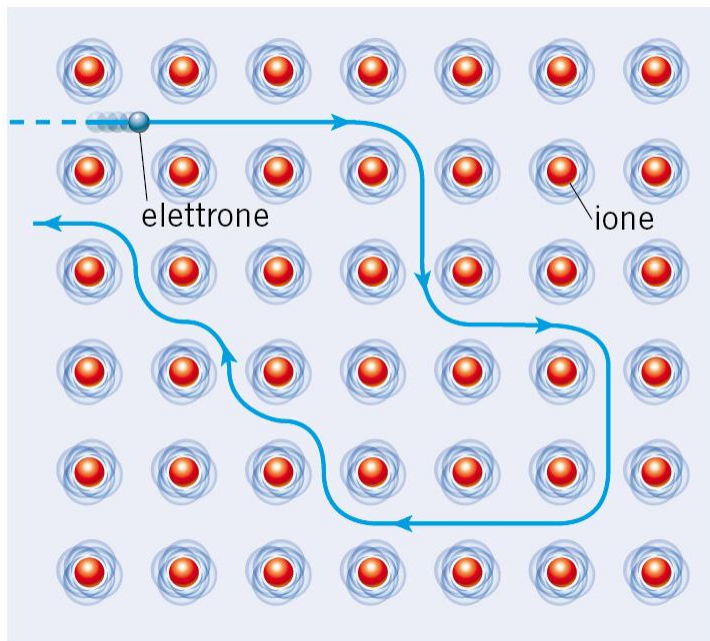


I CONDUTTORI METALLICI

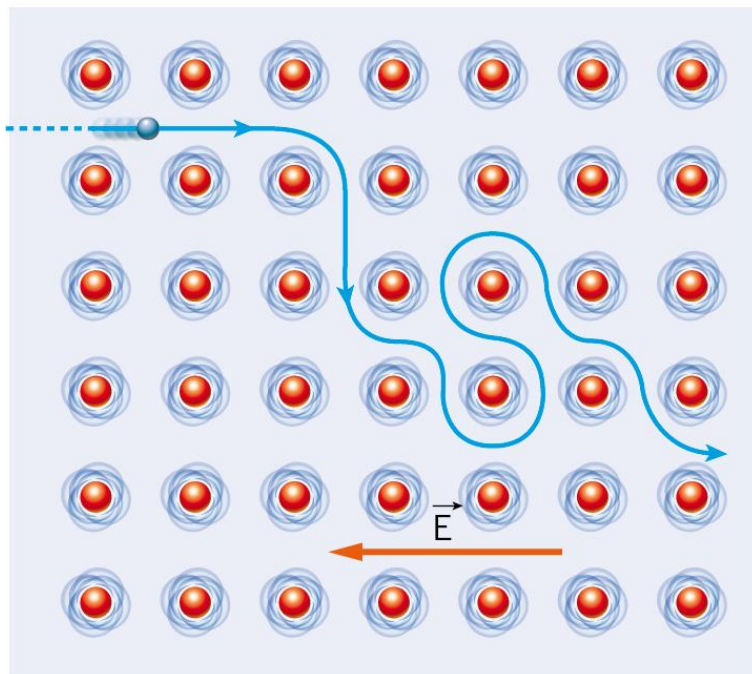
Riprendiamo alcuni concetti, ed approfondiamoli.

I metalli hanno una struttura molecolare ben definita, il **reticolo cristallino**, costituita da ioni positivi.

Nei metalli le cariche in movimento sono gli **elettroni di conduzione**.



Il **moto di agitazione termica** porta gli elettroni a muoversi in modo caotico in tutte le direzioni. *Lo spostamento medio è nullo e non crea nessuna corrente elettrica.*



Se si applica una differenza di potenziale, all'interno del conduttore si stabilisce un campo elettrico **E** e gli elettroni si dirigono verso il polo positivo, nel verso opposto a quello di **E**

*Diciamo allora che il conduttore è percorso da **una corrente elettrica**.*

Gli elettroni che formano la corrente elettrica si muovono tutti con la seguente velocità, chiamata **velocità di deriva**.

Si dimostra che tale velocità è legata alla corrente elettrica dalla seguente relazione:

$$i = enAv_d$$

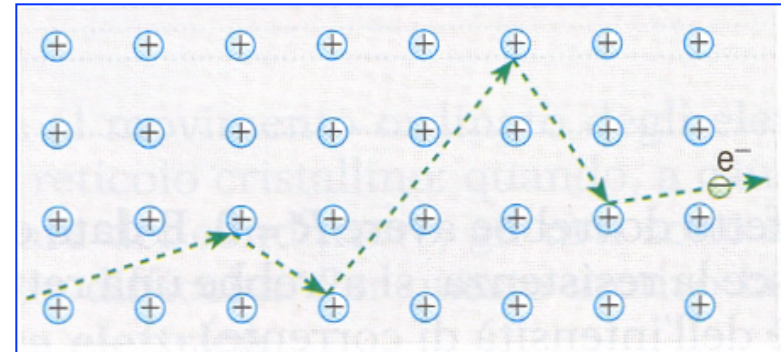
e =carica elementare; n =numero di elettroni di conduzione per unità di volume; A =sezione trasversale del filo conduttore; v_d =velocità di deriva

- In assenza di campo elettrico, $v_d=0$ e quindi $i=0$
- In presenza di campo elettrico, $v_d \approx 10^{-4}$ m/s e quindi $i \neq 0$

Questo modello spiega molto bene **l'effetto Joule**.

SPIEGAZIONE – Nel generatore gli elettroni acquistano energia potenziale.

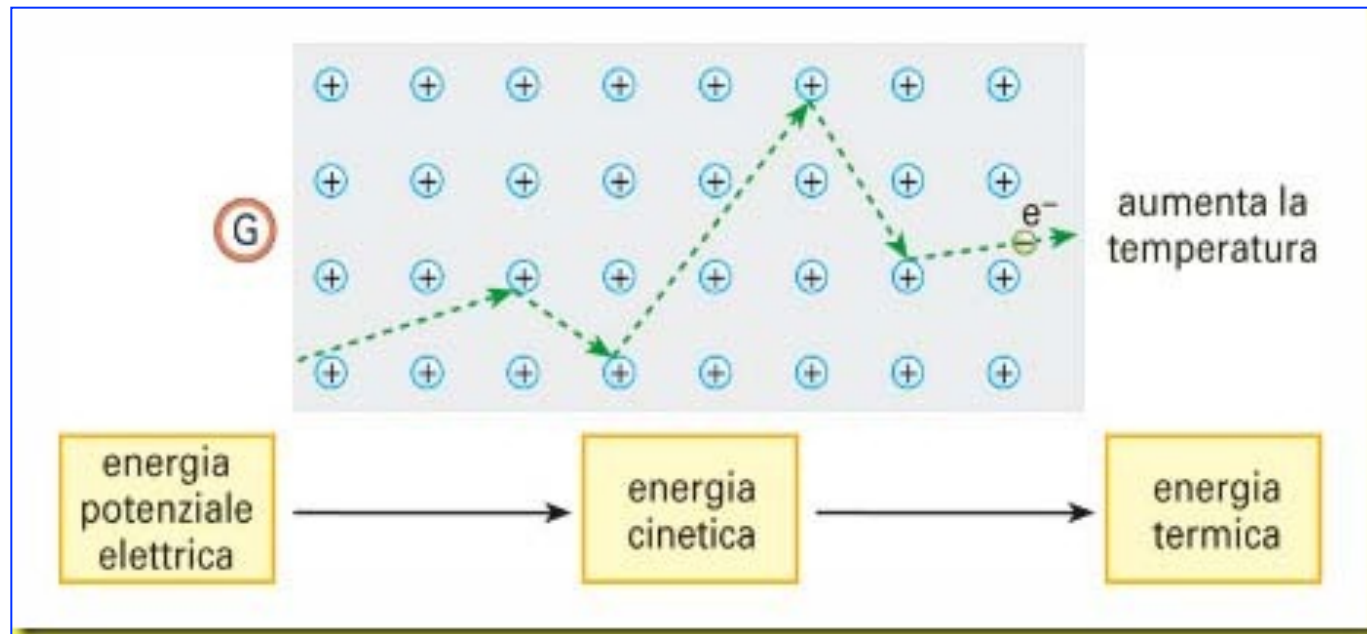
Nel circuito elettrico, a causa del campo elettrico, si mettono in movimento, per cui la loro energia potenziale inizia a trasformarsi in energia cinetica.



Considerata la struttura del conduttore, dopo un percorso più o meno breve essi urtano contro gli ioni del reticolo cristallino, i quali accrescono così la loro energia di oscillazione a scapito di quella degli elettroni.

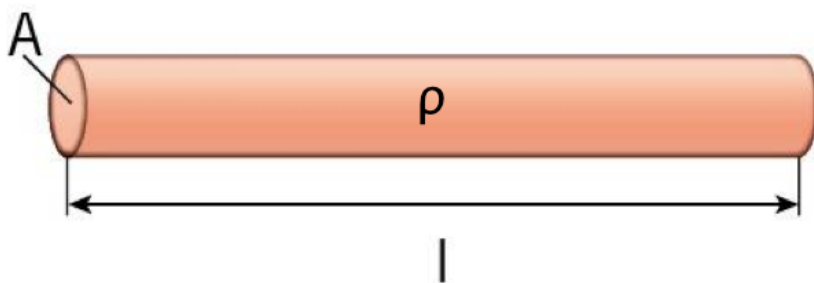
Gli elettroni, la cui velocità dopo l'urto è diminuita, vengono nuovamente accelerati dal campo elettrico: il processo si ripete.

Tali eventi, che a livello microscopico provocano un aumento dell'energia cinetica media di oscillazione degli ioni del reticolo, equivalgono a livello macroscopico a un innalzamento della temperatura del conduttore.



SECONDA LEGGE DI OHM

Stabilito che ogni conduttore ha una propria resistenza elettrica (1° legge di Ohm), si pone il problema di determinare da quali parametri dipenda:

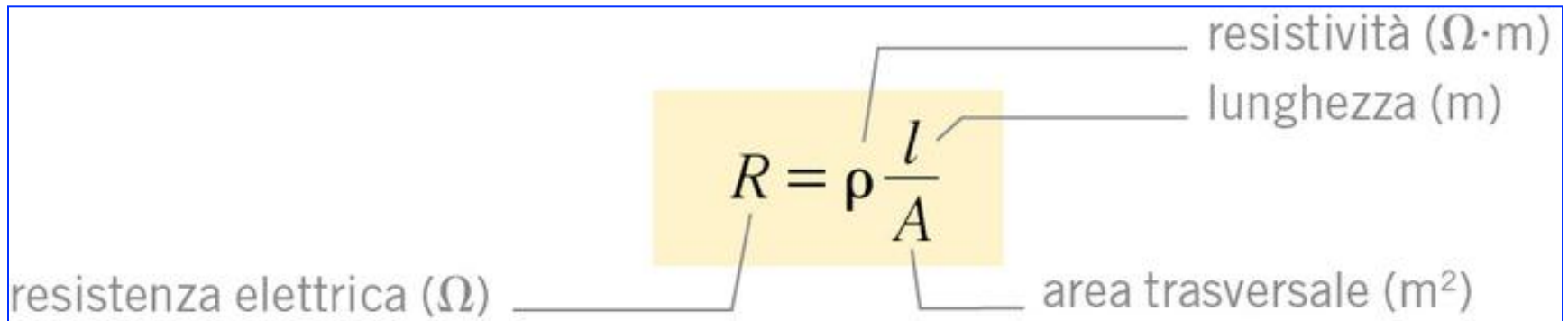


- Caratteristiche fisiche del materiale (tipo di materiale) attraverso la costante ρ (resistività)
- Caratteristiche geometriche (lunghezza e sezione del filo)

La dipendenza della resistenza da queste caratteristiche è contenuta nella seguente legge:

SECONDA LEGGE DI OHM

La resistenza di un filo conduttore è direttamente proporzionale alla lunghezza L e inversamente proporzionale alla sezione S :



The diagram shows the formula $R = \rho \frac{l}{A}$ centered within a light yellow rectangular box. Four leader lines extend from the text labels to the variables in the formula: one from 'resistenza elettrica (Ω)' to 'R', one from 'resistività ($\Omega \cdot m$)' to ' ρ ', one from 'lunghezza (m)' to 'l', and one from 'area trasversale (m^2)' to 'A'.

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

resistenza elettrica (Ω) resistività ($\Omega \cdot m$)
lunghezza (m)
area trasversale (m^2)

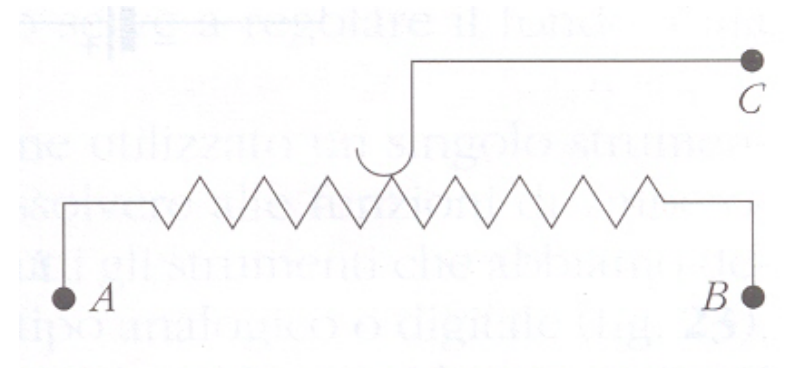
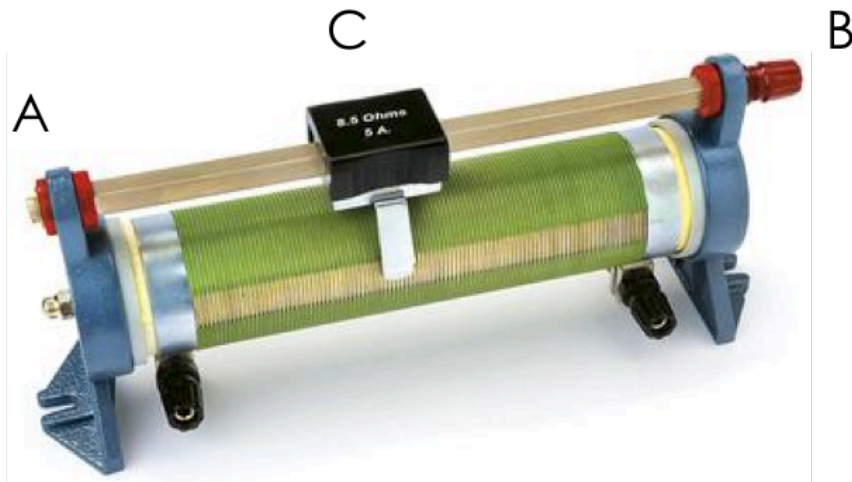
Ogni materiale è caratterizzato da un determinato valore della resistività. Di seguito riportiamo i valori di alcune sostanze.

Conduttore	Resistività ρ (Ω m)
Argento	$1,6 \cdot 10^{-8}$
Rame	$1,7 \cdot 10^{-8}$
Alluminio	$2,8 \cdot 10^{-8}$
Platino	$1,0 \cdot 10^{-7}$
Ferro	$1,3 \cdot 10^{-7}$
Acciaio	$1,8 \cdot 10^{-7}$
Costantana	$4,9 \cdot 10^{-7}$
Germanio	$1 \cdot 10^{-3} - 0,5^*$
Silicio	$20 - 2000^*$

Argento Rame Nichel	Mercurio	Germanio Selenio	Ossido di rame	Boro	Celluloide Mica Vetro Quarzo Porcellana	Ambra	Paraffina		
10^{-8}	10^{-5}	10^{-2}	10	10^4	10^7	10^{10}	10^{13}	10^{16}	10^{19}
Conduttori			Semiconduttori			Isolanti			

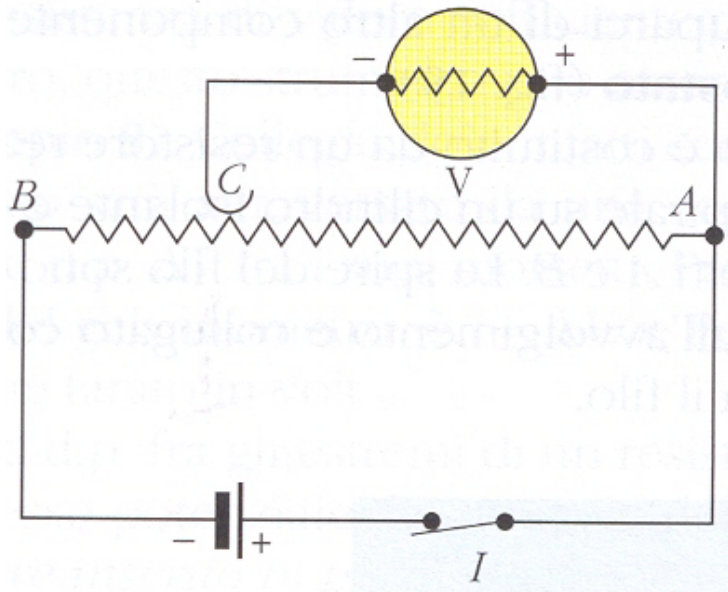
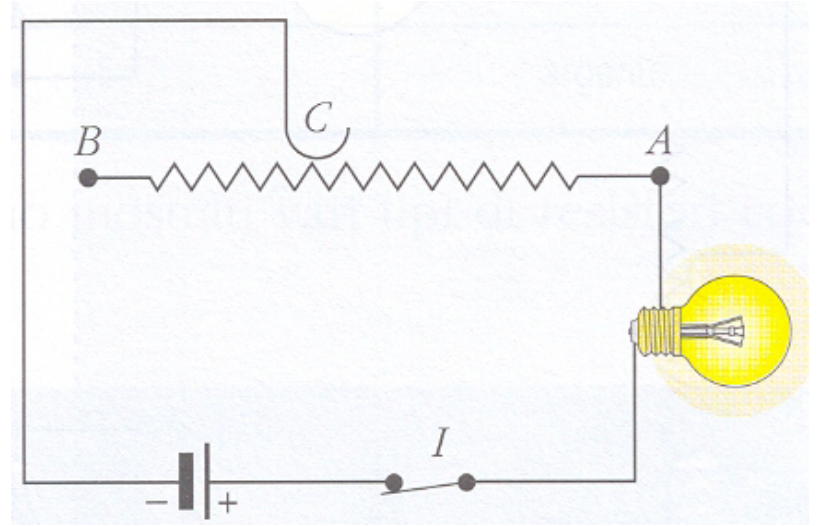
Reostato

Utilizzando la 2° legge di Ohm, possiamo costruire un resistore a resistenza variabile (**reostato**).



I morsetti A e B sono *fissi*, mentre il morsetto C, a contatto con il filo, è variabile.

Reostato come resistenza variabile: spostando il cursore da B ad A, la resistenza inserita nel circuito varia dal massimo valore (lampadina spenta), a zero (massima luminosità).



Reostato come potenziometro: spostando il cursore da A a B, il voltmetro segna una tensione crescente da zero a un valore massimo (pari alla fem del generatore).

Infatti, la corrente che attraversa il reostato, di resistenza complessiva R , è:

$$(1) \quad i = \frac{\Delta V_0}{R}$$

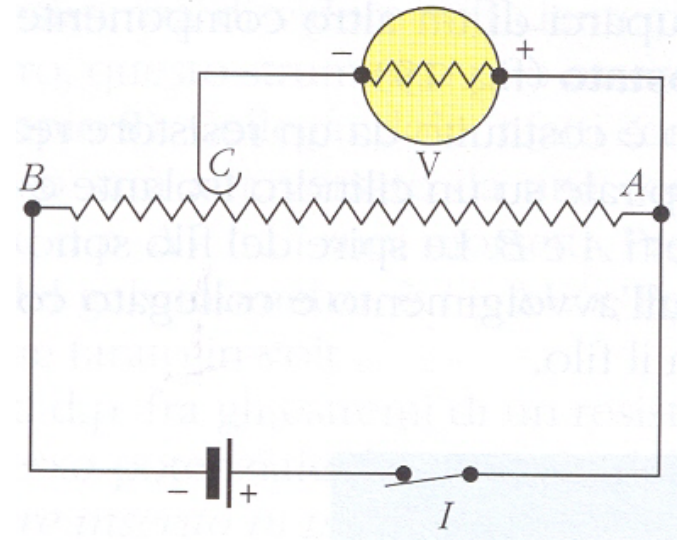
Se indichiamo con R_1 la parte della resistenza compresa fra A e C , la ddp fra gli stessi punti è:

Tenendo conto dell'espressione (1) si ha perciò:

$$\Delta V_1 = iR_1$$

$$\Delta V_1 = \frac{R_1}{R} \Delta V_0$$

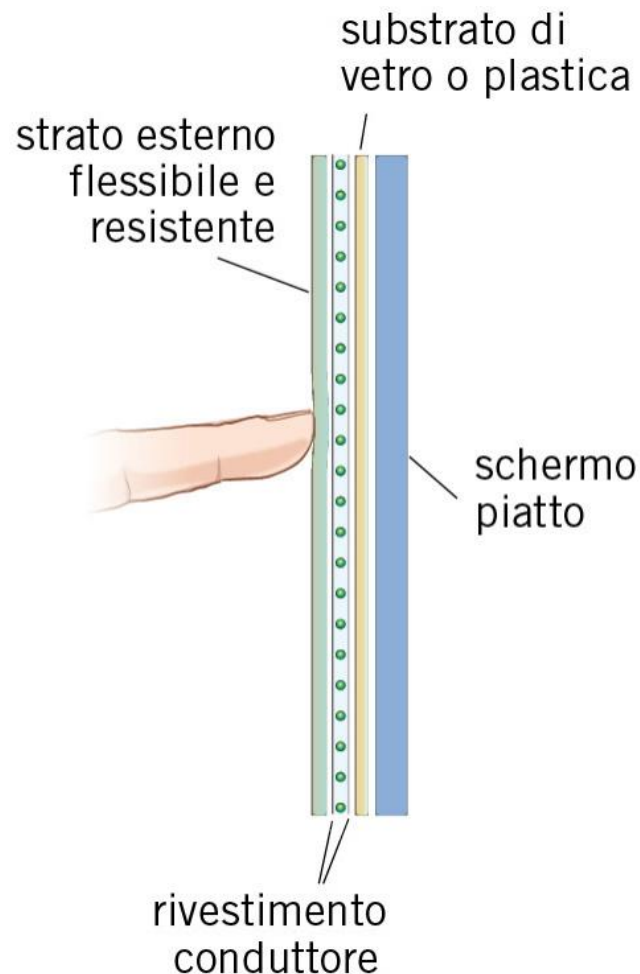
Essendo R_1 compresa fra zero e R , fra i morsetti A e C si può ottenere una tensione variabile fra zero e ΔV_0 , con la quale è possibile alimentare un qualsiasi circuito.



Touch screen resistivo

Quando si preme lo schermo in un punto P, attraverso la misura della ddp che viene a crearsi tra i due conduttori a contatto elettrico, si individua la posizione del punto P.

Il software individua così il punto di pressione P sullo schermo (la particolare icona).



DIPENDENZA DELLA RESISTENZA DALLA TEMPERATURA

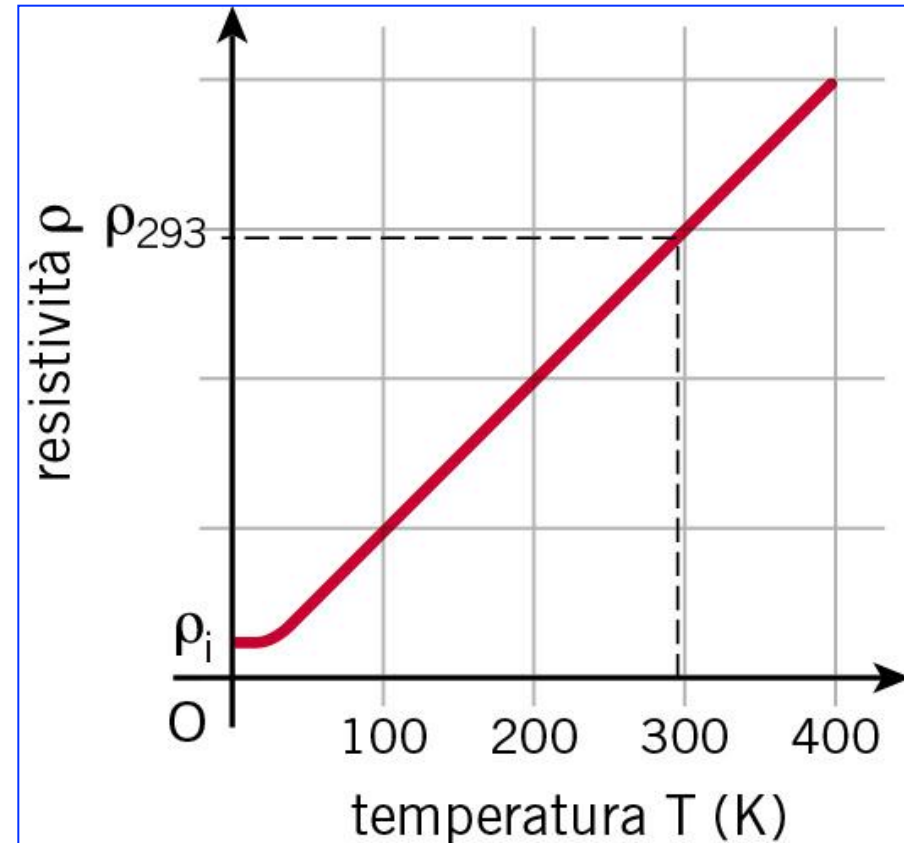
Sperimentalmente si trova che:

Nei metalli la resistività aumenta linearmente con la temperatura:

$$\rho_T = \rho_{293}(1 + \alpha\Delta T)$$

ρ_{293} = resistività a temperatura ambiente

α = coefficiente di temperatura

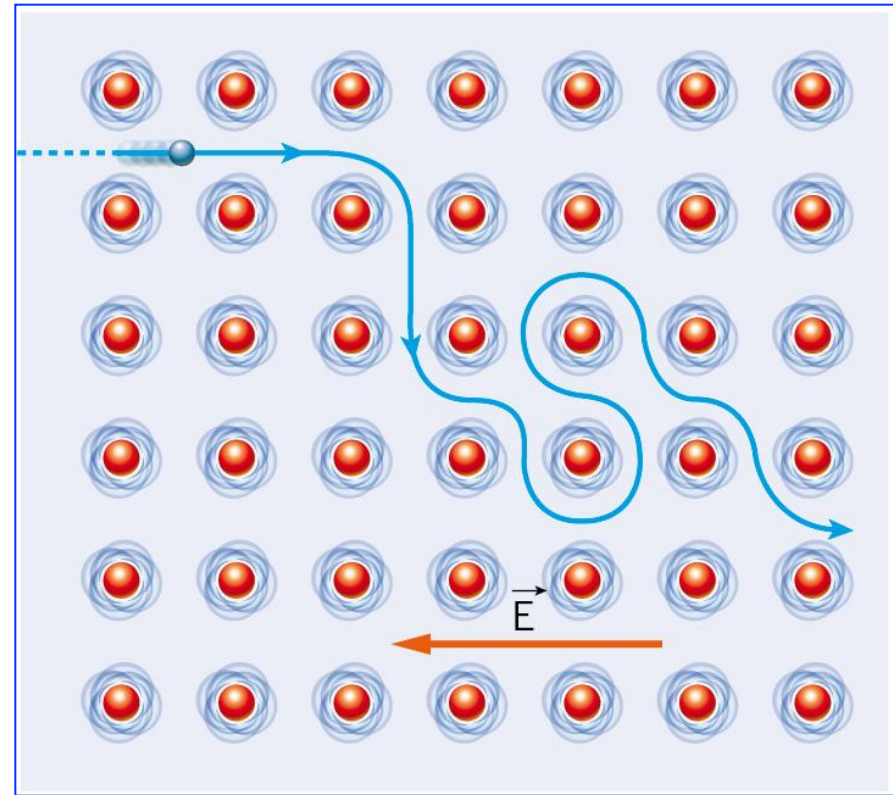


Questa legge è valida da valori di temperatura intorno ai 100K fino a quasi alla temperatura di fusione del metallo.

Conduttore	Resistività ρ (Ω m)	Coefficiente α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
Argento	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$
Rame	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$
Alluminio	$2,8 \cdot 10^{-8}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$
Platino	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$
Ferro	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Acciaio	$1,8 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-3}$
Costantana	$4,9 \cdot 10^{-7}$	$-5 \cdot 10^{-6}$
Germanio	$1 \cdot 10^{-3} - 0,5^*$	-50
Silicio	20-2000*	-70

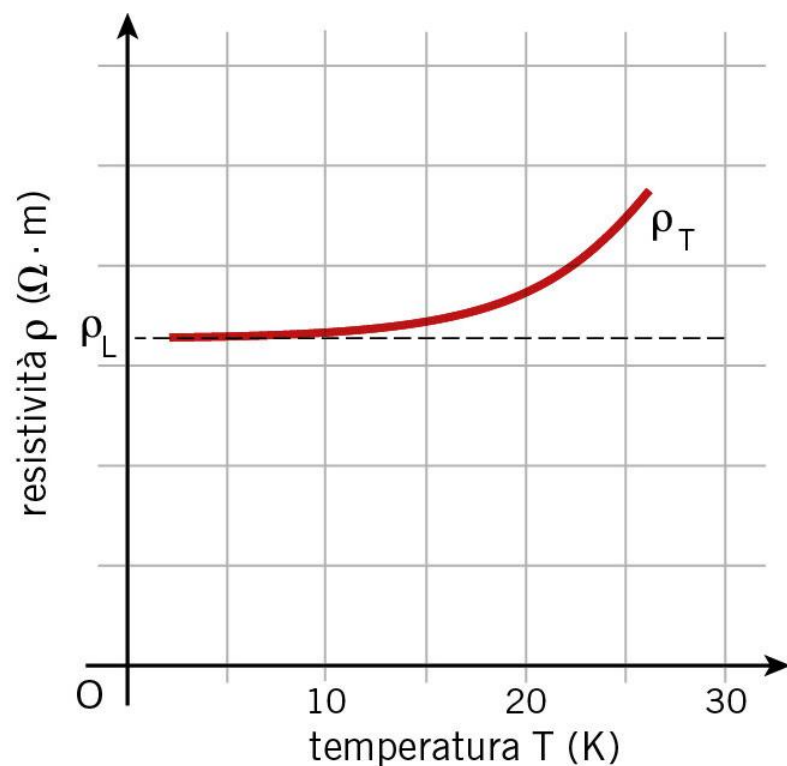
Perché la resistività aumenta con l'aumentare della temperatura?

SPIEGAZIONE – Quando la temperatura del metallo aumenta, gli ioni del reticolo cristallino oscillano più velocemente e in maniera più ampia intorno alle loro posizioni di equilibrio: *aumenta la probabilità degli urti, e quindi la resistenza, tra gli elettroni e gli ioni.*

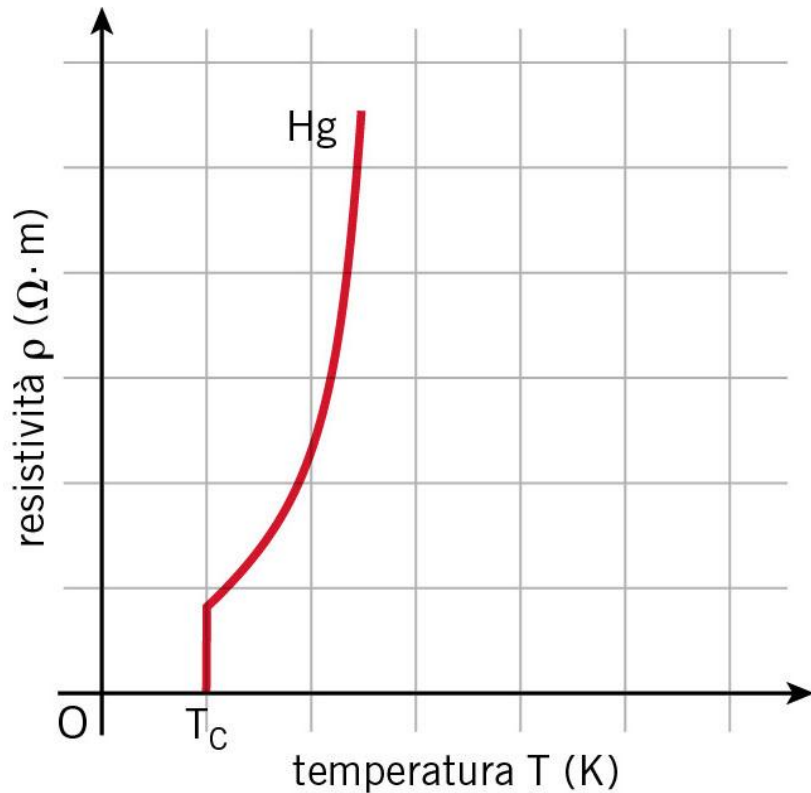


Superconduttori

Al diminuire della temperatura, il comportamento della resistività nei metalli può avere due andamenti diversi:



al tendere di T a zero, la resistività tende a stabilizzarsi e ad assumere un valore limite ρ_L .



a basse temperature, la resistività si annulla bruscamente.

Si chiama **temperatura critica** quella temperatura specifica alla quale la resistività si annulla e si mantiene tale fino alla temperatura assoluta.

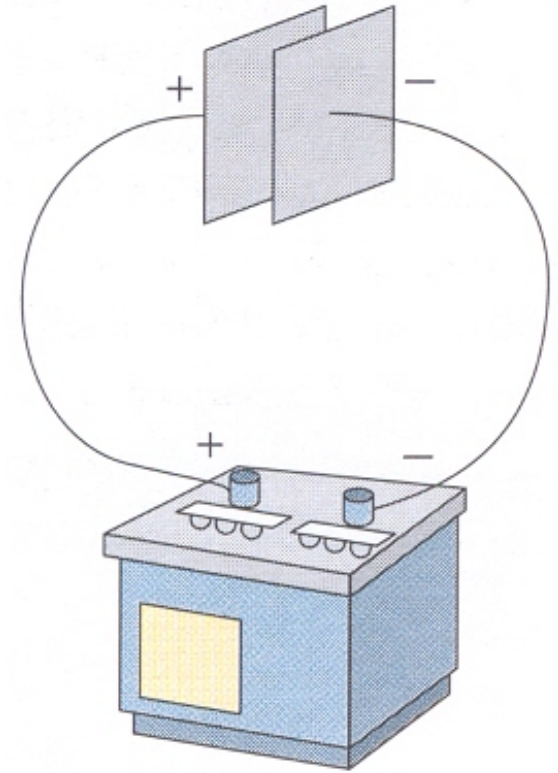
Il fenomeno si chiama **superconduttività** e i materiali **superconduttori**.

CARICA E SCARICA DI UN CONDENSATORE

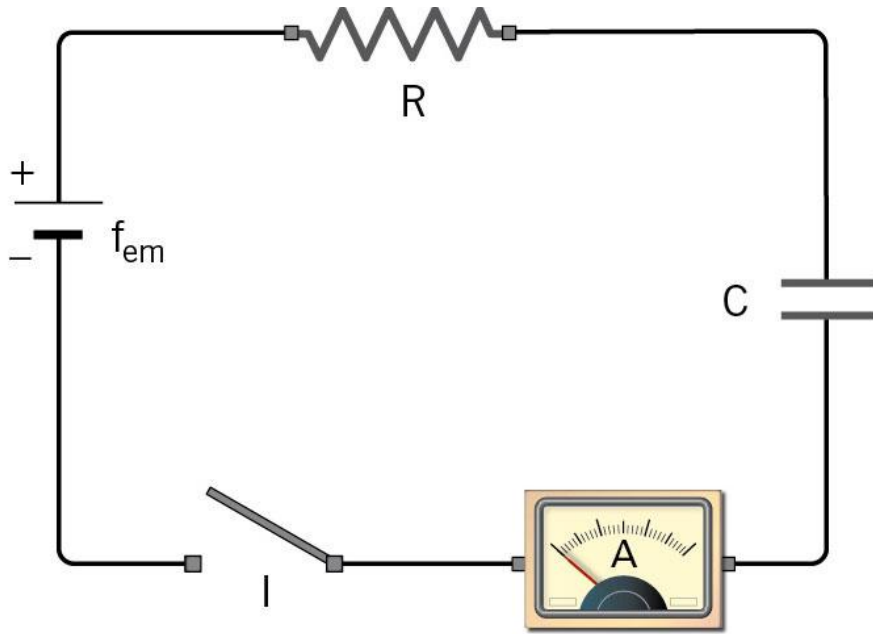
Abbiamo visto che per **caricare** un condensatore, abbiamo bisogno di compiere un lavoro esterno (fatto dal generatore).

Questo lavoro di carica permette di immagazzinare energia elettrica nel condensatore (precisamente nel campo elettrico).

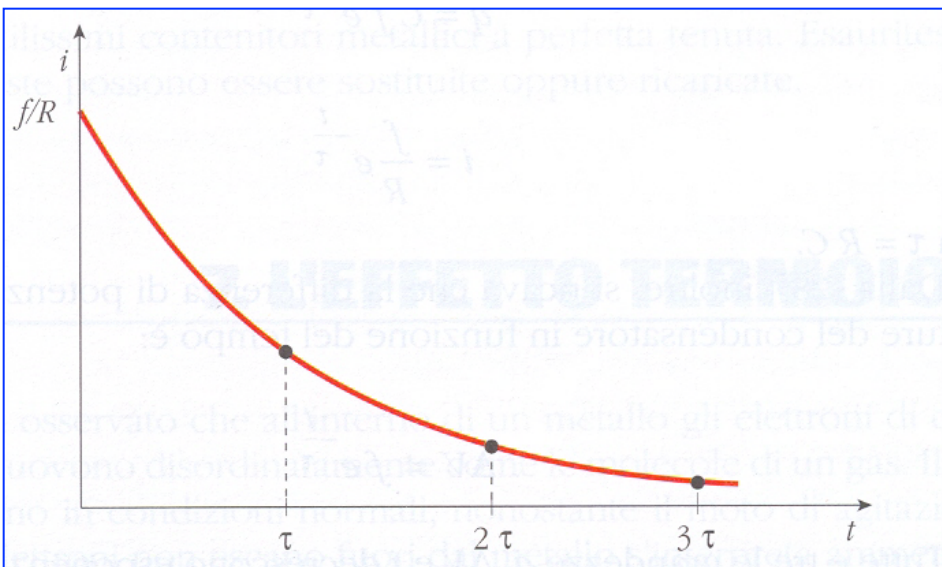
Questa energia rimane immagazzinata fino a quando non decidiamo di utilizzarla attraverso la **scarica** del condensatore.



Processo di carica



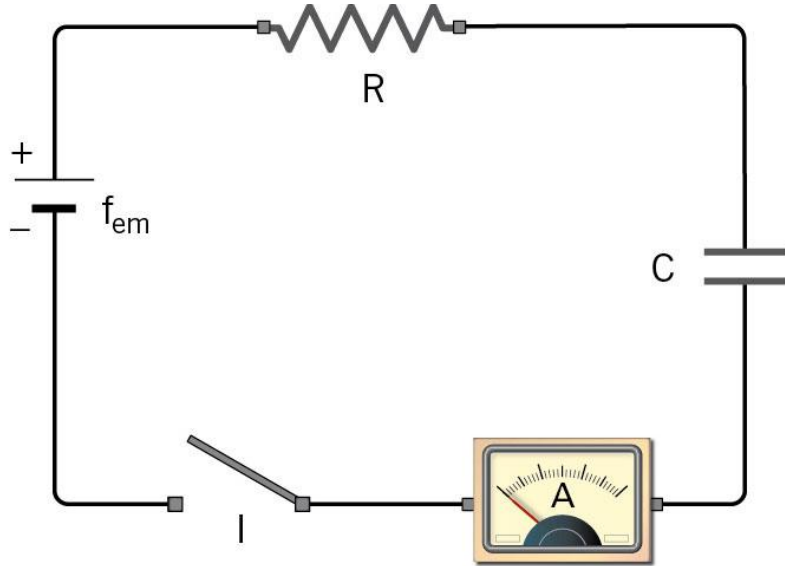
Il condensatore, inizialmente scarico, è collegato attraverso una resistenza al generatore. Il condensatore raggiunge il *valore nominale di carica* Q con un certo ritardo, che dipende dalle caratteristiche del circuito (capacità C e resistenza R).



Con i dati forniti
dall'amperometro,
costruiamo il grafico della
corrente in funzione del
tempo $i=f(t)$.

L'intensità di corrente è massima all'istante iniziale ($i_0=f/R$) e successivamente tende ad annullarsi: all'inizio è facile caricare il condensatore (grande intensità di corrente), ma poi le cariche presenti sulle armature tendono a respingere le cariche dello stesso segno che provengono dal generatore (l'intensità di corrente diminuisce fino ad annullarsi).

Ricaviamo l'espressione matematica che descrive la funzione $i=f(t)$.

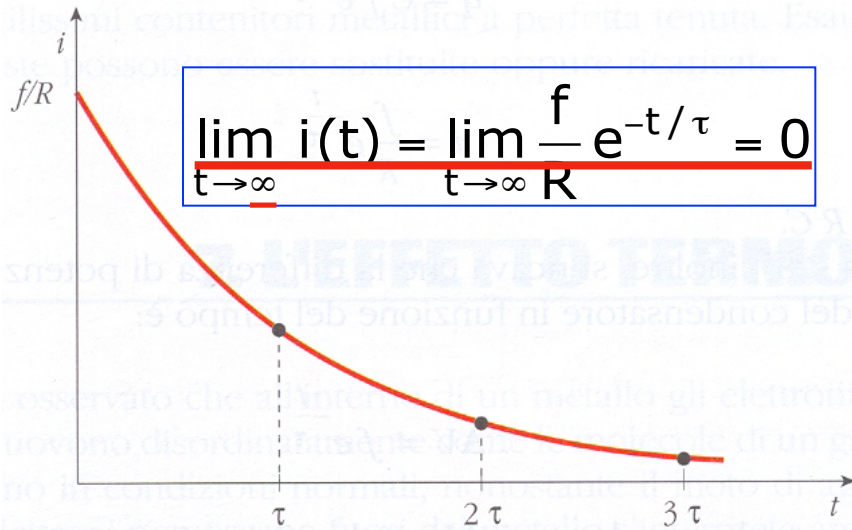


Applicando il 2° principio di Kircchhoff si ottiene la seguente equazione differenziale, un'equazione nella quale l'incognita è una funzione, ossia $i=f(t)$:

$$f - \frac{q}{C} = Ri$$

Facendo uso del calcolo integrale si ottiene la seguente soluzione:

$$\underline{i(t) = \frac{f_{em}}{R} e^{-t/\tau} = i_0 e^{-t/\tau}}$$



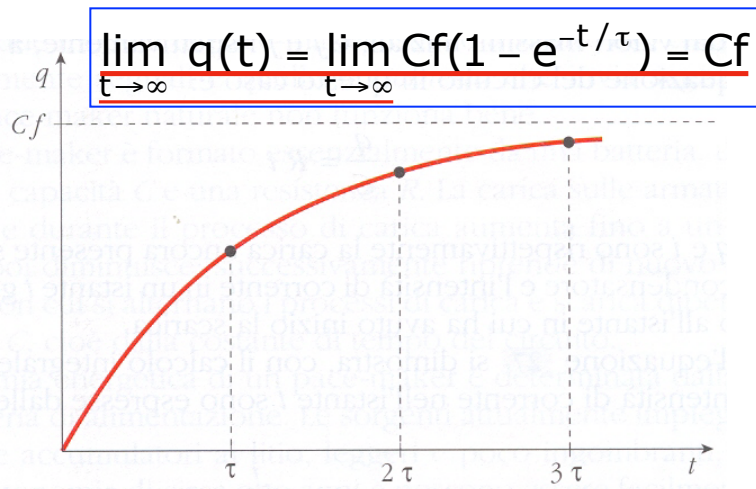
$$i(t) = \frac{f}{R} e^{-t/\tau} = i_0 e^{-t/\tau}$$

L'andamento di $i=f(t)$ è rappresentato da una funzione esponenziale decrescente.

La costante $\tau=RC$ si chiama **costante di tempo**, dipende dalle caratteristiche del circuito (R e C) ed esprime quanto rapidamente il condensatore si carica.

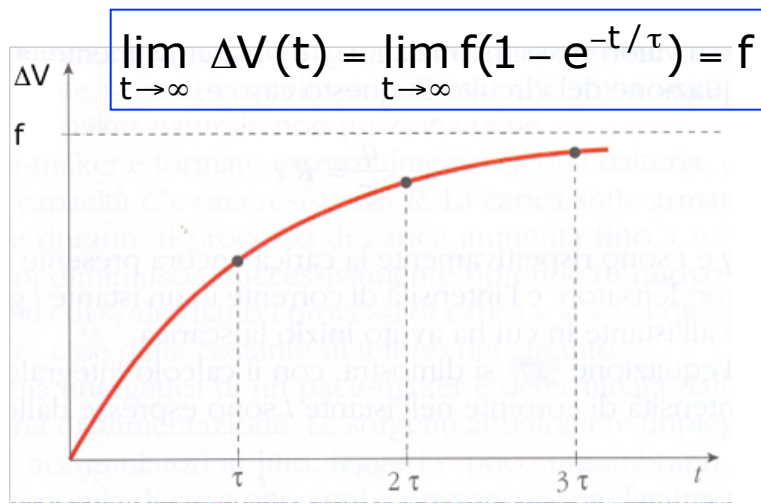
In pratica, dopo un tempo $t \approx 5\tau$ la corrente si può ritenere nulla ed il processo di carica terminato.

La quantità di carica che si accumula sulle armature e la ddp tra le armature assumono le seguenti espressioni:



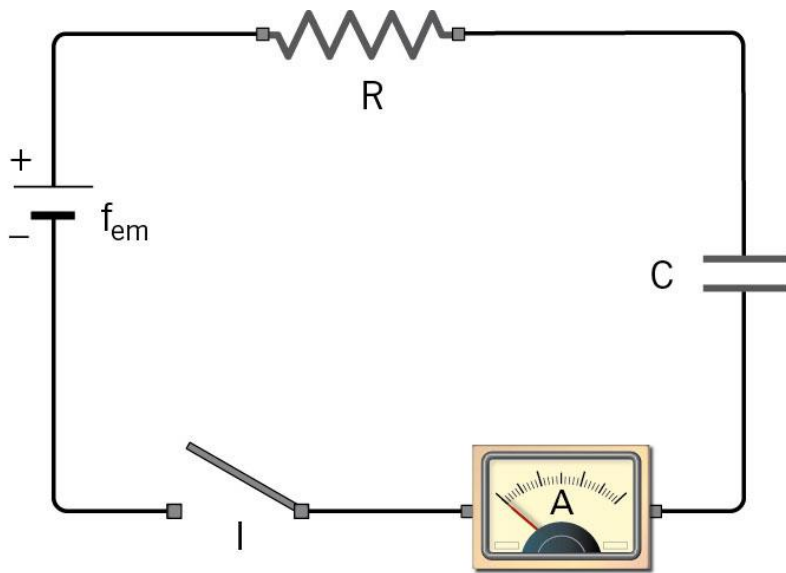
$$q(t) = Cf \left(1 - e^{-t/\tau} \right)$$

Dopo un tempo $t \approx 5\tau$ la quantità di carica sulle armature del condensatore, è massima ed il processo di carica si può ritenere terminato.



$$\Delta V(t) = f \left(1 - e^{-t/\tau} \right)$$

Dopo un tempo $t \approx 5\tau$ la ddp tra le armature del condensatore è pari a quella del generatore per cui il processo di carica si può ritenere terminato.



La corrente erogata dal generatore produce due effetti:

- carica del condensatore C
- effetto Joule in R

Il lavoro di carica del condensatore è:

$$W_C = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} C (f_{em})^2$$

Questo lavoro è fatto dal generatore:

$$W_G = Q\Delta V \xrightarrow{Q=C\Delta V} = C (f_{em})^2$$

Pertanto:

$$W_C = \frac{1}{2} W_G$$

L'altra metà dell'energia erogata dal generatore dove si trova?

Per il principio di conservazione dell'energia, la parte mancante:

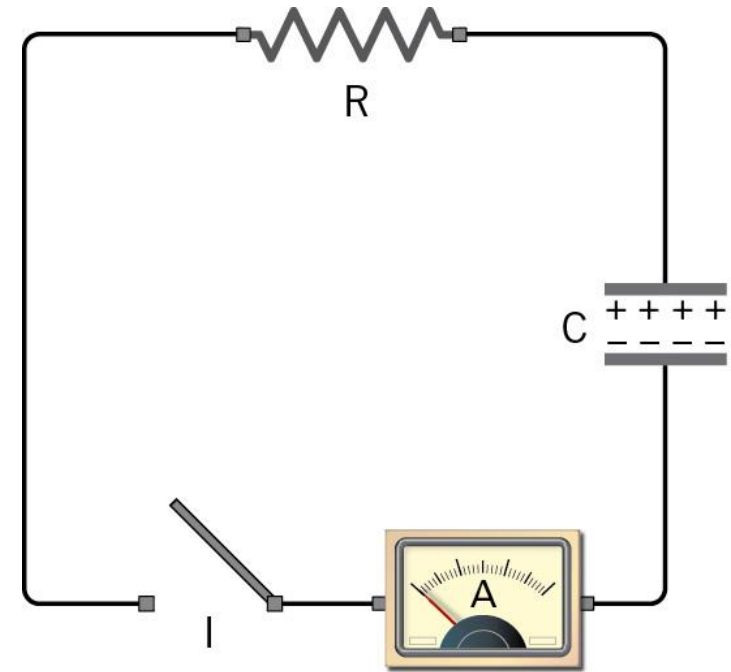
$$W_J = \frac{1}{2} W_G = \frac{1}{2} C (f_{em})^2$$

è stata dissipata per effetto Joule nella resistenza R presente nel circuito:

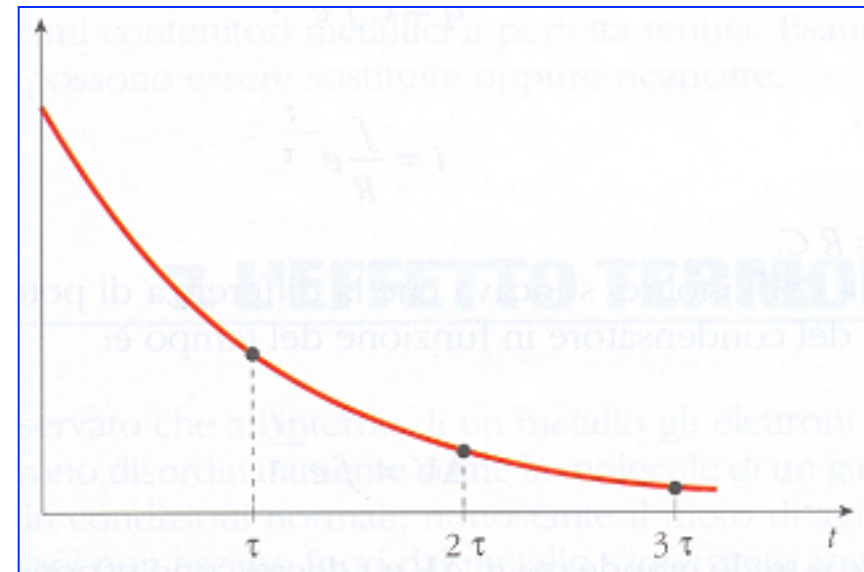
In definitiva: se vogliamo immagazzinare energia in un condensatore, nel processo di carica siamo costretti a dissipare una quantità uguale di energia per effetto Joule.

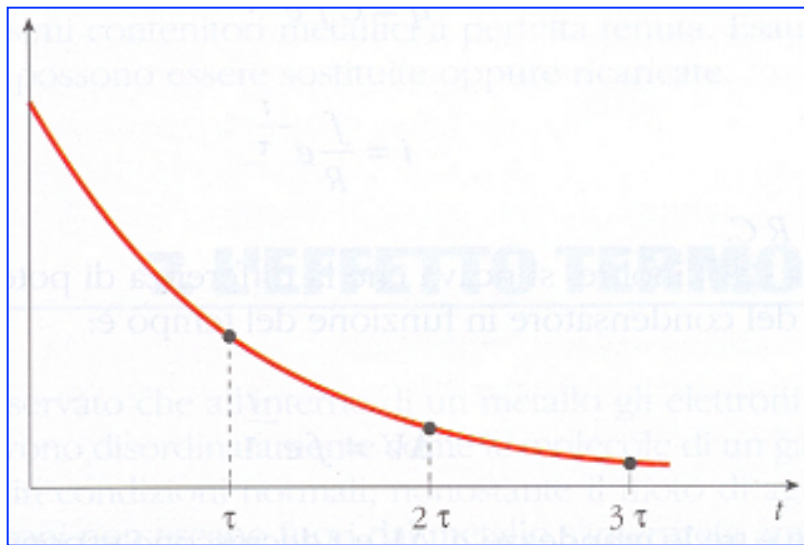
Processo di scarica

Se, dopo aver caricato il condensatore, si disinserisce il generatore dal circuito, il condensatore si scarica sulla resistenza del circuito, dando origine a una corrente d'intensità variabile nel tempo $i=f(t)$.



Con i dati forniti dall'amperometro, costruiamo il grafico della corrente in funzione del tempo $i=f(t)$.

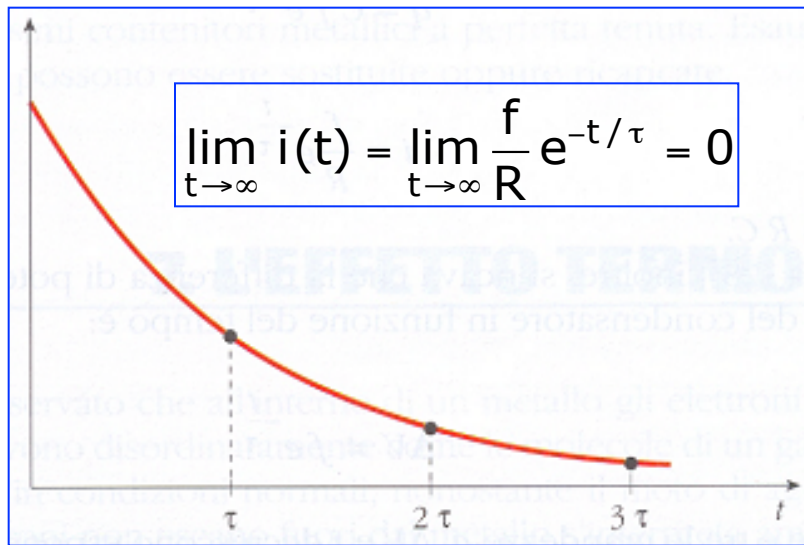




L'andamento dell'intensità di corrente è lo stesso di quello che si ha durante il processo di carica, solo che il verso è l'opposto.

$$i(t) = \frac{f_{em}}{R} e^{-t/\tau} = i_0 e^{-t/\tau}$$

L'intensità di corrente è massima all'istante iniziale: quando chiudiamo l'interruttore, la tensione ai capi del condensatore è pari alla f_{em} per cui la corrente elettrica che si genera è intensa ($i_0 = f_{em}/R$).

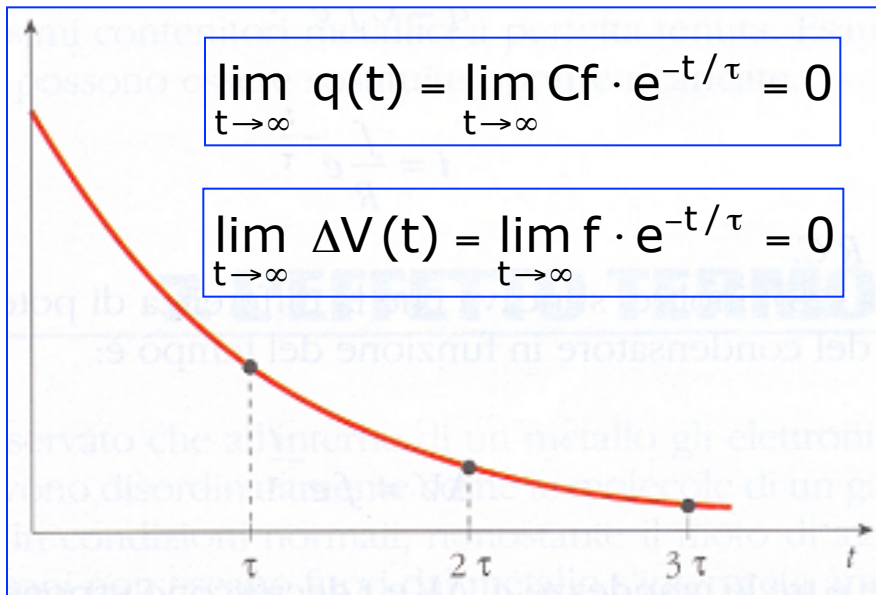


Con il passar del tempo il condensatore si scarica, per cui la ddp fra le sue armature si riduce e quindi la corrente generata tende ad annullarsi.

Anche il processo di scarica si può ritenere terminato dopo un tempo $t \approx 5\tau$.

Alla fine del processo di scarica, l'energia W_C immagazzinata nel condensatore viene dissipata sulla resistenza per effetto Joule.

La variazione della quantità di carica sulle armature e la ddp tra le armature stesse, seguono lo stesso andamento della corrente:

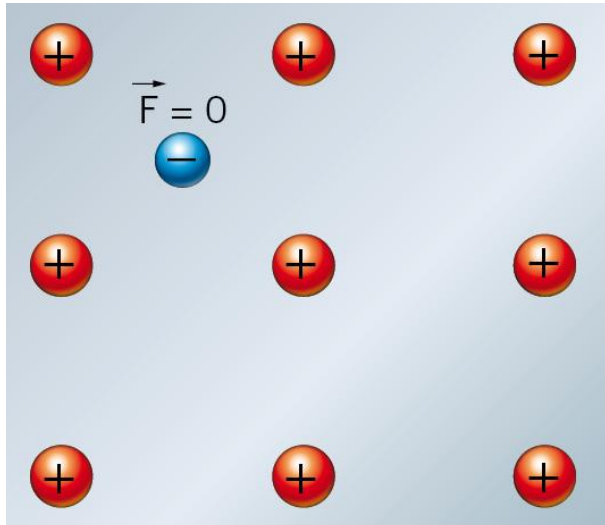


$$q(t) = Cf_{em} e^{-t/\tau} = \underline{q_0 e^{-t/\tau}}$$

$$\Delta V(t) = \underline{f_{em}} e^{-t/\tau}$$

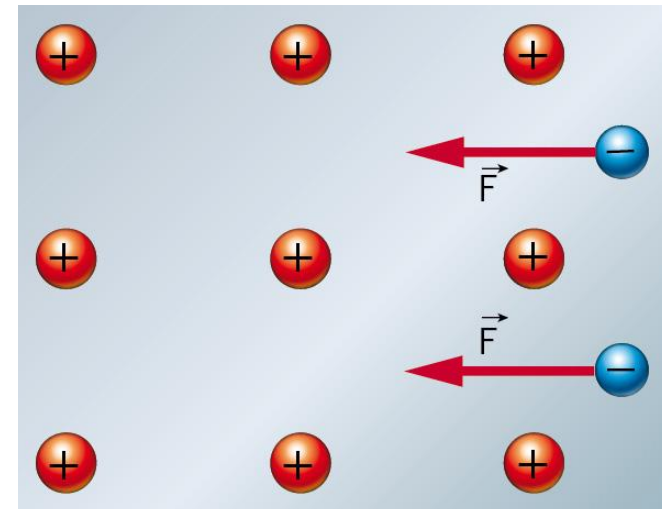
ESTRAZIONE ELETTRONI DA UN METALLO

In condizioni normali, nonostante il moto di agitazione termica, gli elettroni non escono fuori dal metallo. Perché?

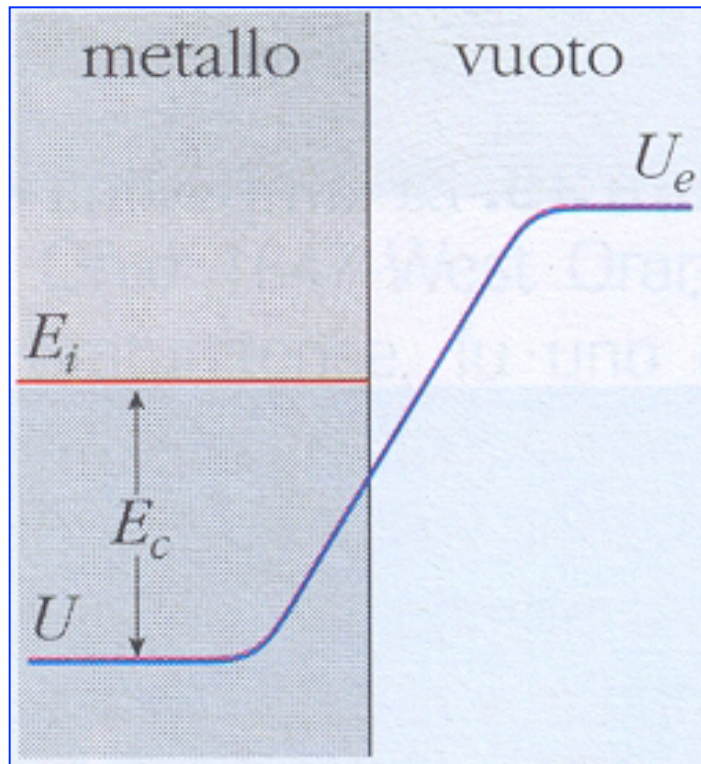


Quando l'elettrone è all'interno del metallo, è circondato dagli ioni del reticolo cristallino e la risultante delle forze di attrazione su di esso è nulla.

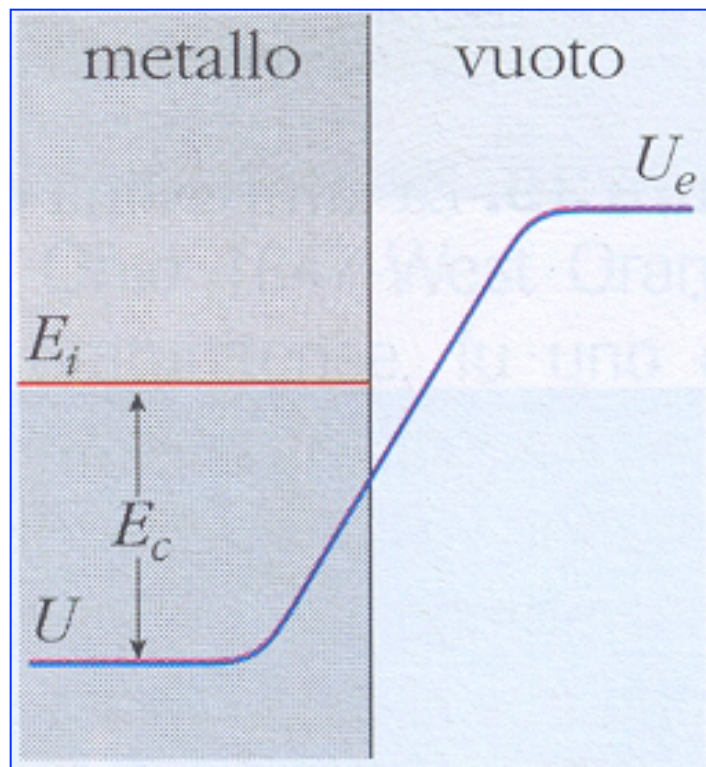
Quando l'elettrone è vicino alla superficie, la forza risultante è diretta verso l'interno, perché non controbilanciata, e impedisce all'elettrone di uscire dal metallo.



Gli elettroni non escono fuori dal metallo s'interpreta ammettendo che in prossimità della superficie esista una **barriera di potenziale**, che ne riduce progressivamente l'energia cinetica fino ad annullarla.



L'energia potenziale U cresce bruscamente attraverso la superficie del conduttore. La differenza fra l'energia totale E_i e l'energia potenziale U rappresenta l'energia cinetica E_c dovuta al moto di agitazione termica.



Poiché $E_i < U_e$ (U_e energia potenziale che l'elettrone assume all'esterno del metallo), l'elettrone non può fuoriuscire dal materiale a meno che non si fornisca a esso una quantità di energia sufficiente a superare la barriera di potenziale.

*L'energia minima necessaria (**energia di estrazione o lavoro di estrazione**), è pari alla differenza fra l'energia potenziale esterna e l'energia totale che l'elettrone già possiede all'interno del materiale:*

$$\Delta E = U_e - E_i$$

Un modo semplice per fornire energia a un elettrone e strapparlo a un materiale consiste nel sottoporlo a una differenza di potenziale elettrico:

Il potenziale di estrazione di un elettrone da un metallo è la ddp a cui deve essere sottoposto un elettrone per fornirgli una quantità di energia pari al lavoro di estrazione:

$$\Delta V = \frac{\Delta E}{e}$$

L'energia di estrazione e il potenziale di estrazione dipendono dalla natura del metallo e dalla temperatura.

Potenziati di estrazione
di alcuni metalli alla
temperatura ambiente
di 20°C.

Per il rame il potenziale di
estrazione è 4,4 V: per
produrre l'emissione di
elettroni è necessario fornire
una quantità di energia
almeno pari a 4,4 eV per
elettrone.

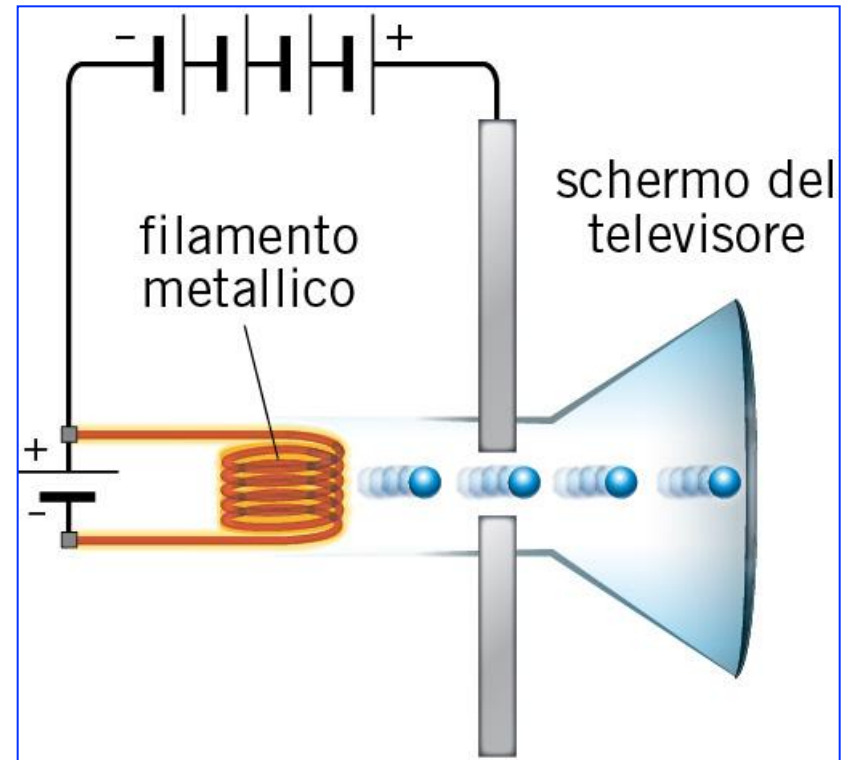
Metalli	Potenziale di estrazione (V)
Sodio	2,7
Ferro	3,2
Zinco	3,4
Tantalio	4,2
Rame	4,4
Tungsteno	4,5
Platino	6,0

$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

effetto termoeionico

L'energia di estrazione viene fornita agli elettroni attraverso il riscaldamento del metallo.

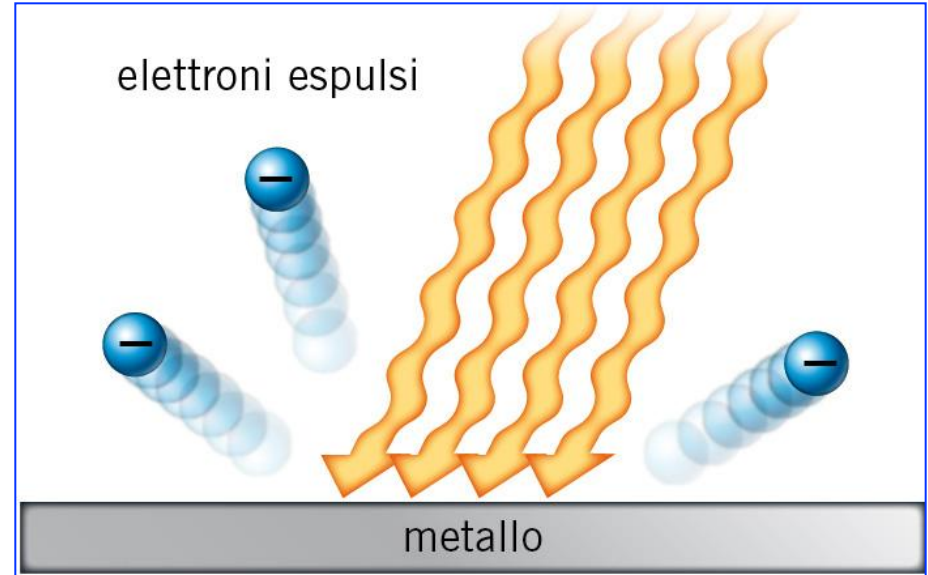
Spiegazione – Se aumenta la temperatura del metallo, aumenta l'energia cinetica media degli elettroni. Quelli che hanno acquistato una quantità di energia almeno pari all'energia di estrazione possono essere emessi dal metallo, il cui numero, in un certo intervallo di tempo, aumenta con l'aumentare della temperatura.



Televisore a tubo catodico

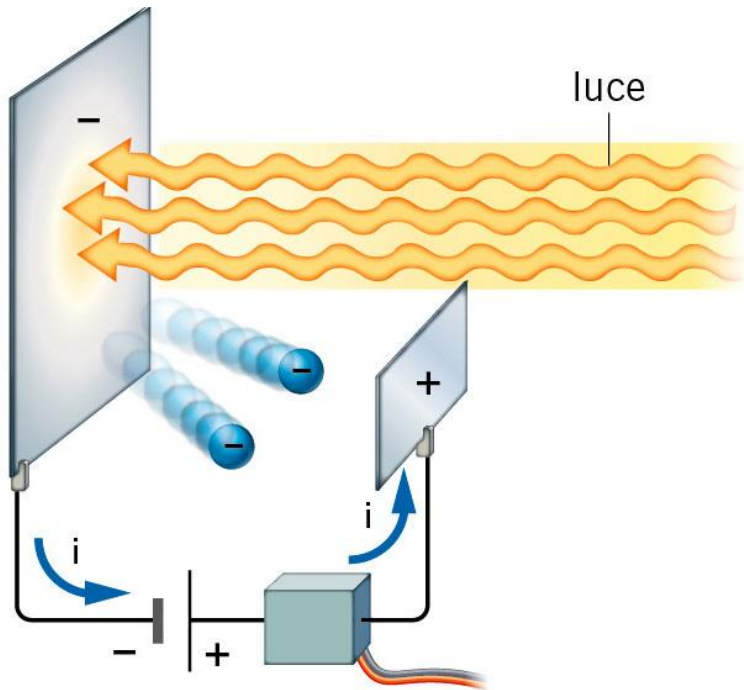
effetto fotoelettrico

L'energia di estrazione viene fornita agli elettroni attraverso la luce visibile o ultravioletta, a seconda del metallo considerato.

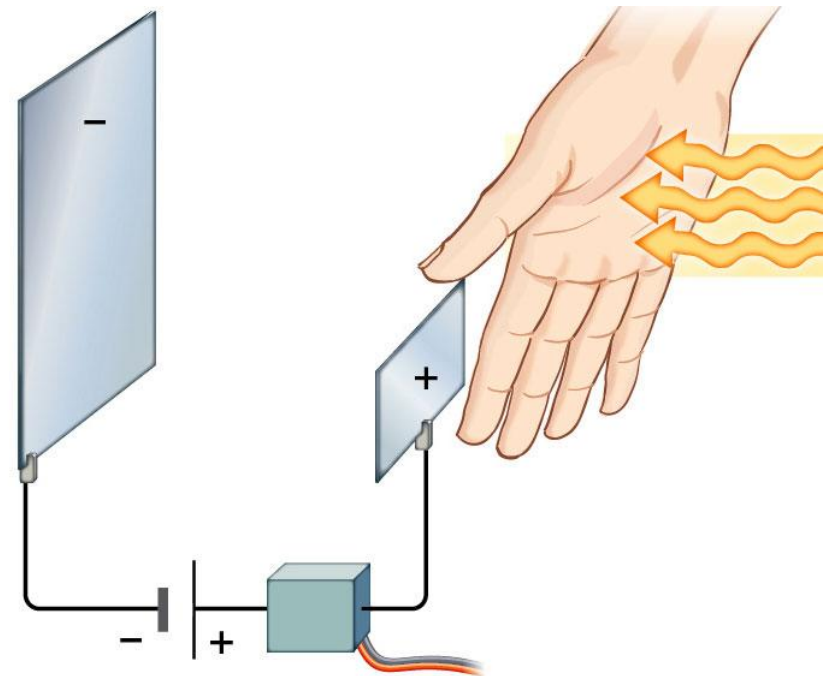


Spiegazione – La luce trasporta energia (energia fotoni $E=hf$; f =frequenza; h =costante) che può essere assorbita dagli elettroni vicini alla superficie del metallo. Se tale energia è maggiore del lavoro di estrazione, gli elettroni riescono a sfuggire all'esterno.

Cella fotoelettrica



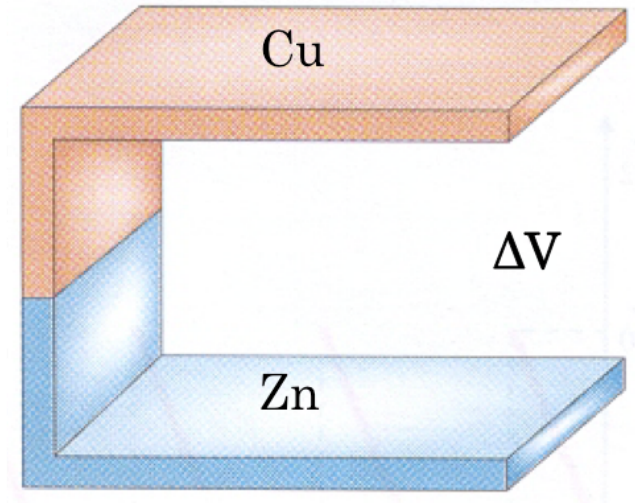
Il fascio di luce colpisce la cella fotoelettrica, provoca l'emissione di elettroni e nel circuito circola corrente.



Se si interrompe il fascio di luce, gli elettroni non vengono più emessi e nel circuito non circola corrente.

EFFETTO VOLTA

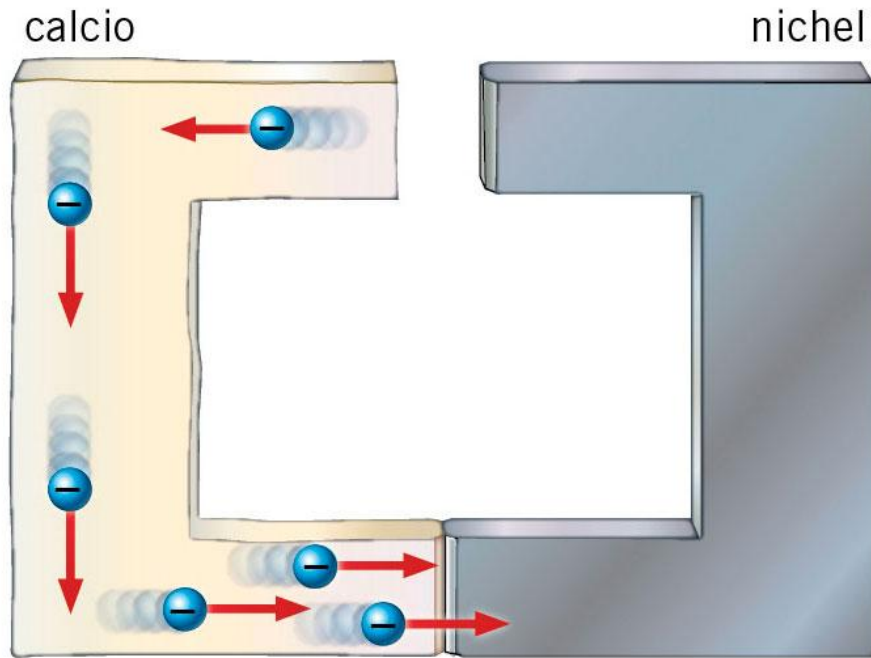
Mettendo a contatto due metalli diversi (rame e zinco) alla stessa temperatura, si stabilisce fra di essi una differenza di potenziale (**Alessandro Volta 1745-1827**).



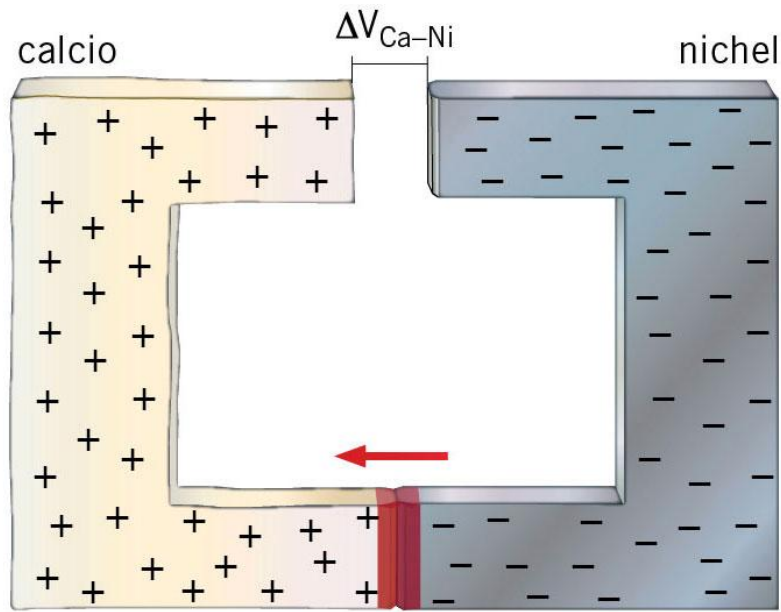
PRIMA LEGGE EFFETTO VOLTA

Al contatto fra due metalli diversi alla stessa temperatura si stabilisce una differenza di potenziale caratteristica della natura dei metalli e indipendente dall'estensione del contatto.

Il calcio ha un potenziale di estrazione ΔV_{Ca} minore di quello del nichel ΔV_{Ni} : il reticolo cristallino del calcio esercita una minore forza di attrazione sugli elettroni di conduzione in prossimità della superficie del metallo.



Al contatto tra i metalli alcuni elettroni di conduzione passano dal Ca al Ni, dando luogo a una $\Delta V_{Ni-Ca} = V_{Ni} - V_{Ca}$ (positiva perché il calcio, perdendo elettroni, si carica positivamente, mentre il nichel, acquistandoli, si carica negativamente).



forza elettrica sugli elettroni

Il flusso di elettroni termina quando la $\Delta V_{\text{Ni-Ca}}$ diventa uguale, in valore assoluto, alla ddp fra i potenziali di estrazione:

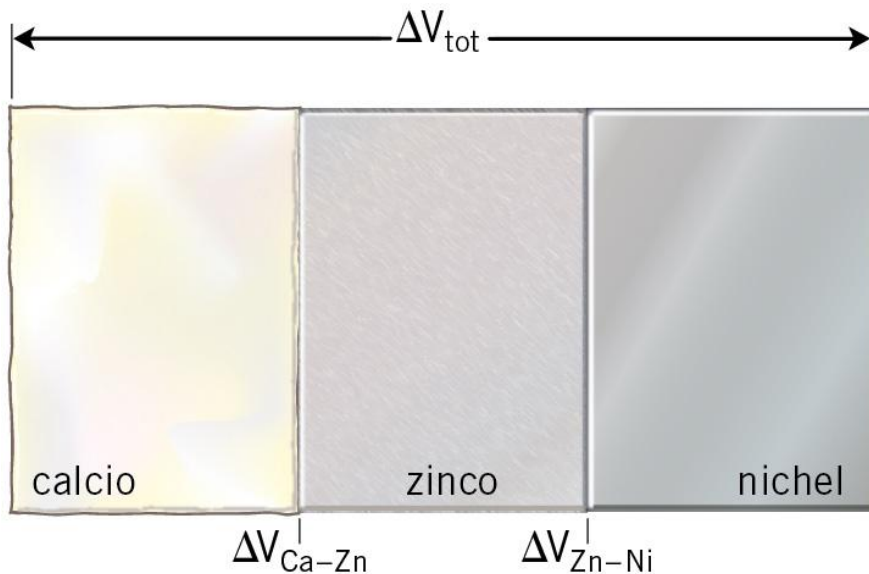
$$\Delta V_{\text{Ni-Ca}} = V_{\text{Ca}} - V_{\text{Ni}} = \Delta V_{\text{Ni}} - \Delta V_{\text{Ca}}$$

In particolare:

$$\Delta V_{\text{Ni-Ca}} = 4,91 - 3,20 = 1,71 \text{ V}$$

SECONDA LEGGE EFFETTO VOLTA

In una catena di conduttori metallici tutti alla stessa temperatura, la differenza di potenziale fra i due metalli estremi è la stessa che si avrebbe se essi fossero a contatto diretto.



$$V_{\text{Ca}} - V_{\text{Zn}} = \Delta V_{\text{Zn}} - \Delta V_{\text{Ca}}$$

$$V_{\text{Zn}} - V_{\text{Ni}} = \Delta V_{\text{Ni}} - \Delta V_{\text{Zn}}$$

sommando membro a
membro si ha:

$$V_{\text{Ca}} - V_{\text{Ni}} = \Delta V_{\text{Ni}} - \Delta V_{\text{Ca}}$$

Dalla seconda legge dell'effetto Volta segue che in una catena chiusa, costituita tutta da conduttori metallici, non si può avere passaggio di corrente. Se infatti si taglia la catena in un punto qualunque di un conduttore, fra le estremità del taglio non esiste alcuna differenza di potenziale.

D'altra parte, se per assurdo in una catena chiusa ci fosse un passaggio di corrente senza alcun generatore esterno a compensare la dissipazione di energia per effetto Joule, si assisterebbe a una violazione del principio di conservazione dell'energia.

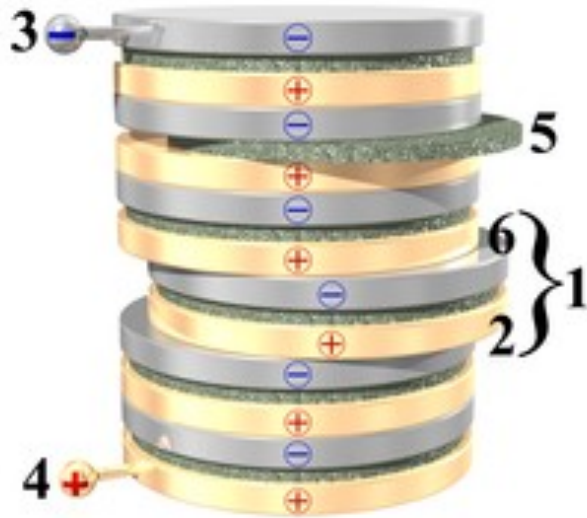
Però, non tutti i conduttori seguono la 2° legge di Volta. Chiameremo **conduttori di prima specie** (i metalli) quelli che seguono la legge; **conduttori di seconda specie** (soluzioni diluite di sali o di acidi in acqua) gli altri.

Combinando in modo opportuno conduttori di prima e seconda specie, Volta realizzò la sua famosa **pila**, il primo generatore di tensione.

TERZA LEGGE EFFETTO VOLTA

Fra due metalli della stessa natura si produce una differenza di potenziale se essi sono gli estremi di una catena della quale fanno parte due metalli diversi a contatto con una soluzione elettrolitica.

Schema della pila di Volta

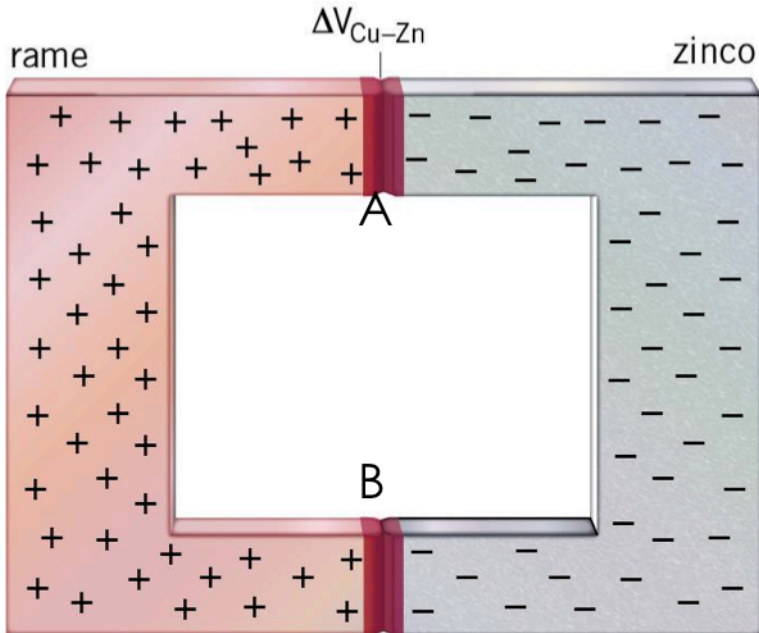


1. un elemento della pila
2. strato di rame
3. contatto negativo
4. contatto positivo
5. feltro o cartone imbevuto in soluzione acquosa
6. strato di zinco

Sull'interpretazione della terza legge,
e il funzionamento della pila di Volta,
ci soffermeremo quando
affronteremo la conduzione elettrica
nelle soluzioni elettrolitiche.



EFFETTO TERMOELETTRICO



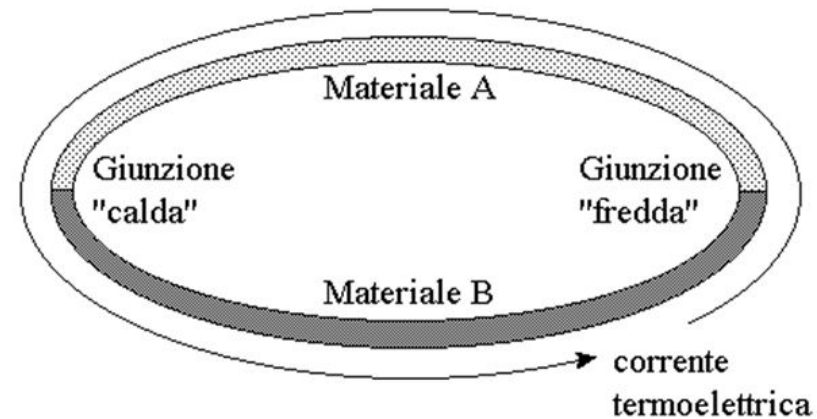
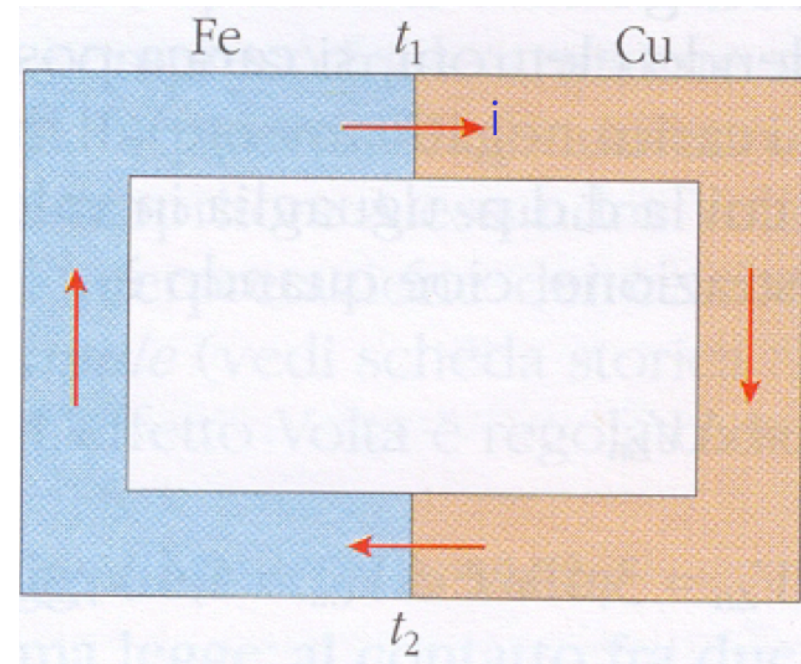
Perché non utilizzare l'effetto Volta per mantenere una corrente in una catena metallica chiusa? Se la coppia di metalli ha ovunque la stessa temperatura, ciò che avviene alla giunzione A è identico a ciò che accade alla giunzione B.

Se la ddp dovuta al contatto A tende a trasportare gli elettroni dal Cu allo Zn, lo stesso accade in B: non vi è alcun meccanismo che possa mantenere una corrente elettrica lungo il circuito.

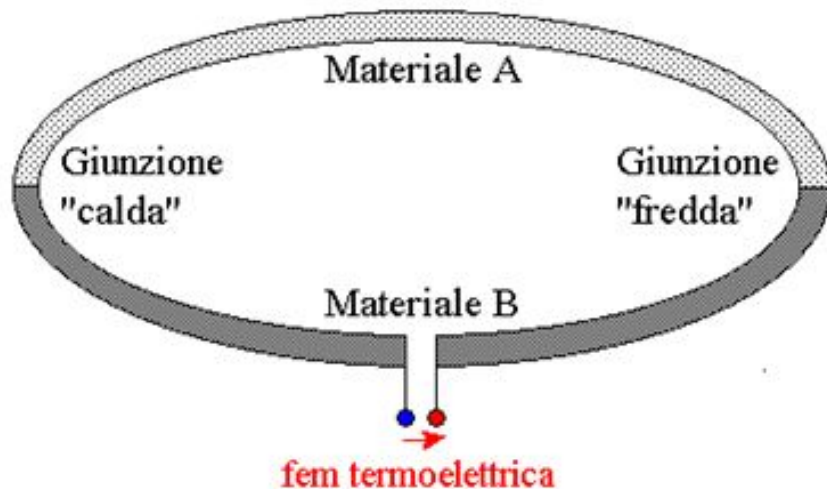
Effetto termoionico (Seebeck 1770-1831)

Se le due giunzioni di una catena bimetallica chiusa sono mantenute a temperatura diversa, nella catena fluisce una corrente elettrica.

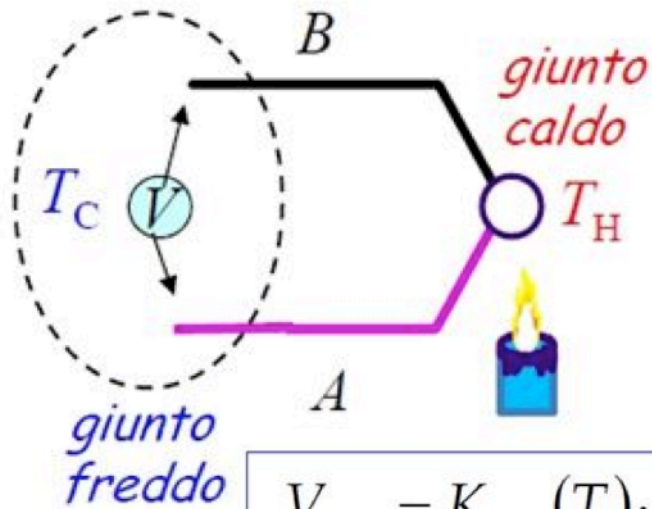
La corrente attraversa la giunzione a temperatura maggiore nel verso che va dal rame al ferro.



Le ddp che si producono alle due giunzioni non sono uguali, in quanto i potenziali di estrazione dipendono dalla temperatura: gli elettroni di conduzione che attraversano la giunzione a temperatura maggiore ricevono l'energia sufficiente a compensare la perdita per effetto Joule oltre a quella subita nella giunzione a temperatura inferiore.



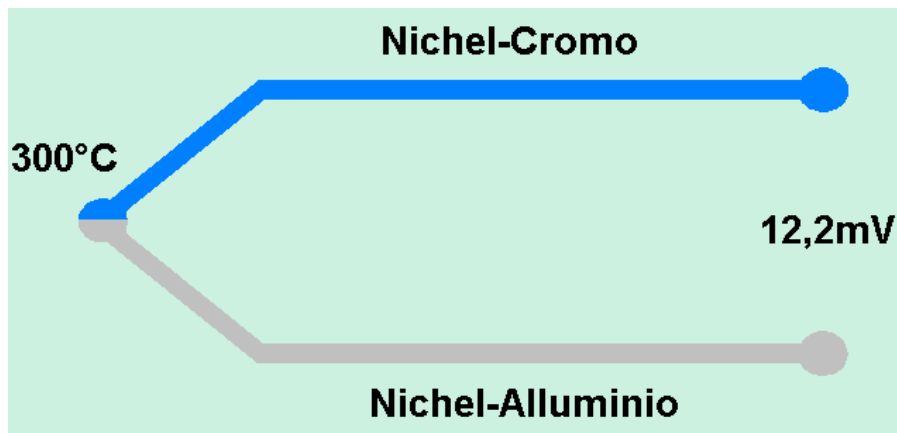
Questa corrente
corrisponde a una f_{em} ,
detta termoelettrica, di
qualche mV.



$$V_{S_{AB}} = K_{S_{AB}}(T) \cdot \Delta T$$

$$\Delta T = T_H - T_C$$

La f_{em} termoelettrica dipende dalla differenza di temperatura fra le giunzioni: se si fissa la temperatura a una giunzione, la forza elettromotrice è funzione della temperatura dell'altra.



Una coppia bimetallica, detta **termocoppia**, può essere usata per determinare, dalla misura della forza elettromotrice, una temperatura incognita.