



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE

Lezione 6

Elettromagnetismo: elettrostatica e correnti elettriche

Corso di Fisica Medica (050ME-9)

Corso di Laurea Triennale in Fisioterapia – A.A. 2025/2026

Dipartimento di Scienze Mediche Chirurgiche e della Salute

Luca Brombal

email: lbrombal@units.it

tel: 040 558 2778

11, 17 DICEMBRE 2025

Introduzione

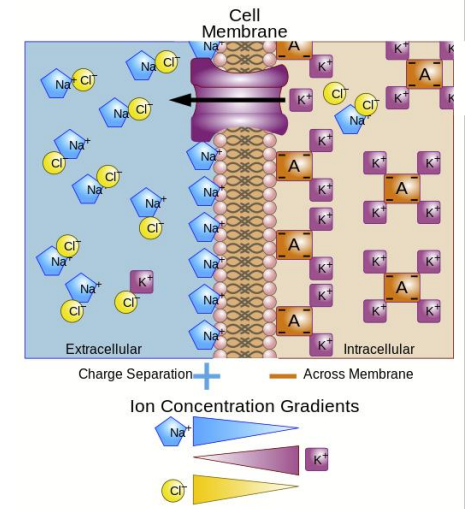
- La forza elettromagnetica è una delle forze fondamentali della natura

Un'altra l'avete già incontrata: la forza di gravità
Le altre 2, la forza nucleare forte e quella debole non le incontrerete mai.

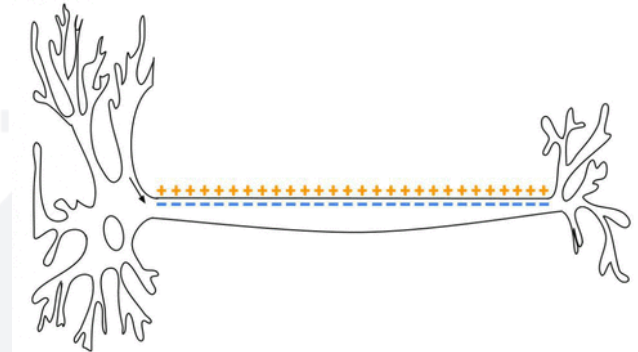
- I fenomeni di natura elettromagnetica sono fondamentali per:
 1. La comprensione del funzionamento degli organismi viventi (ovvero la fisiologia!)
 2. La comprensione degli strumenti di impiego nelle professioni sanitarie (e.g. pacemaker!)

ESEMPI

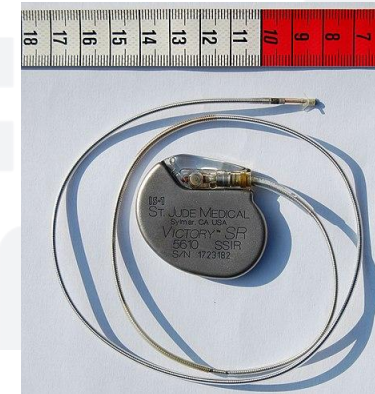
- Perché il potenziale di riposo è quello che è?
→ Forza elettromagnetica!
- Perché il potenziale di azione ha una certa forma e durata?
→ Forza elettromagnetica
- Perché i neuroni che trasmettono il segnale a grande distanza nel corpo hanno assoni mielinizzati?
→ Forza elettromagnetica
- Come funziona un pacemaker?
→ Forza elettromagnetica
- ...



https://en.wikipedia.org/wiki/Membrane_potential



https://en.wikipedia.org/wiki/Action_potential



<https://it.wikipedia.org/wiki/Pacemaker>

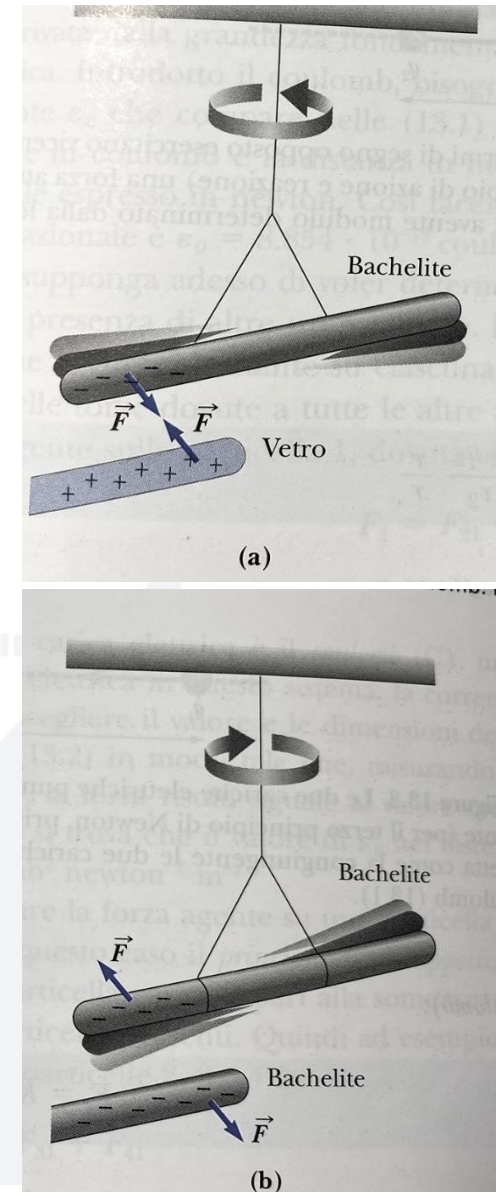
ELETTROSTATICA

- L'elettrostatica è una branca dell'elettromagnetismo che tratta le cariche elettriche stazionarie («ferme»)
- Definizione non intuitiva e tautologica:
Le cariche elettriche sono definite attraverso la loro interazione con il campo elettrico
Il campo elettrico è definito attraverso il suo effetto sulle cariche
- ...
- Ci accontentiamo di una descrizione fenomenologica, ovvero partiamo dall'esperienza di ciò che si vede (o si misura...)

LA CARICA ELETTRICA

- Strofinando opportunamente una barretta di plastica e una di vetro e avvicinandole si nota che si attraggono (c'è una forza di attrazione)
- Facendo lo stesso tra due barrette di plastica (o vetro) si nota che si respingono (c'è una forza di repulsione)
- Si conclude che lo strofinamento ha indotto una proprietà sui materiali che definiamo **carica elettrica**

Tale proprietà si manifesta in due modi (attrazione e repulsione) → Attribuiamo, convenzionalmente, due segni «positiva» e «negativa».



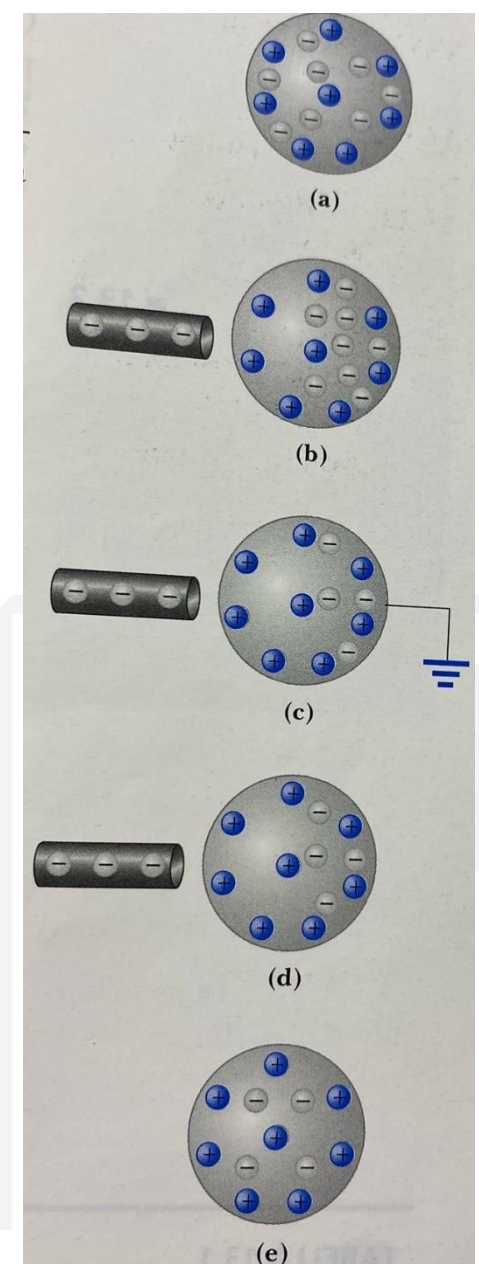
L' INDUZIONE ELETTRICA

- Prendendo una sfera conduttrice (a)
- Si avvicina la barretta di plastica strofinata, questo genera una «migrazione» di cariche negative lontano dalla barretta (b)
- Si connette la sfera conduttrice a terra (= ad un serbatoio infinito di cariche). Le cariche negative respinte possono uscire dalla sfera (c)
- Si disconnette la sfera (d) e allontana la barretta (e)

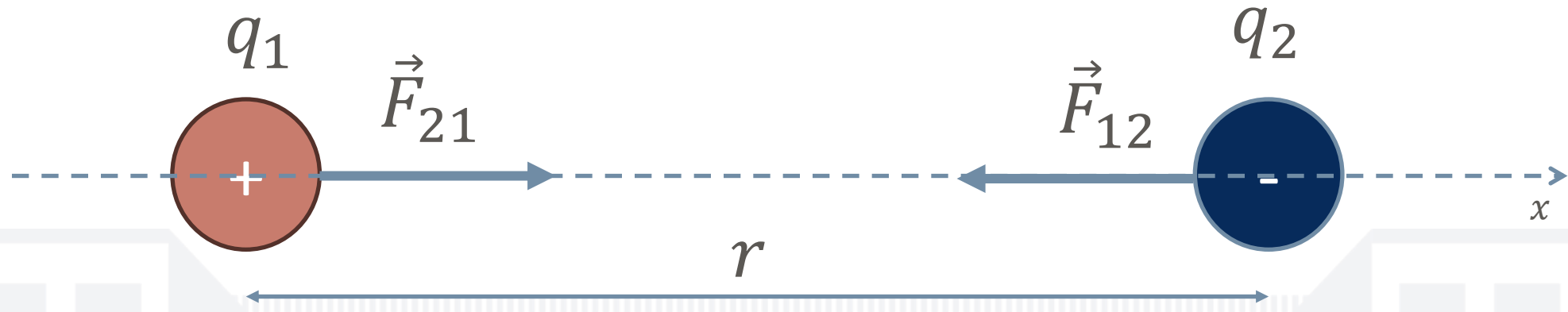
→ Il risultato è un oggetto con carica risultante positiva. Tale metodo di generazione delle cariche si chiama induzione.

PRINCIPIO DI CONSERVAZIONE DELLA CARICA:

La carica elettrica di un oggetto è pari alla somma algebrica delle cariche elettriche in esso presenti. Tale somma si conserva se il sistema è isolato elettricamente (ovvero non è libero di scambiare carica con l'esterno, non come nell'esempio sopra).



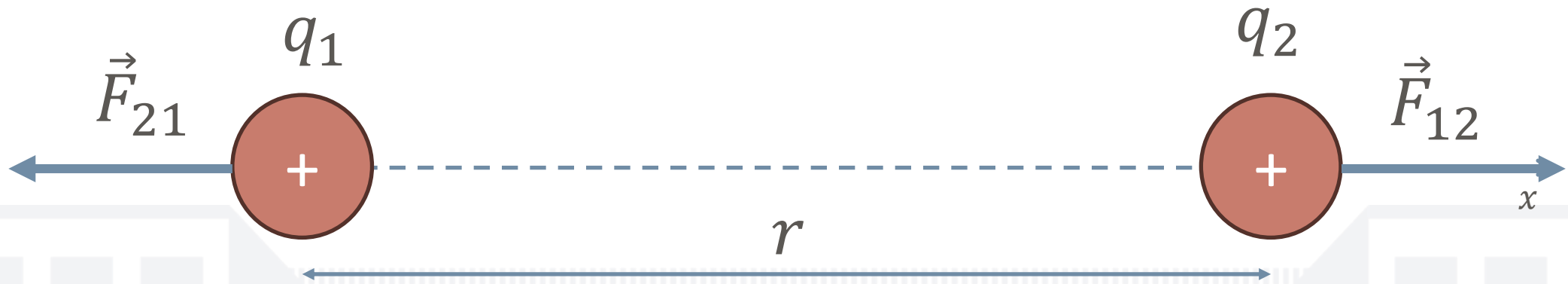
LA LEGGE DI COULOMB



Sperimentalmente si osserva che la forza (un vettore!) che la q_1 sente dovuta alla presenza di q_2 è:

- 1) **Proporzionale** alle cariche **q_1 e q_2**
- 2) **Inversamente proporzionale al quadrato della distanza r**
- 3) **Diretta lungo la retta congiungente le due cariche con verso positivo**

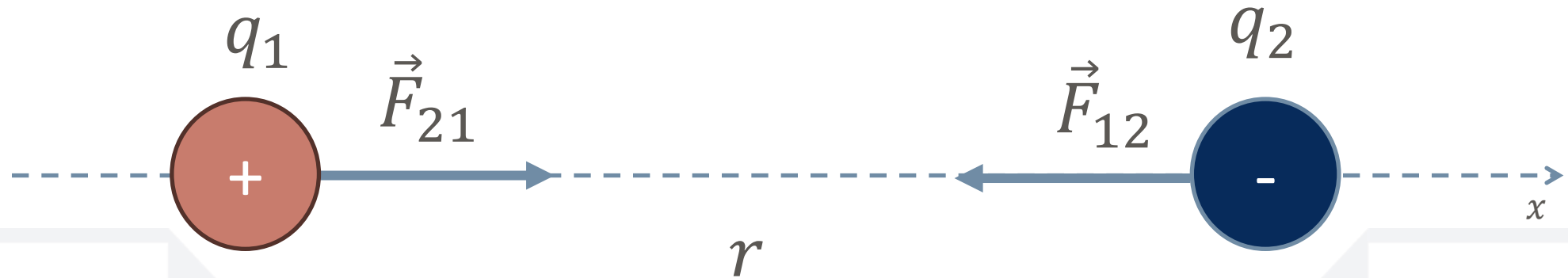
LA LEGGE DI COULOMB



Sperimentalmente si osserva che la forza (un vettore!) che la q_1 sente dovuta alla presenza di q_2 è:

- 1) **Proporzionale** alle cariche **q_1 e q_2**
 - 2) **Inversamente proporzionale al quadrato della distanza r**
 - 3) **Diretta lungo la retta congiungente** le due cariche con verso **negativo**
- forza repulsiva*

LA LEGGE DI COULOMB



Quindi...

$$\vec{F}_{21} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r} = -\vec{F}_{12}$$

versore, specifica direzione e verso

in modulo:

$$|\vec{F}_{21}| = |\vec{F}_{12}| = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Carica elettrica elementare

Le **cariche** sono «quantizzate», ovvero **esistono solo in multipli interi della carica elementare e** che vale

$$e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Carica dell'elettrone

$$q_{\text{elettrone}} = -e = -1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

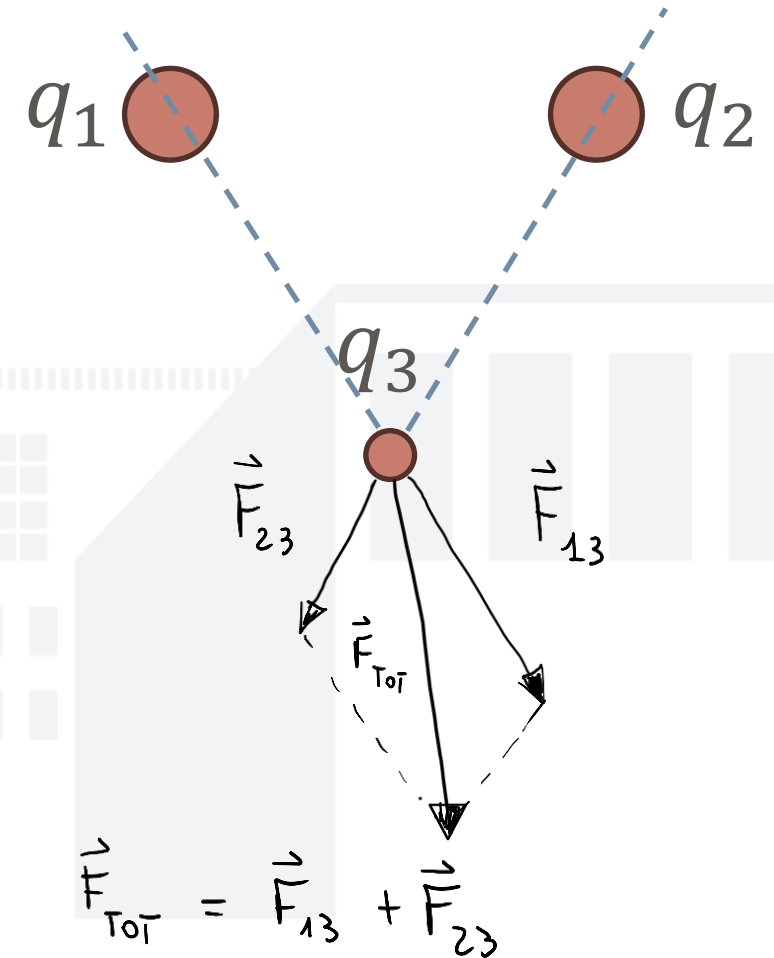
Carica del protone

$$q_{\text{protone}} = e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

IL PRINCIPIO DI SOVRAPPOSIZIONE

- Le forze si sommano vettorialmente
- La forza di Coulomb risultante sulla carica q_3 è la somma vettoriale delle forze esercitate singolarmente dalle cariche q_1 e q_2 .

«La forza sentita da una carica è data dalla somma vettoriale delle forze generate dalla distribuzione di carica circostante»



OFF-TOPIC...ECG...

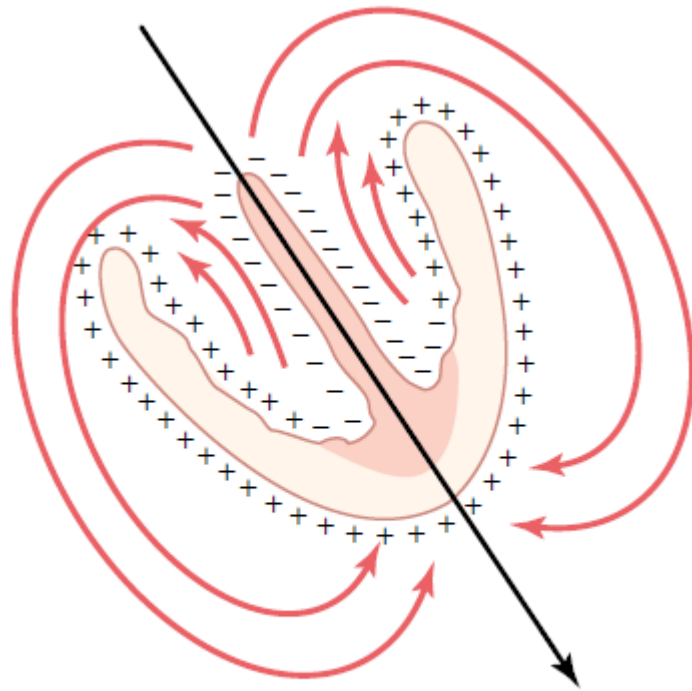


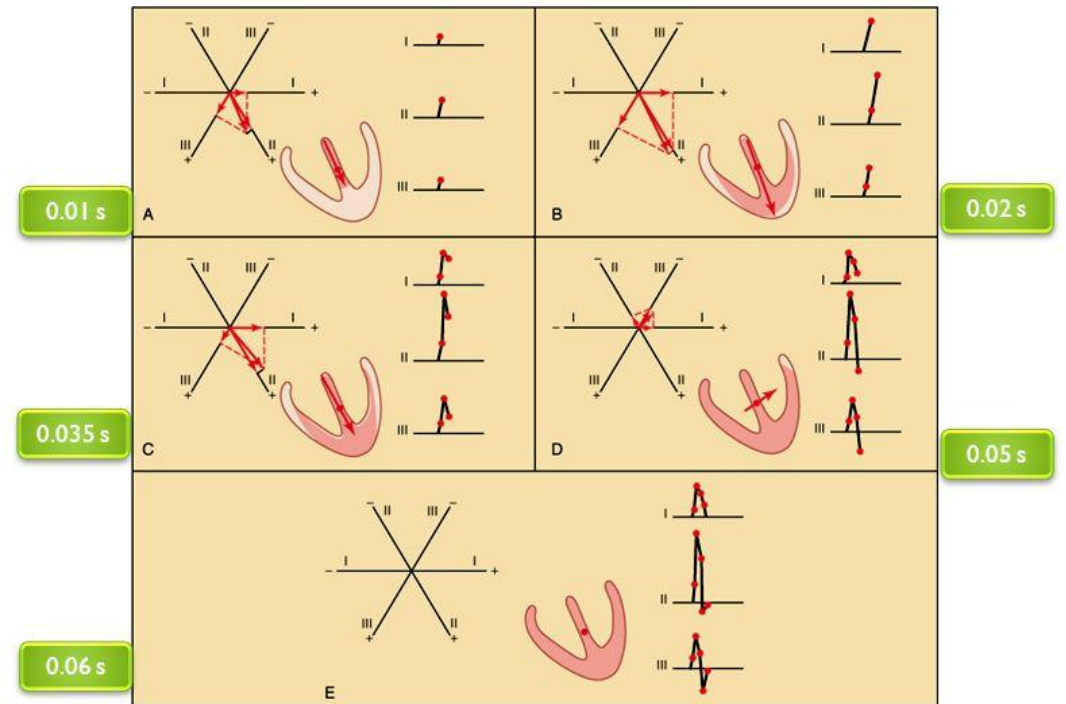
Figure 12-1

Mean vector through the partially depolarized ventricles.

<https://www.slideshare.net/neetikavenu/ecg-vector-analysis>

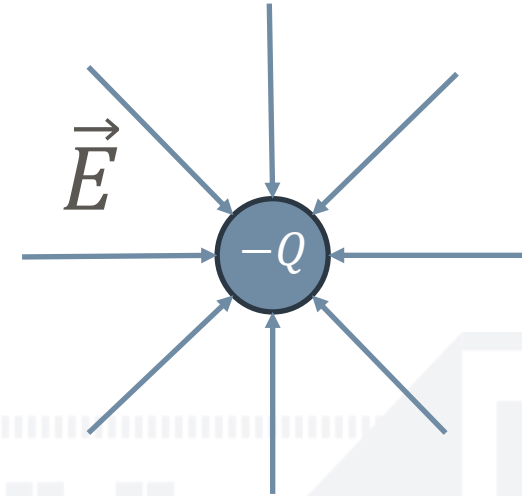
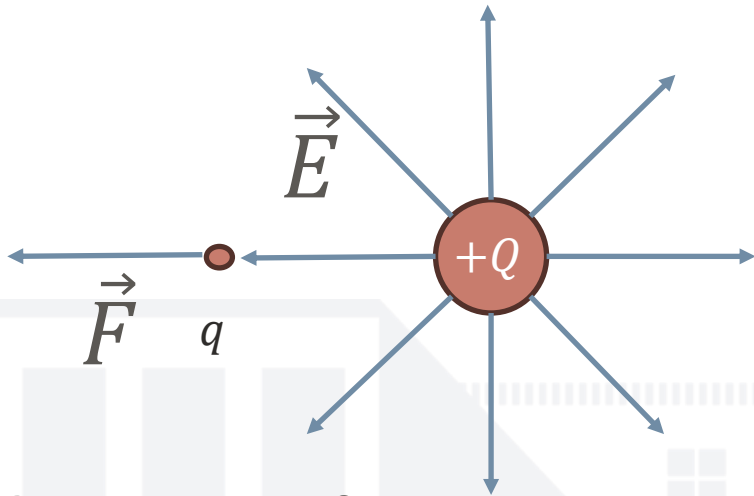
Electrocardiogram

Vectorial Analysis of the Normal Electrocardiogram



<https://slideplayer.com/slide/8560900/>

IL CAMPO ELETTRICO



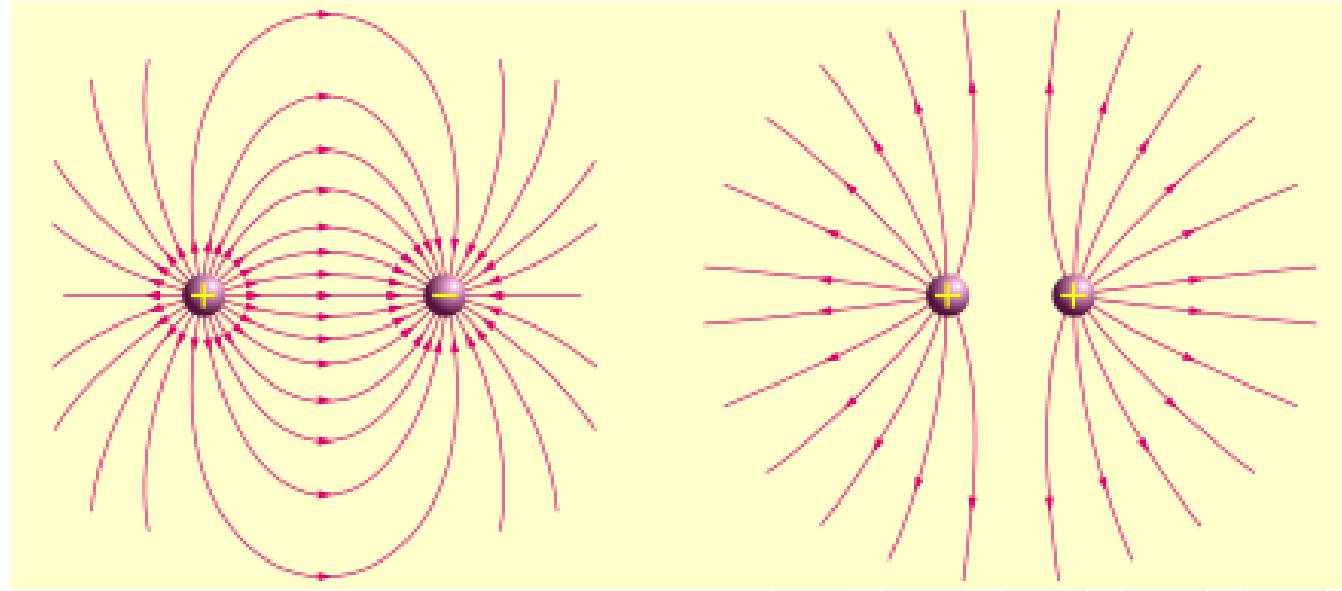
Sia Q una carica fissa, e q una piccola carica (di prova) che possiamo disporre ovunque nello spazio. La carica di prova risente sempre di una forza di Coulomb.

→ La carica Q è sorgente di un campo di forze che chiamiamo **CAMPO ELETTRICO**!

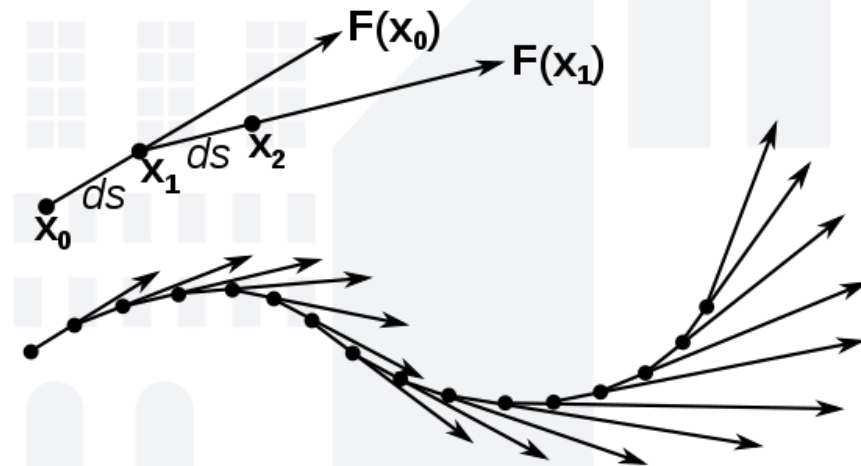
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} = k \frac{Q}{r^2} \hat{r} \rightarrow \text{Vero sempre, anche per cariche NON puntiformi.}$$

LE LINEE DI CAMPO ELETTRICO

Le linee di campo elettrico – o linee di forza – sono:



- Parallele al vettore del campo elettrico
 $\Rightarrow$ Il campo elettrico è sempre tangente alle linee di campo
- Più dense dove l'intensità di campo elettrico è maggiore.



https://en.wikipedia.org/wiki/Field_line

LA COSTANTE DIELETTICA DEL VUOTO

- Se le cariche si trovano nel vuoto

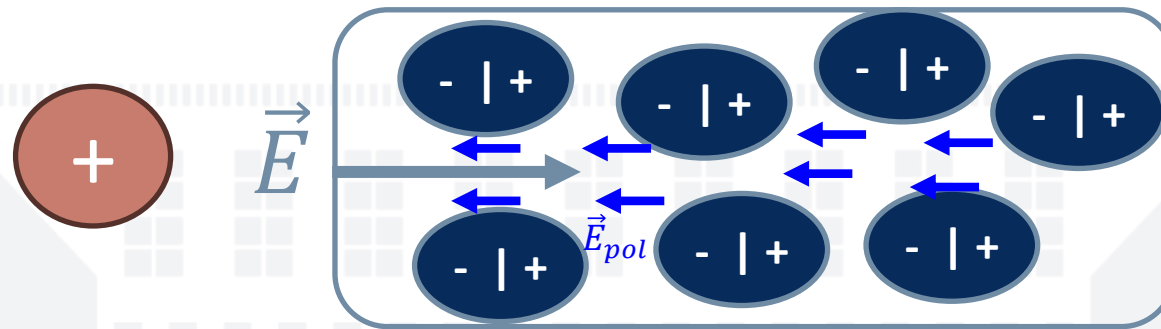
- $K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8.98 \times 10^9 \frac{Nm^2}{C^2} \left[\frac{\text{Newton} \times \text{metri}^2}{\text{Coulomb}^2} \right]$

- ϵ_0 è la costante dielettrica del vuoto

$$\epsilon_0 = 8.86 \times 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2} \left[\frac{\text{Coulomb}^2}{\text{Newton} \times \text{metri}^2} \right]$$

LA COSTANTE DIELETTICA RELATIVA

- Il campo in un mezzo *dielettrico* (= in cui le cariche non sono libere di muoversi), ha un'intensità ridotta a causa della polarizzazione del mezzo!



in un mezzo

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r}$$

$\epsilon_r :=$ costante dielettrica relativa del mezzo
(adimensionale)

LA COSTANTE DIELETTRICA RELATIVA

SOSTANZA	ϵ_r	SOSTANZA	ϵ_r
Aria	1.000590	Diemetiamina	5.26
Acqua distillata	81.1	Acetone	20.7
Alcool etilico	25.8	Cloroformio	4.8
vetro	7.0	Membrana di assone	9.0

Come mai è così grande?

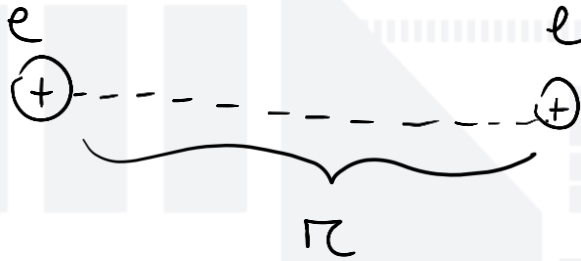
ESERCIZIO 1

Calcolare la forza di attrazione coulombiana tra due ioni idrogeno posti nel vuoto alla distanza di $10 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm}$).

$[1: 2.3 \cdot 10^{-10} \text{ N}]$

ESERCIZIO 1

Uno ione idrogeno è semplicemente un protone, cioè una carica elementare $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$



$$|\vec{F}| = k \cdot \frac{e \cdot e}{r^2} = k \frac{e^2}{r^2} = 9,98 \times 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{(1,6 \times 10^{-19})^2}{(10 \times 10^{-10})^2} = 2,3 \times 10^{-11} \text{ N} = 2,3 \times 10^{-10} \text{ N}$$

ESERCIZIO 2

- Calcolare il campo elettrico prodotto da una carica di 10 nC a distanza di 10 cm in aria e confrontarlo con il campo prodotto dalla stessa carica in acqua.

$$E_{\text{aria}} = \frac{K}{\epsilon_r} \cdot \frac{Q}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 \epsilon_{r,\text{aria}}} \frac{Q}{r^2} = K \frac{Q}{r^2} = 8,98 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

$\epsilon_{r,\text{aria}} \approx 1$

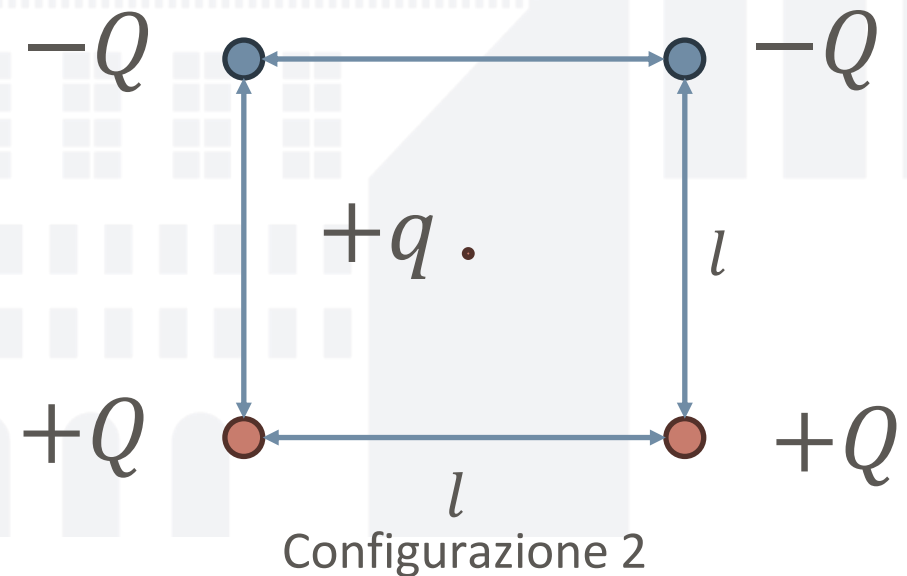
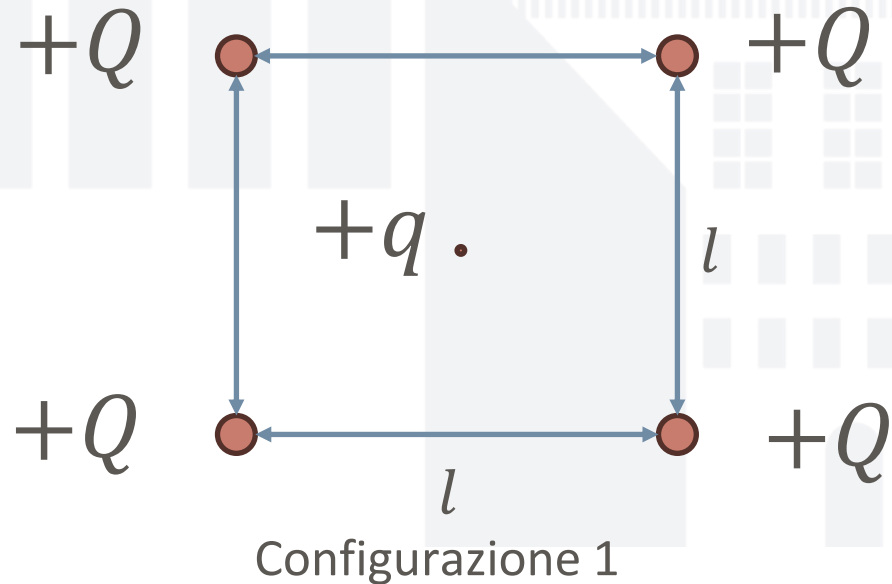
$$[8.98 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{C}}; 0.11 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{C}}]$$

ESERCIZIO 2

$$E_{\text{acqua}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_{r,\text{acqua}}} \frac{Q}{r^2} = \frac{\boxed{K}}{\epsilon_{r,\text{acqua}}} \underbrace{\left[\frac{Q}{r^2} \right]}_{\approx E_{\text{aria}}} \approx \frac{E_{\text{aria}}}{\epsilon_{r,\text{acqua}}} = \frac{3,98 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{C}}}{31,1} = 1,11 \times 10^2 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

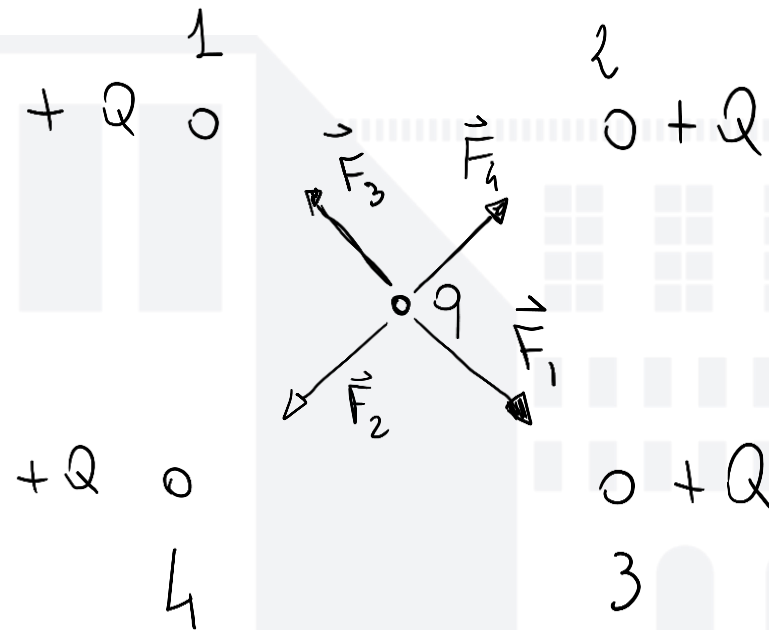
ESERCIZIO 3

- Si calcoli il campo e la forza elettrica risultanti nel punto P per la configurazione di cariche descritta in 1 e in 2 ($Q = 10 \text{ nC}$, $q = 1 \text{ nC}$, $l = 5 \text{ cm}$)



ESERCIZIO 3 (soluzione)

Configuratione 1



per simmetria le forze si annullano
a coppie, ovvero

$$\vec{F}_2 + \vec{F}_4 = 0$$

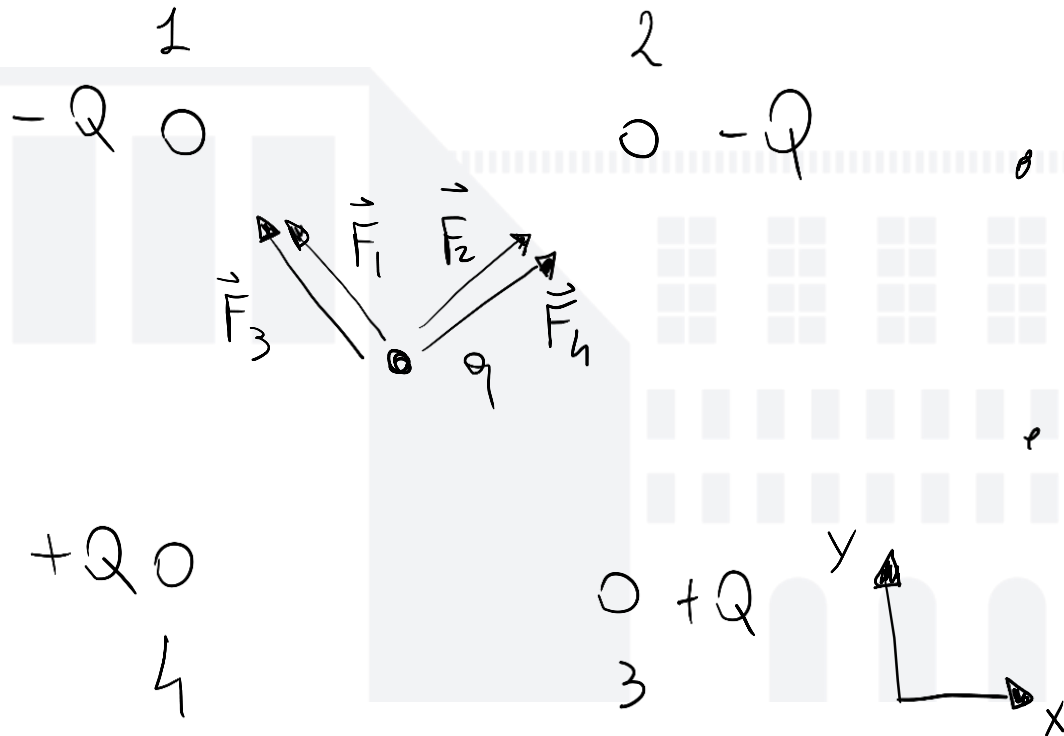
e

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_3 = 0$$

$$\Rightarrow \vec{F}_{\text{Tot}} = \underbrace{\vec{F}_1 + \vec{F}_3}_{=0} + \underbrace{\vec{F}_2 + \vec{F}_4}_{=0} = 0$$

ESERCIZIO 3 (soluzione)

Configurazione 2



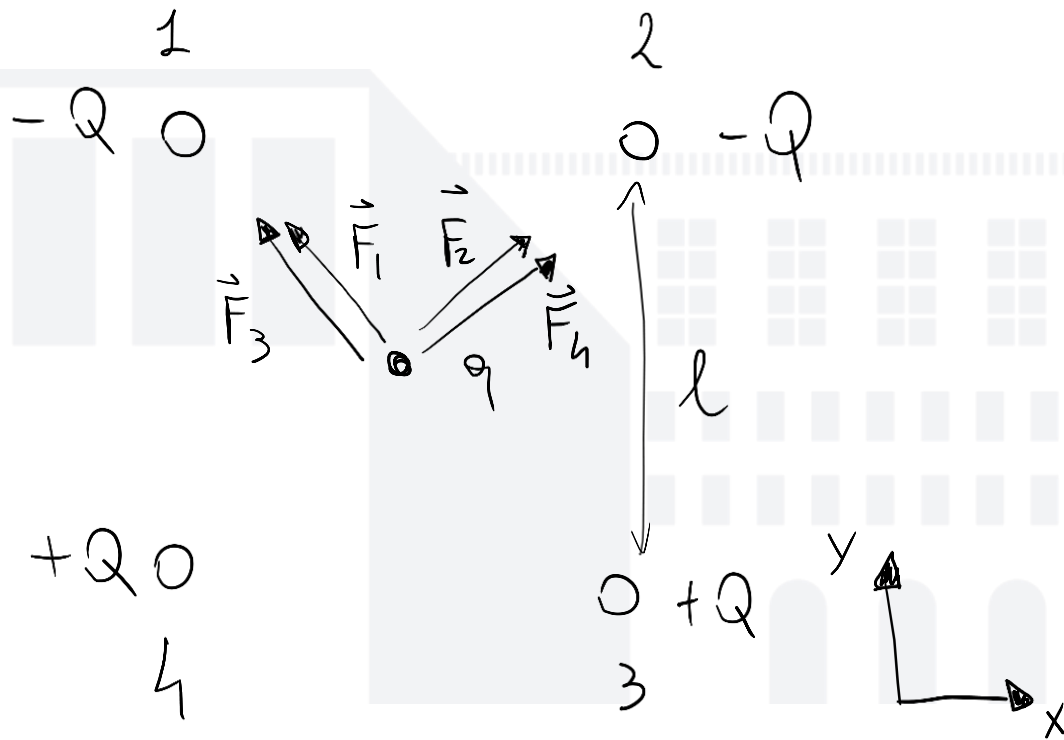
• Per simmetria, $\vec{F}_1 = \vec{F}_3$ e $\vec{F}_2 = \vec{F}_4$

• Inoltre le componenti in "x" si annullano in quanto $F_{2,x} = F_{4,x} = -F_{1,x} = -F_{3,x}$

• Le componenti "y" si sommano e sono tutte uguali $F_{2,y} = F_{4,y} = F_{1,y} = F_{3,y}$

ESERCIZIO 3 (soluzione)

Configurazione 2



$$F_{1,y} = |\vec{F}_1| \cdot \cos 45^\circ = |\vec{F}_1| \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} =$$

$$= k \cdot \frac{qQ}{\pi^2} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}$$

$$= k \frac{qQ}{\frac{1}{2}l^2} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = k\sqrt{2} \frac{qQ}{l^2}$$

π è la metà della diagonale
di un quadrato di lato
 $l \Rightarrow \pi = \frac{1}{2} \cdot l\sqrt{2} = \frac{\sqrt{2}}{2}l$

$$|\vec{F}_{\text{Tot}}| = 4 F_{1,y} = 4\sqrt{2} k \frac{qQ}{l^2} = 2,0 \times 10^{-4} \text{ N}$$

IL LAVORO FATTO DA UNA FORZA ELETTRICA

Ripasso:

se ho una forza **costante**, il lavoro fatto per andare da A a B con uno spostamento $\Delta\vec{s}$ e'

$$L_{AB} = \vec{F} \cdot \Delta\vec{s}$$

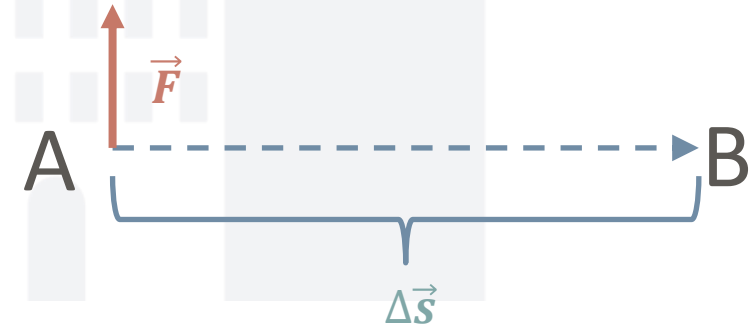
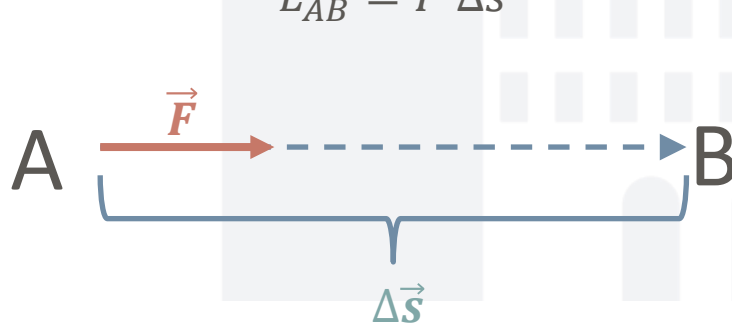
prodotto scalare

Se la forza e lo spostamento hanno stessa direzione e stesso verso

Se la forza e lo spostamento hanno direzioni ortogonali

$$L_{AB} = F \Delta s$$

$$L_{AB} = 0$$



IL LAVORO FATTO DA UNA FORZA ELETTRICA

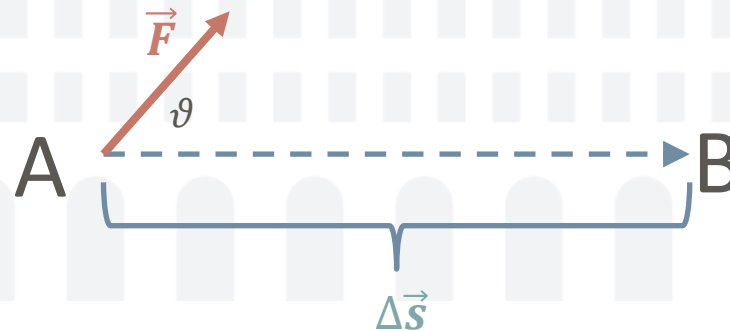
Ripasso:

se ho una forza **costante**, il lavoro fatto per andare da A a B con uno spostamento $\Delta\vec{s}$ e'

$$L_{AB} = \vec{F} \cdot \Delta\vec{s}$$

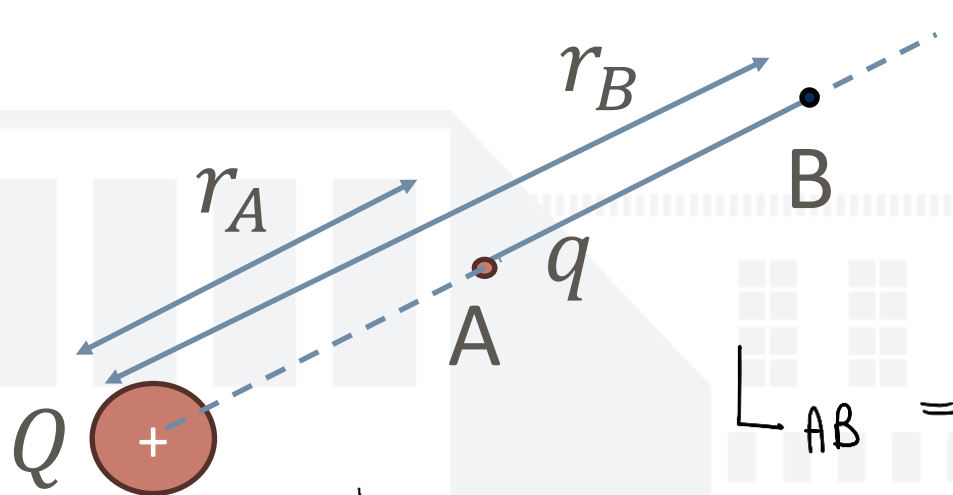
In generale, se spostamento e forza hanno un angolo tra di loro

$$L_{AB} = F \Delta s \cos(\vartheta)$$



IL LAVORO FATTO DA UNA FORZA ELETTRICA

La forza elettrica prodotta da una carica fissa



- Nel percorso da A a B la forza ha la stessa direzione dello spostamento ($\cos(\vartheta) = 1$)
- Nel percorso da A a B la forza non è costante (uso l'integrale!)

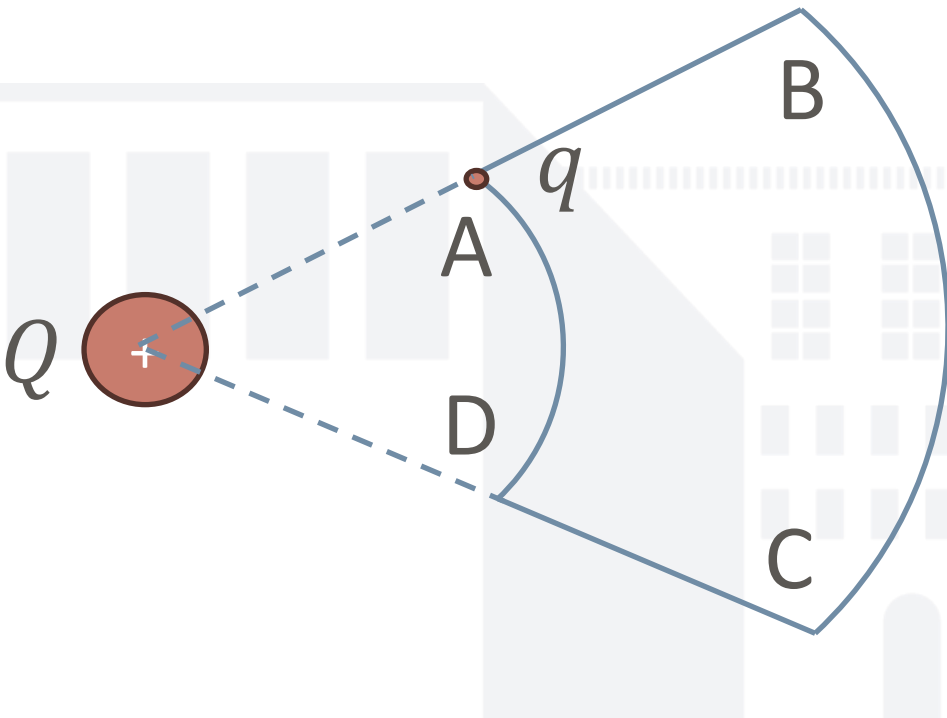
$L_{AB} = \int_A^B F ds = \int_{r_A}^{r_B} \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \cdot \frac{qQ}{r^2} dr$

$= -\frac{qQ}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \left[\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A} \right] = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \left[\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right]$

dimostrazione riservata ai "coraggiosi"

IL LAVORO SU UN PERCORSO CHIUSO

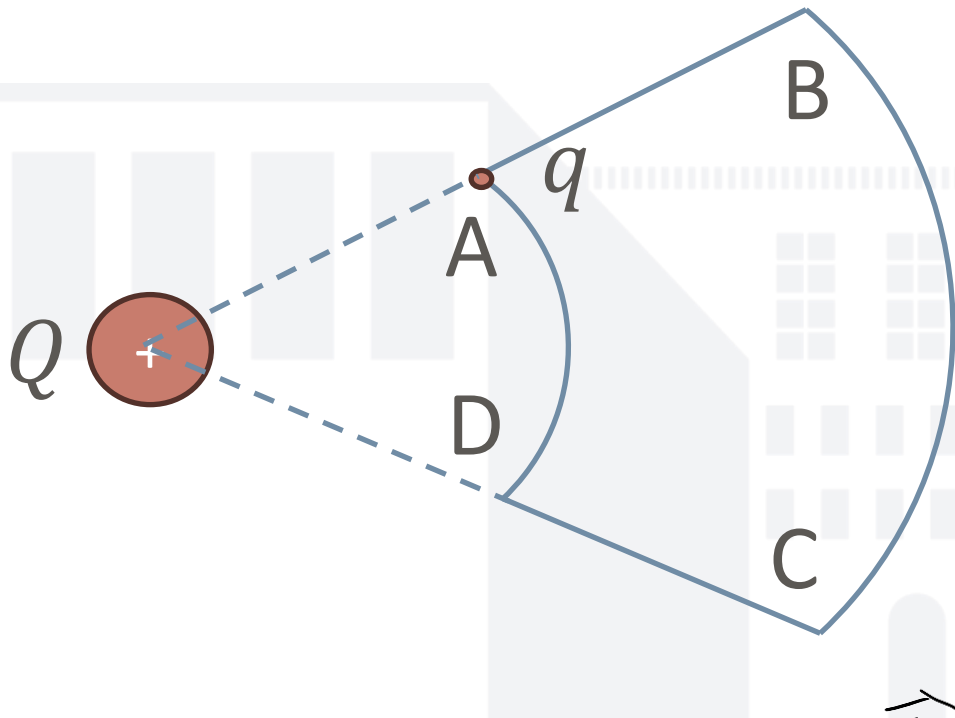
Calcoliamo il lavoro fatto dalla forza elettrica lungo un percorso chiuso da che passi per A, B, C e D (e poi torni in A)



- $L_{ABCD} = L_{AB} + L_{BC} + L_{CD} + L_{DA}$
- $L_{BC} = 0$ perché spostamento e forza sono ortogonali
- $L_{DA} = 0$ per lo stesso motivo
- $L_{AB} = -L_{CD}$ perché la forza è la stessa ma lo spostamento in un caso è verso il centro nell'altro è verso l'esterno

IL LAVORO SU UN PERCORSO CHIUSO

Quindi:



$$L_{ABCD} = L_{AB} + L_{BC} + L_{CD} + L_{DA}$$

$$= L_{AB} + 0 + L_{CD} + 0$$

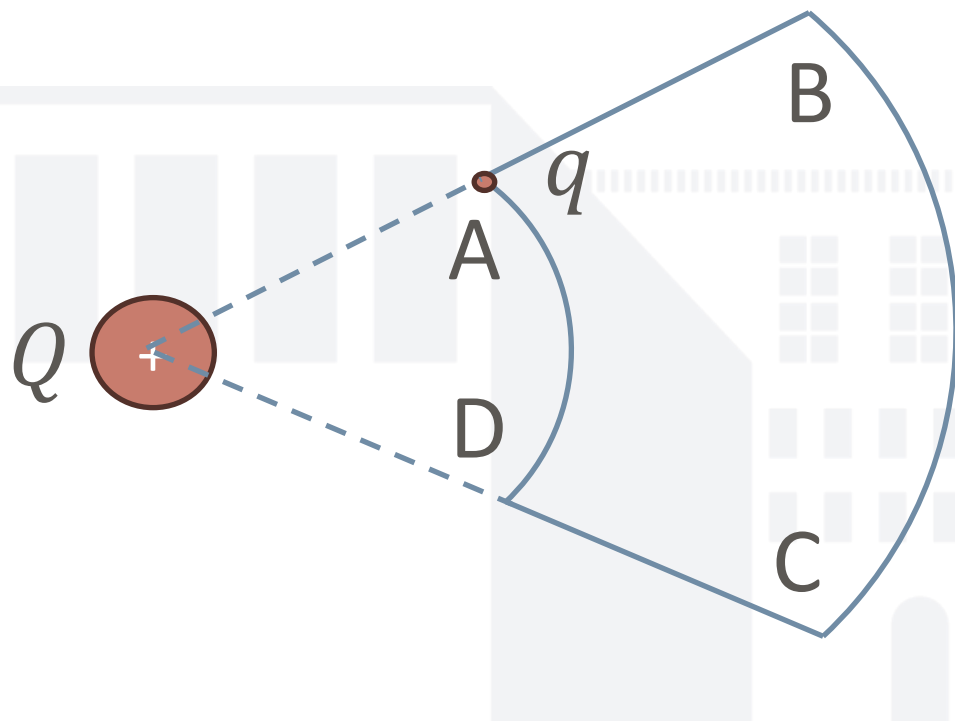
$$= L_{AB} - L_{AB} = 0$$

Il lavoro compiuto dalla forza elettrica in un percorso chiuso è nullo!

⇒ La forza è conservativa!

CAMPO CONSERVATIVO

Quindi:



Una definizione analoga di campo di forze conservativo è:

- Il lavoro fatto dal campo di forze non dipende dal percorso compiuto

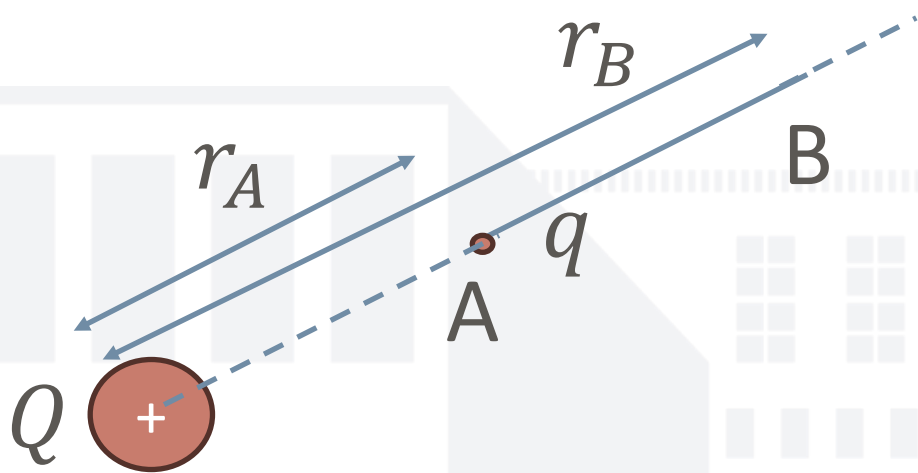
→ Si può definire un'energia potenziale (elettrica) che dipende esclusivamente dalla posizione in cui la stiamo calcolando!

$$U(r)$$

L'ENERGIA POTENZIALE ELETTRICA

- Ricordiamo che

$$L_{AB} = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \cdot \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) = - \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \left(\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A} \right)$$



Definiamo l'energia potenziale elettrica come

$$U(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \cdot \frac{Qq}{r}$$

E quindi il lavoro si calcola semplicemente come:

$$L_{AB} = - [U(r_B) - U(r_A)] = -\Delta U$$

IL POTENZIALE ELETTRICO

- Così come abbiamo definito il campo elettrico come la forza di Coulomb diviso la carica di prova, faremo lo stesso con il potenziale elettrico!

FORZA ELETTRICA (DI COULOMB)

$$\vec{F} = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{1}{r^2} \hat{r}$$

ENERGIA POTENZIALE ELETTRICA

$$U = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{1}{r}$$

Vere per carica puntiforme

CAMPO ELETTRICO

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{1}{r^2} \hat{r}$$

Vero sempre

POTENZIALE ELETTRICO

$$V = \frac{U}{q} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{1}{r}$$

IL POTENZIALE ELETTRICO

$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q} = \frac{-L_{AB}}{q} = - \frac{1}{q} \int_A^B q \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

- *Se il campo elettrico è costante e diretto lungo lo spostamento (a meno del segno che ci dice se ci stiamo spostando lungo le linee di campo o al contrario)*

$$\Delta V = E \cdot \Delta S$$

$\Downarrow$

$$E = \frac{\Delta V}{\Delta S} \Rightarrow [E] = \frac{V}{m} \text{ il campo elettrico si misura in "volt al metro"}$$

ESERCIZIO 4

- Un fulmine percorre 1000 metri da una nuvola alla cima di un albero. Valutare la differenza di potenziale tra la nuvola e l'albero, assumendo che il campo elettrico sia uniforme e che l'aria, inizialmente scarica, diventi conduttrice quando il campo raggiunge $8 \times 10^5 \frac{V}{m}$

$$E = \frac{\Delta V}{\Delta S} ; \quad \Delta V = E \cdot \Delta S = 8 \times 10^5 \frac{V}{m} \times 10^3 m = 8 \times 10^8 V = \underline{0,8 GV!}$$

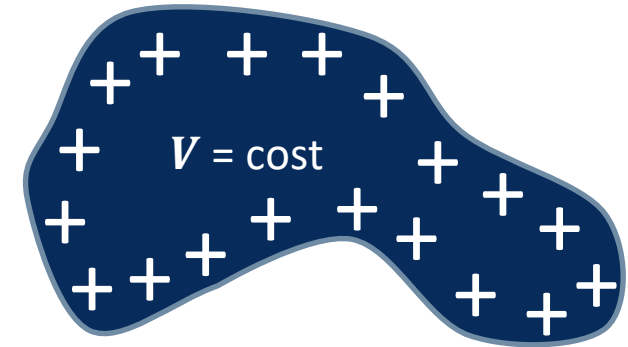
[0.8 GV]

CONDUTTORI E ISOLANTI

- In base alle loro proprietà elettriche i materiali si distinguono in **conduttori, isolanti e semiconduttori**.
- **Conduttori**: presenti cariche elettriche libere di muoversi. Esempi: metalli (cariche libere = elettroni); soluzioni elettrolitiche (cariche libere = ioni).
- **Isolanti**: assenza di cariche libere di muoversi. Esempi: vetro, carta, aria, materiali plastici
- **Semiconduttori**: proprietà intermedie tra conduttori e isolanti. La loro capacità di «condurre l'elettricità» può essere variata con la temperatura o con l'aggiunta di impurezze («drogaggio»). Esempi: silicio, germanio.

I CONDUTTORI CARICHI

- Se a un conduttore viene fornita carica all'equilibrio essa si dispone sulla superficie. Cariche dello stesso segno si respingono e tendono ad interporre tra loro la massima distanza.
- I punti della superficie si trovano tutti allo stesso potenziale V (equipotenziale). Se così non fosse...
- Anche all'interno del conduttore il potenziale è costante e vale V



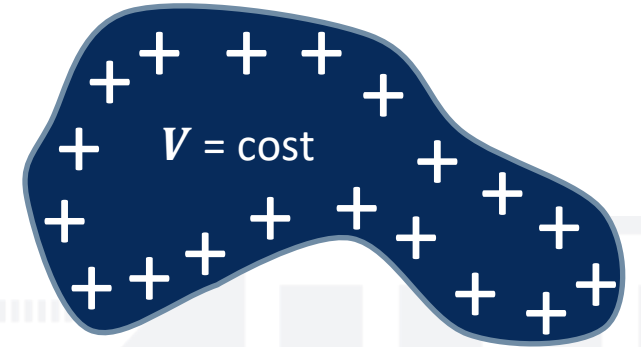
CAPACITA' ELETTRICA DI UN CONDUTTORE

- Il rapporto tra la carica Q depositata nel conduttore e il potenziale V a cui si trova il conduttore

$$C = \frac{Q}{V}$$

- Dove C è la capacità elettrica del conduttore, e si misura in **farad (F)**

$$[C] = F; \quad 1F = \frac{1C}{1V} \quad (\text{"coulomb su volt"})$$



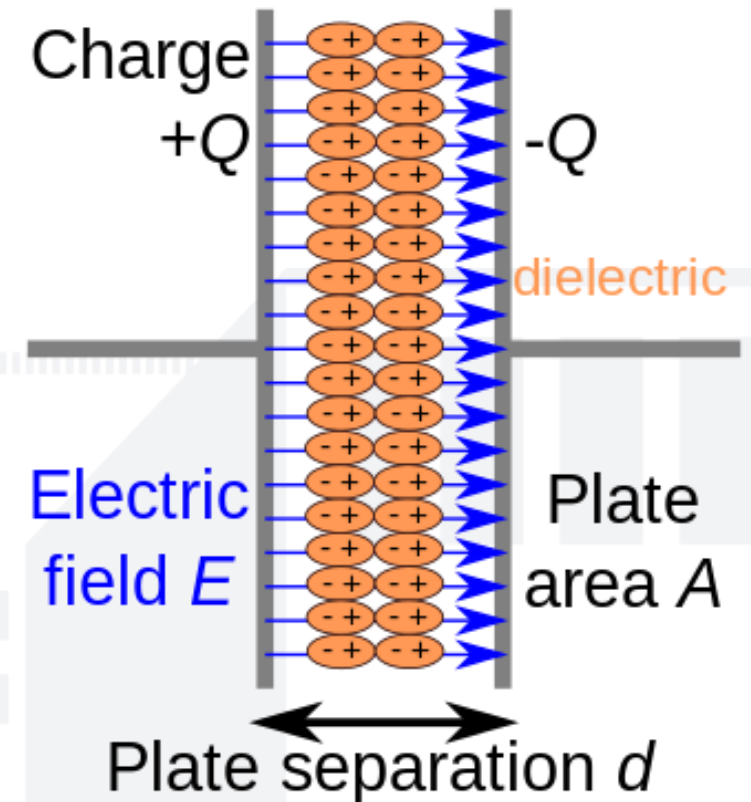
IL CONDENSATORE

- Si definisce condensatore l'insieme di due armature conduttrici poste ad una distanza d fra loro riempito da un mezzo dielettrico, su cui sono presenti cariche elettriche $+Q$ e $-Q$ e una differenza di potenziale ΔV . Il condensatore ha capacità

$$C = \frac{Q}{\Delta V}$$

- Se il condensatore è a facce piane e parallele, la capacità è proporzionale alla superficie delle facce (A), al coefficiente dielettrico (ϵ_r) e all'inverso della distanza

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}$$



[https://it.wikipedia.org/wiki/Condensatore_\(elettrotecnica\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Condensatore_(elettrotecnica))

CONDENSATORI IN SERIE

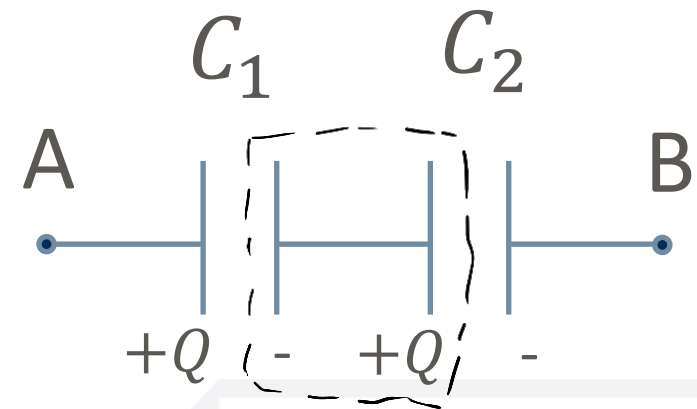
Se colleghiamo due condensatori in serie (l'uno dopo l'altro) per mezzo di un materiale conduttore elettricamente neutro (p. es. un filo di rame) abbiamo che:

- La carica sulle armature di C_1 è uguale a quella sulle armature di C_2 in quanto il conduttore riquadrato in figura è neutro

$$Q_1 = Q_2 = Q$$

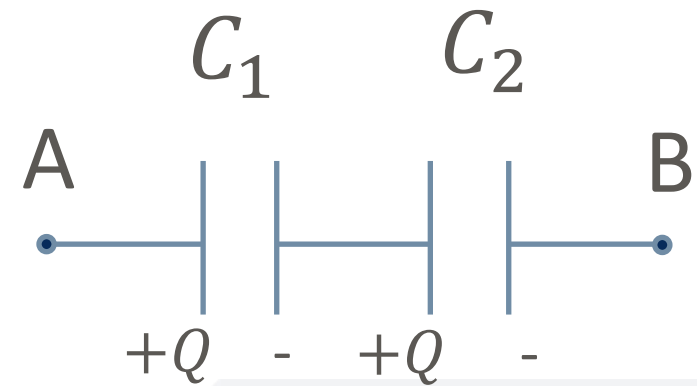
- La differenza di potenziale tra A e B sarà data dalla somma delle differenze di potenziale attraverso ciascun condensatore

$$\Delta V_{AB} = \Delta V_1 + \Delta V_2$$



CONDENSATORI IN SERIE...

$$\Delta V_{AB} = \Delta V_1 + \Delta V_2 = \frac{Q_1}{C_1} + \frac{Q_2}{C_2} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} = Q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)$$



Quindi, ricordando che $\Delta V = \frac{Q}{C}$, i condensatori in serie si comportano come un unico condensatore che ha **capacità equivalente**

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \Rightarrow C_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}}$$

Nota:
 $C_{eq} < C_1$
 $< C_2$

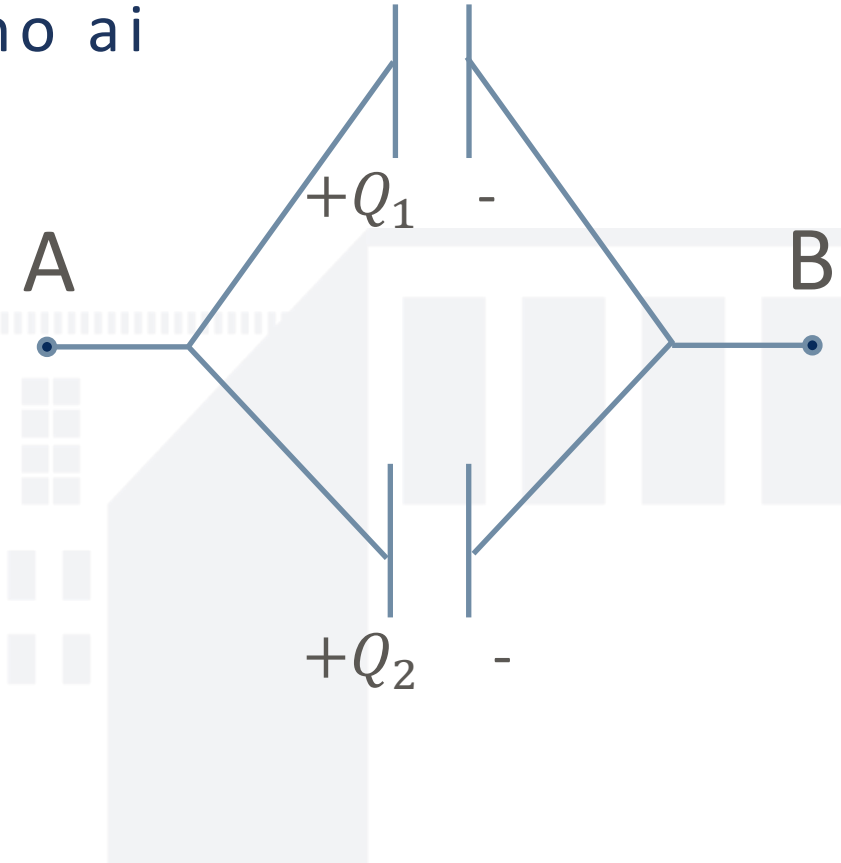
CONDENSATORI IN PARALLELO

Due condensatori connessi in parallelo hanno ai loro capi la stessa differenza di potenziale!

$$\Delta V_1 = \Delta V_2 = \Delta V_{AB}$$

Per la definizione di capacità

$$C_{eq} = \frac{Q}{\Delta V_{AB}} = \frac{Q_1 + Q_2}{\Delta V_{AB}} = \frac{Q_1}{\Delta V_1} + \frac{Q_2}{\Delta V_2} = C_1 + C_2$$

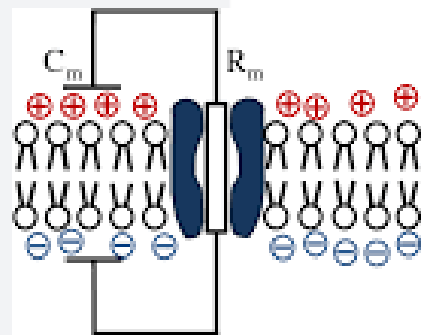


ESERCIZIO 5

Si calcoli:

1. il numero di ioni che devono essere separati da 1 cm^2 di membrana cellulare affinché la loro carica elettrica crei una differenza di potenziale di -90 mV
2. La capacità elettrica della membrana cellulare

Note: lo spessore della membrana è di $80 \text{ \AA}$, la costante dielettrica relativa di membrana è circa di 9.



Biological Membrane

$\approx$



Capacitor

$80 \text{ \AA}$

$[89.6 \text{ nC}; 1.0 \text{ }\mu\text{F}]$

<https://www.semanticscholar.org/paper/Application-of-high-resolution-membrane-capacitance-Carrillo/4a55e307be2311cc55845b99acdb5c37ca92c083>

ESERCIZIO 5

$$1) \quad C = \frac{Q}{\Delta V} \Rightarrow Q = C \Delta V;$$

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \cdot \frac{A}{d} \Rightarrow Q = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \Delta V$$

$$Q = N_{\text{ioni}} \cdot e; \quad N_{\text{ioni}} = \frac{Q}{e} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{e} \cdot \frac{A}{d} \Delta V = 5,6 \times 10^{11}$$

$$2) \quad C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \simeq 1 \times 10^{-6} \text{ F} = 1 \mu\text{F}$$

ESERCIZIO 6

Due condensatori, di capacità $C_1 = 3 \mu F$ e $C_2 = 5 \mu F$ sono connessi in serie e fra le armature estreme viene applicata una differenza di potenziale di 1000 V. Calcolare:

1. La capacità totale
2. La carica elettrica totale
3. Le tensioni ai capi di ciascun condensatore

$[1.87 \mu F; 1.87 \text{ mC}; 625 \text{ V}, 375 \text{ V}]$

ESERCIZIO 6

$$1) \quad C_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{15}{8} \mu F = 1,875 \mu F$$

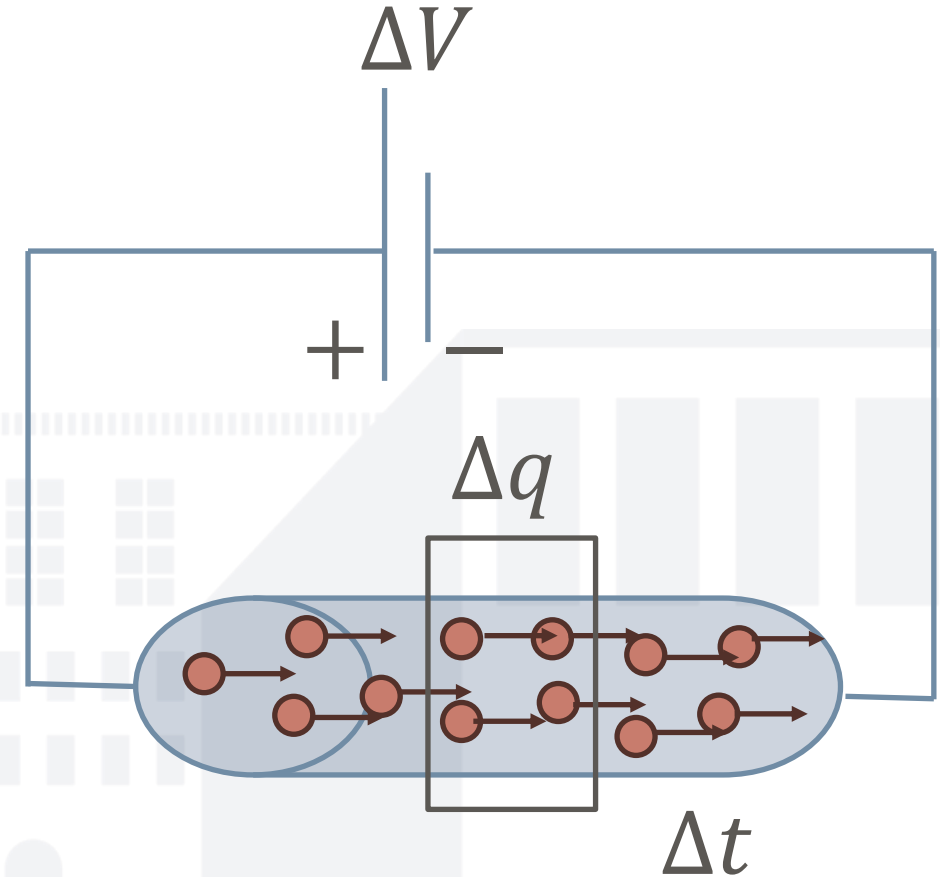
$$2) \quad C_{eq} = \frac{Q}{\Delta V} \Rightarrow Q = C_{eq} \Delta V = 1,875 \text{ mC}$$

$$3) \quad \Delta V_1 = \frac{Q}{C_1} = \frac{1,875 \times 10^{-3} \text{ C}}{3 \times 10^{-6} \text{ F}} = 625 \text{ V}; \quad \Delta V_2 = \frac{Q}{C_2} = \frac{1,875 \times 10^{-3} \text{ C}}{3 \times 10^{-6} \text{ F}} = 375 \text{ V}$$

CORRENTE ELETTRICA

La corrente elettrica continua è un moto di cariche che produce un flusso netto costante di carica in una direzione

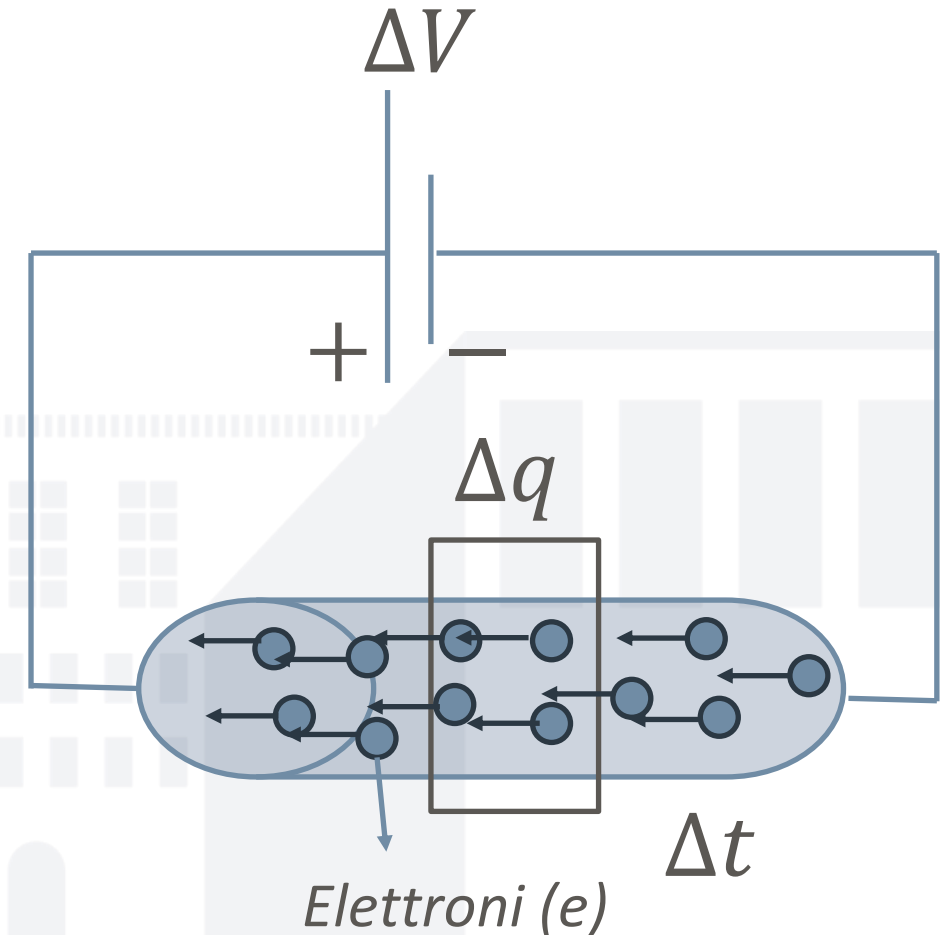
- Per generare una corrente è necessario un campo elettrico che «spinga» le cariche
- Il campo elettrico si genera applicando alle estremità del conduttore una differenza potenziale elettrico (tensione)
- Le **cariche positive** si muovono da punti di potenziale maggiore a punti di potenziale minore tendendo a livellare il potenziale
- Se la differenza di potenziale è mantenuta da un **generatore** (batteria) la corrente è costante



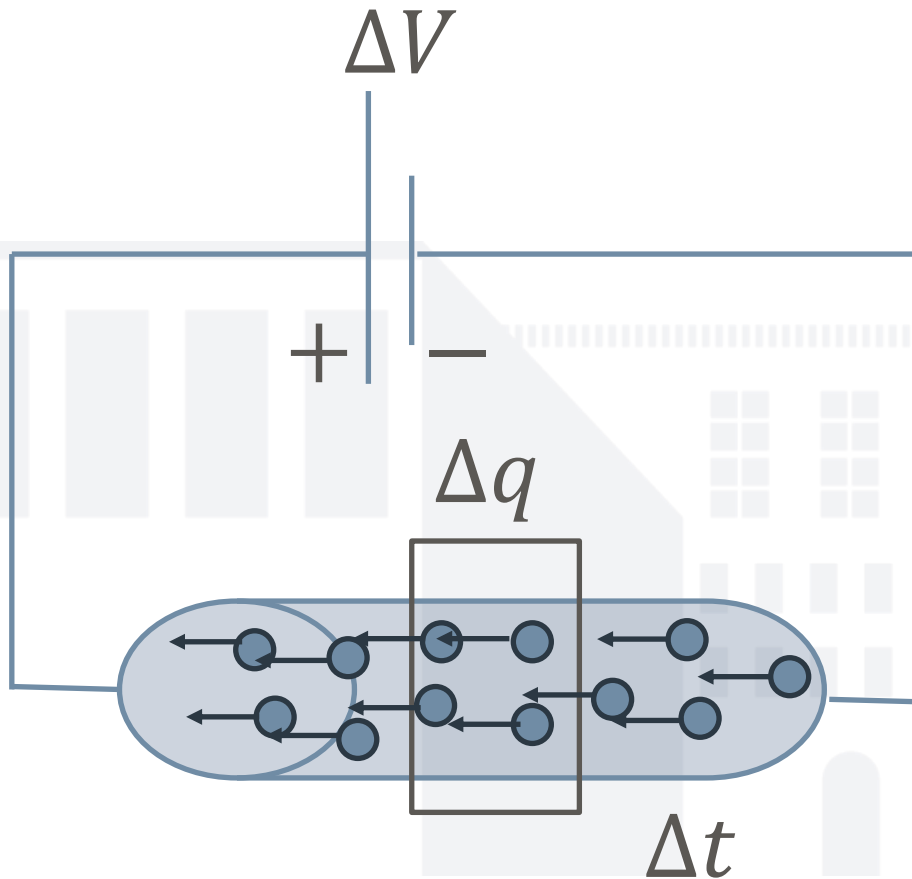
CORRENTE ELETTRICA

La corrente elettrica continua è un moto di cariche che produce un flusso netto costante di carica in una direzione

- Per generare una corrente è necessario un campo elettrico che «spinga» le cariche
- Il campo elettrico si genera applicando alle estremità del conduttore una differenza potenziale elettrico (tensione)
- Le **cariche negative** si muovono da punti di potenziale minore a punti di potenziale maggiore tendendo a livellare il potenziale
- Se la differenza di potenziale è mantenuta da un **generatore** (batteria) la corrente è costante



CORRENTE ELETTRICA



intensità di corrente istantanea

$$i = \frac{dQ}{dt} ; [i] = \frac{C}{s} = A = \text{"ampere"}$$

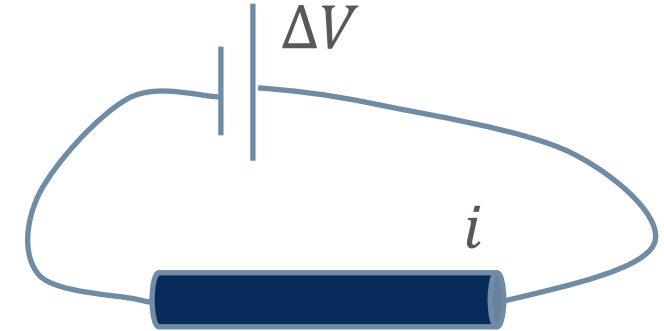
intensità di corrente media

$$i_m = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

se il flusso di carica si mantiene costante

$$i_m = i$$

1° LEGGE DI OHM: LA RESISTENZA



- Si verifica sperimentalmente che la corrente che attraversa una porzione di conduttore è proporzionale alla differenza di potenziale ai capi del conduttore

$i \propto \Delta V$ e, omologamente $\Delta V \propto i$

- La costante di proporzionalità è definita **resistenza elettrica del conduttore**

$$R = \frac{\Delta V}{i}$$

- Si misura in Ohm, $[R] = \Omega = \frac{V}{A}$

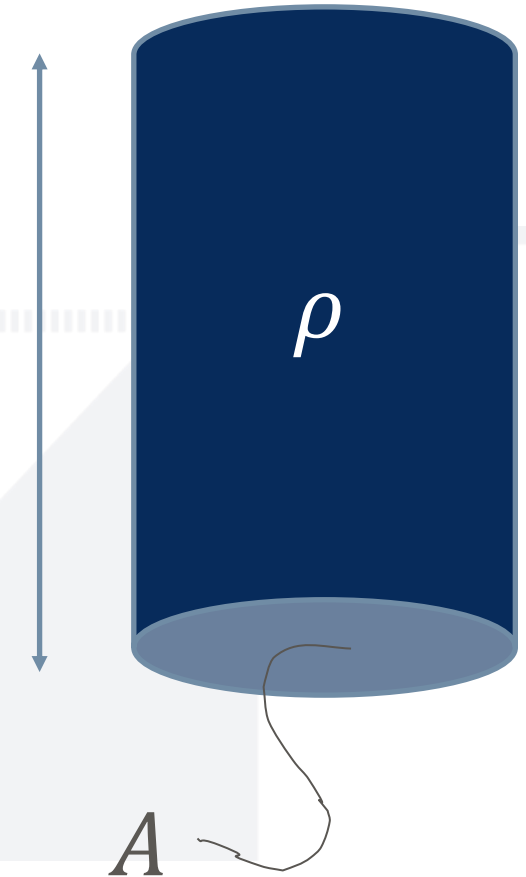
2° LEGGE DI OHM: LA RESISTIVITA'

La resistenza di un conduttore dipende:

1. Dalla sua lunghezza l
2. Dalla sua sezione A
3. Da una proprietà intrinseca del materiale definita **resistività** ρ

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

si capisce intuitivamente con un confronto con la fluidodinamica...



VALORI DI RESISTIVITA'

La resistività è il parametro che determina se un determinato materiale è conduttore, isolante o semiconduttore

TIPO MATERIALE	RESISTIVITÀ TIPICA ($\Omega \times m$)
CONDUTTORE	$10^{-2} - 10^{-8}$
SEMICONDUCTTORE	$10^{-6} - 10^6$
ISOLANTE	$10^{11} - 10^{19}$

VALORI DI RESISTIVITA'

MATERIALE	RESISTIVITÀ TIPICA A 20°C ($\Omega \times m$)	TIPO
ARGENTO	1.6×10^{-8}	CONDUTTORE
RAME	1.7×10^{-8}	CONDUTTORE
ALLUMINIO	2.8×10^{-8}	CONDUTTORE
LIQUIDO INTERSTIZIALE (UOMO)	6×10^3	SEMICONDUCTTORE
SILICIO	10^4	SEMICONDUCTTORE
MEMBRANA DI ASSONE	10^{11}	ISOLANTE
ACQUA BIDISTILLATA	5×10^7	~ISOLANTE
VETRO	10^{15}	ISOLANTE

NOTE SULLA RESISTIVITA'

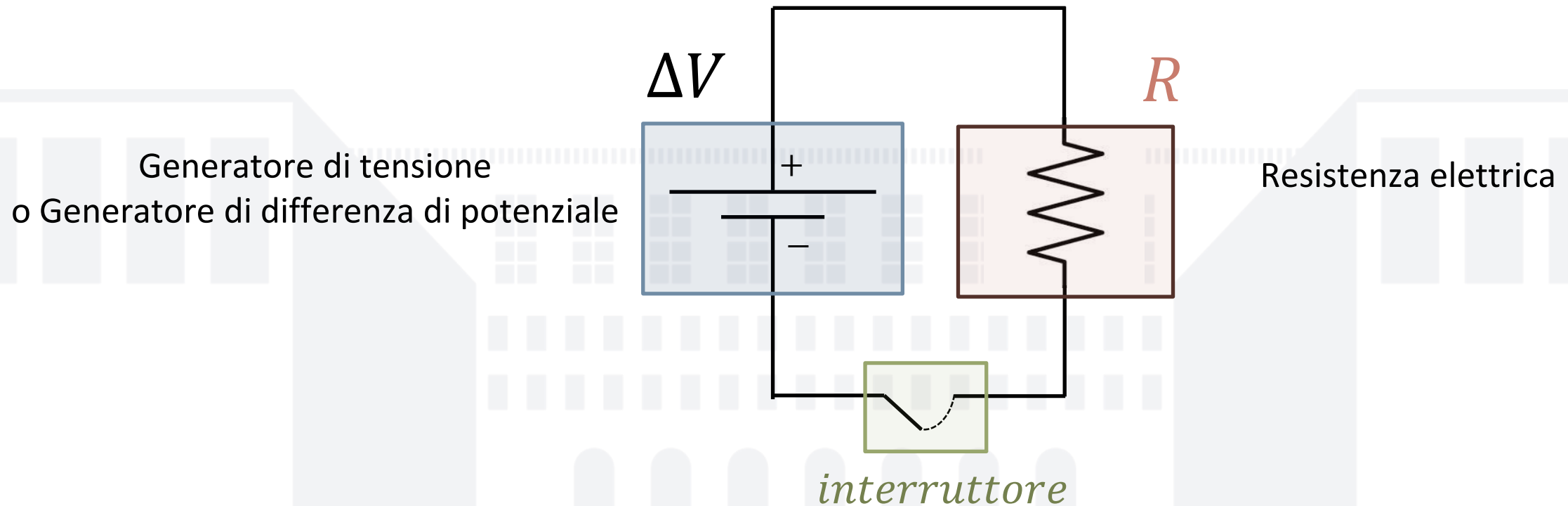
- In un materiale **conduttore** la **resistività** (e quindi la resistenza) **aumenta** leggermente **all'aumentare della temperatura** (modello del gas di elettroni...)
- In un materiale **semiconduttore** la **resistività** (e quindi la resistenza) **diminuisce** drasticamente **all'aumentare della temperatura** (effetto probabilistico/quantistico...)

OFF TOPIC: I NEURONI

Tipo	Classificazione Erlanger-Gasser	Diametro (μm)	mielina	Velocità di conduzione (m/s)	Recettori sensoriali associati
Ia	Aα	13-20	si	80-120	Recettori primari del fuso neuromuscolare
Ib	Aα	13-20	si	80-120	Organo tendineo del Golgi
II	Aβ	6-12	si	33-75	• Recettori secondari del fuso neuromuscolare • Tutti i meccano-recettori cutanei
III	Aδ	1-5	poca	3-30	• Terminazioni nervose libere del tatto e pressione • Nocicettori del tratto spinotalamico laterale • Termorecettori per il freddo
IV	C	0,2-1,5	no	0,5-2	• Nocicettori del tratto spinotalamico anteriore • Termocettori per il caldo

<https://it.wikipedia.org/wiki/Assone>

CIRCUITI ELETTRICI IN CORRENTE CONTINUA



IL GENERATORE DI TENSIONE

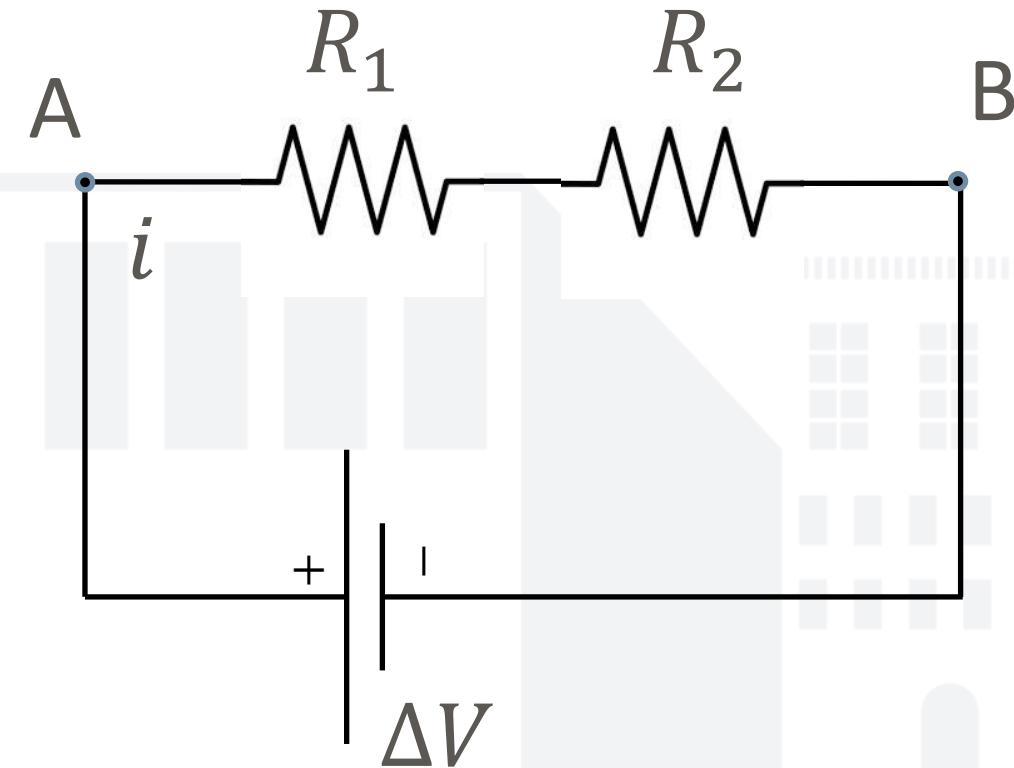
Quando il circuito è aperto (interruttore aperto) ai capi del generatore di tensione è presente un eccesso di cariche positive, da un lato, e negative, dall'altro.

Tale eccesso di cariche è mantenuto da **forze attive** interne al generatore che mantengono separate le cariche di segno opposto. Tali forze possono essere di diversa natura:

- Meccaniche (esempio, dinamo della bicicletta)
- Chimiche (batterie al litio dei dispositivi elettronici)
- Termiche...

Quando il circuito si chiude si ha un moto di insieme di cariche nel circuito = corrente elettrica

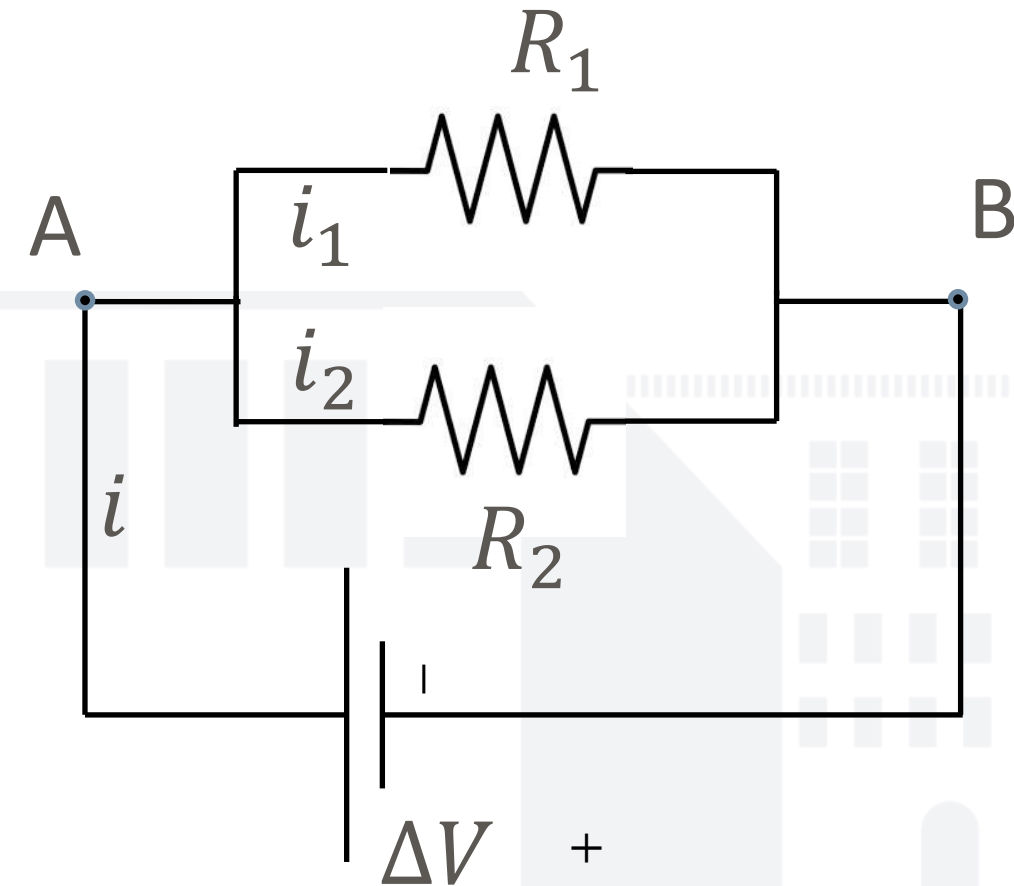
RESISTENZE IN SERIE



- Le resistenze in serie sono attraversate dalla stessa corrente i
- La differenza di Voltaggio tra A e B è data dalla somma delle differenze di Voltaggio ai capi delle resistenze.

$$R_{eq} = \frac{\Delta V_{AB}}{i} = \frac{\Delta V_1}{i} + \frac{\Delta V_2}{i} = R_1 + R_2$$

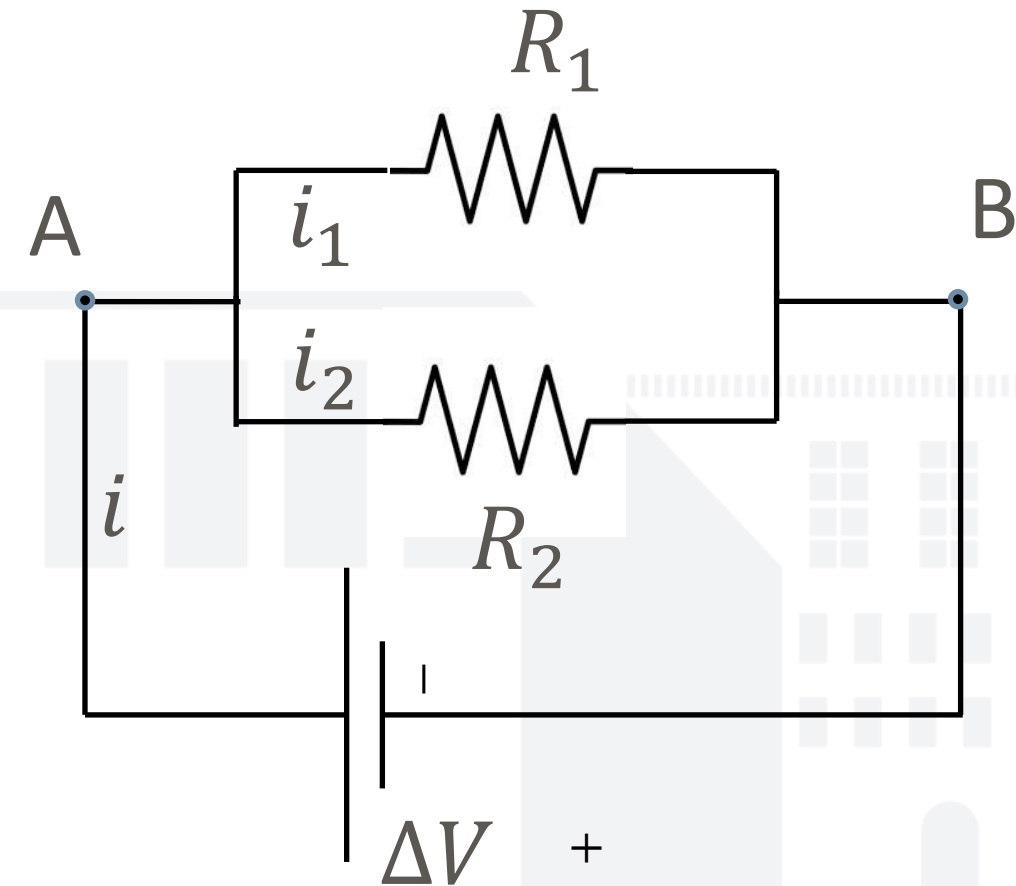
RESISTENZE IN PARALLELO



- Ai capi delle resistenze c'è la stessa differenza di potenziale $\Delta V_1 = \Delta V_2 = \Delta V_{AB}$
- La corrente (i) del circuito si divide tra le due resistenze ($i = i_1 + i_2$).

$$i = \frac{\Delta V_{AB}}{R_{eq}} = i_1 + i_2 = \frac{\Delta V_1}{R_1} + \frac{\Delta V_2}{R_2}$$

RESISTENZE IN PARALLELO

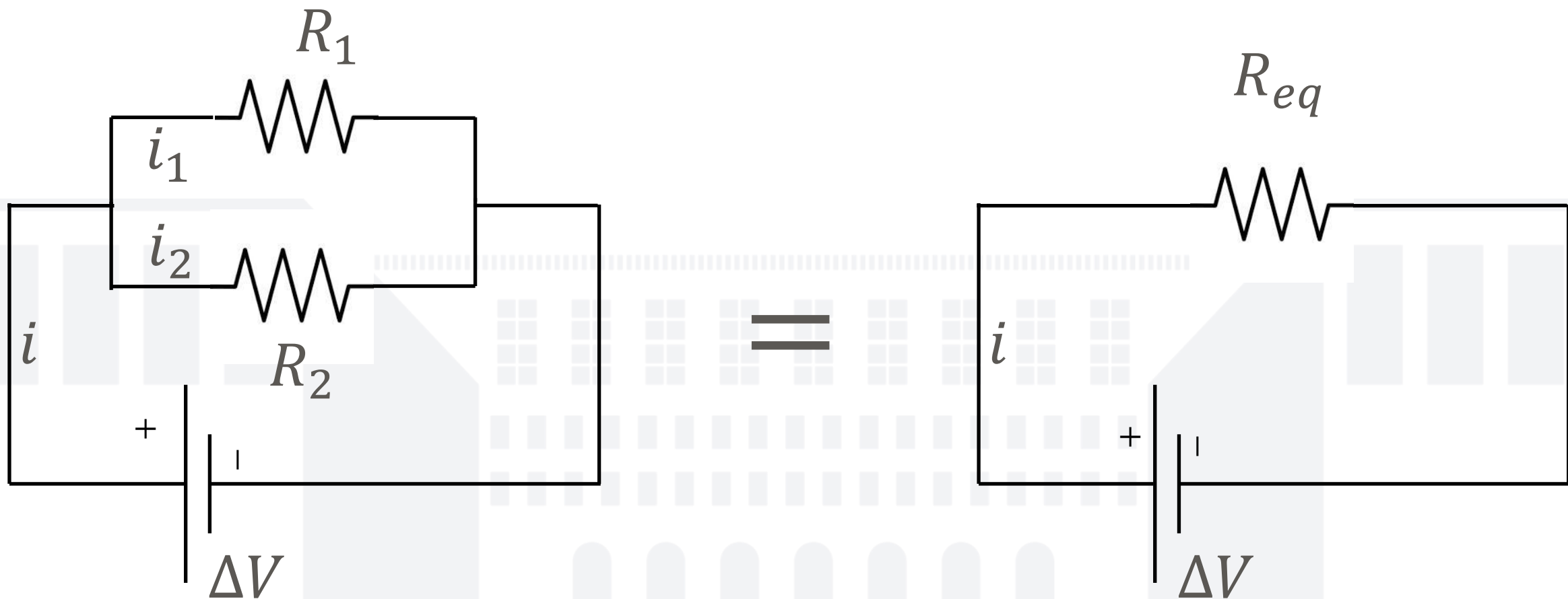


$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$



$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

RESISTENZA EQUIVALENTE



CONDENSATORI E RESISTENZE: RIASSUNTO

	IN SERIE	IN PARALLELO
RESISTENZA EQUIVALENTE	$R_1 + R_2$	$\frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$
CAPACITA' EQUIVALENTE	$\frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}}$	$C_1 + C_2$

POTENZA ELETTRICA: EFFETTO JOULE

In un filo conduttore percorso da corrente, il moto degli elettroni e' «ostacolato» dagli urti con altri elettroni e ioni del conduttore

Durante le collisioni gli elettroni cedono parte della propria energia cinetica

L'energia cinetica ceduta viene convertita, o dissipata, sotto forma di agitazione termica («calore»)

POTENZA ELETTRICA: EFFETTO JOULE

Il lavoro compiuto dal generatore di tensione per far percorrere il circuito ad una quantità di carica Δq e'

$$L = \Delta q \Delta V$$

Ma, se il flusso di carica e' costante, $i = \frac{\Delta q}{\Delta t}$, quindi

$$L = i \Delta t \Delta V$$

La potenza necessaria per mantenere una corrente i e'

$$P = \frac{L}{\Delta t} = \frac{i \Delta t \Delta V}{\Delta t} = i \Delta V = R i^2 = \frac{\Delta V^2}{R}$$

Questa Potenza viene interamente dissipata sotto forma di calore → Effetto Joule

ESERCIZIO 7

Negli interventi di emergenza, per arrestare la fibrillazione ventricolare si applica un'intensa scarica elettrica per mezzo di due elettrodi collegati ad un condensatore carico (defibrillatore cardiaco). La scarica, la cui durata è di alcuni millisecondi, può causare il momentaneo arresto del muscolo cardiaco dopo il quale il cuore riparte con un battuto regolare.

Se il condensatore ha capacità $C = 30.0 \mu F$ e viene caricato con una differenza di potenziale di $5000 V$, si calcoli l'intensità media della corrente che attraversa il torace se in una scarica ella durata di $5 ms$ il condensatore perde il 65 % della sua carica

[19.5 A]

ESERCIZIO 7

$$C = \frac{Q}{\Delta V} \Rightarrow Q = C \Delta V ; \quad \frac{\Delta Q}{Q} = 65\% \Rightarrow \Delta Q = 65\% Q$$

$$i_m = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{65\% Q}{\Delta t} = 65\% \frac{C \Delta V}{\Delta t} = 0,65 \times \frac{30 \times 10^{-6} \times 5 \times 10^3}{5 \times 10^{-3}} = 19,5 \text{ A}$$

ESERCIZIO 8

Durante una terapia elettroconvulsivante (*elettroshock*) si fa passare attraverso il cervello, per un tempo di $0,1\text{ s}$ una corrente di intensità 140 mA applicando alle tempie del paziente una differenza di potenziale di 110 V . Si calcolino

1. La resistenza offerta dal paziente
2. La potenza elettrica impiegata dall'apparecchio
3. L'energia dissipata per effetto Joule nel cervello del paziente

$[0.79\text{ k}\Omega, 15.4\text{ W}, 1.54\text{ J}]$

ESERCIZIO 8

$$1) \quad \Delta V = R \dot{i} \Rightarrow R = \frac{\Delta V}{\dot{i}} = \frac{110 \text{ V}}{140 \times 10^{-3} \text{ A}} = 786 \, \Omega = 0,79 \text{ k}\Omega$$

$$2) \quad P = \Delta V \cdot \dot{i} = 110 \text{ V} \times 140 \times 10^{-3} \text{ A} = 15,4 \text{ W}$$

$$3) \quad E = P \cdot \Delta t = 15,4 \text{ W} \times 0,1 \text{ s} = 1,54 \text{ J}$$

ESERCIZIO 9

- a) La membrana dell'assone non è un isolante perfetto. Essa ha resistività $10^9 \Omega \text{ cm}$. Se lo spessore della membrana è di $80 \text{ \AA}$ qual è la resistenza di 1 cm^2 di membrana?
- b) L'assoplasma è un discreto conduttore di elettricità con resistività di $200 \Omega \text{ cm}$. Calcolare la resistenza dell'assoplasma al passaggio di corrente lungo l'assone per un tratto lungo 1 cm e di diametro $10 \mu\text{m}$.
- c) Perché la resistenza di 1 cm^2 di membrana risulta minore della resistenza di 1 cm di assoplasma anche se la resistività di membrana è maggiore di quella dell'assoplasma

[800 Ω , 25.5 $M\Omega$, sezione minore, lunghezza maggiore]

ESERCIZIO 9

$$a) R_H = \rho_H \cdot \frac{l}{A} = 10^3 \Omega \cdot \cancel{\text{cm}} \cdot \frac{80 \times 10^{-8} \cancel{\text{cm}}}{1 \cancel{\text{cm}^2}} = 800 \Omega$$

$$b) R_A = \rho_A \frac{l}{A} = 200 \Omega \cdot \cancel{\text{cm}} \cdot \frac{1 \cancel{\text{cm}}}{\pi (5 \times 10^{-4})^2 \cancel{\text{cm}^2}} = 255 \text{ M}\Omega$$

c) sezione minore e lunghezza maggiore

ESERCIZIO 10

Una batteria da 9 V è collegata ad un circuito composto da due resistenze $R_1 = 2.5\text{ k}\Omega$ ed $R_2 = 1.5\text{ k}\Omega$ disposte in parallelo. Calcolare:

1. L'intensità di corrente nel circuito
2. La potenza sviluppata per effetto Joule dalle resistenze
3. L'energia consumata dopo 15 minuti.

$[0.94\text{ k}\Omega; 9.6\text{ mA}; 86\text{ mW}; 77\text{ J}]$

ESERCIZIO 10

$$1) R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} ; R_{eq} = \frac{\Delta V}{i} ; i = \frac{\Delta V}{R_{eq}} = \frac{\Delta V}{R_1 R_2 (R_1 + R_2)} = \frac{9V}{3.75(k\Omega)^2} \cdot 4 k\Omega = 9,6 mA$$

$$2) P = \Delta V \cdot i = 86 mW$$

$$3) E = P \cdot \Delta t = 86 mW \cdot 15 \times 60 s = 77 J$$

ESERCIZIO 11

La torpedine Atlantica (*Tetronarce nobiliana*) e' un grosso pesce elettrico che usa l'elettricità per attacco e difesa. Un tipico individuo e' in grado di produrre potenziali fino a 220 V, che originano impulsi di corrente fino a 15 A in acqua marina.

Tali impulsi sono tipicamente di durata 2 ms e avvengono a “esplosioni”, in treni di impulsi con frequenza di ripetizione 200 Hz.

Si valuti:

1. La potenza istantanea sviluppata in un impulso
2. La potenza media di un treno di impulsi
3. Il lavoro totale compiuto dagli organi elettrici per un treno di 10 impulsi
4. Il costo di tale energia se si dovesse acquistarla sul mercato libero dell'energia al prezzo di 0,13 Euro/kWh
[3.3 kW; 1.3 kW; 66 J; $2,4 \cdot 10^{-6}$ Euro]



https://en.wikipedia.org/wiki/Atlantic_torpedo

ESERCIZIO 11

$$1) P_i = \Delta V \cdot i = 220 \text{ V} \cdot 15 \text{ A} = 3.3 \text{ kW}$$

$$2) \text{ la carica in un impulso } \bar{Q} = i t^*$$

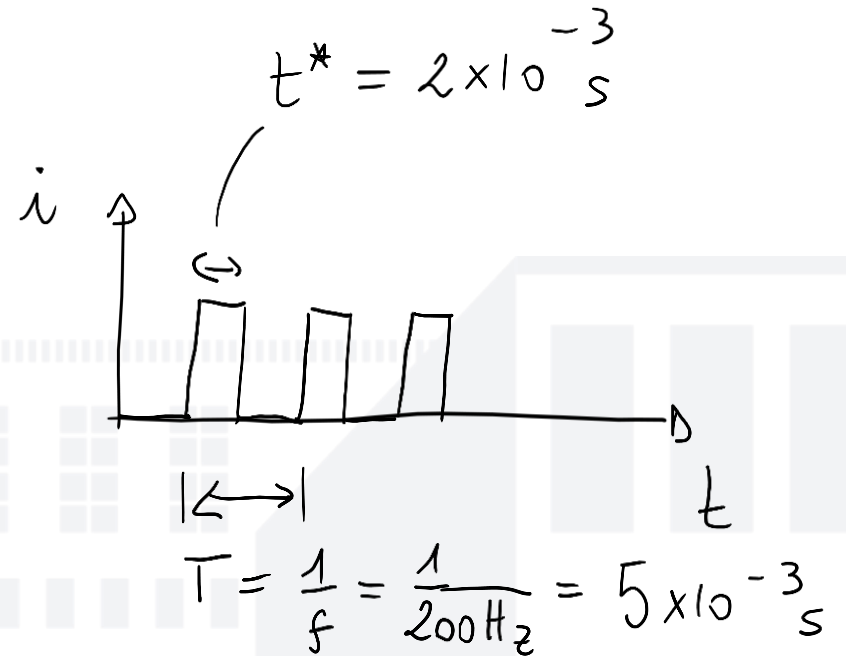
$$= 15 \text{ A} \cdot 2 \times 10^{-3}$$

$$= 0,03 \text{ C}$$

la corrente media sarà

$$i_m = \frac{Q}{T} = \frac{0,03 \text{ C}}{5 \times 10^{-3} \text{ s}} = 6 \text{ A}$$

$$\Rightarrow P_m = \Delta V \cdot i_m = 220 \text{ V} \cdot 6 \text{ A} = 1,3 \text{ kW}$$



ESERCIZIO 11

$$3) \quad L_{\text{Tot}} = N_{\text{impulsi}} \cdot L = 10 \times i_m \cdot \Delta V \cdot T = 10 \times 6 \text{ A} \times 220 \text{ V} \times 5 \times 10^{-3} \text{ s} \\ = 66 \text{ J}$$

$$4) \quad 1 \text{ J} = 1 \text{ W} \cdot \text{s} = 1 \text{ W} \cdot \frac{1}{3600} \text{ ore} = \frac{1}{3600} \text{ Wh}$$

$$L_{\text{Tot}} = 66 \text{ J} = 0,018 \text{ Wh}$$

$$\text{Costo} = L_{\text{Tot}} \cdot \text{prezzo} = 0,018 \text{ Wh} \cdot 0,13 \frac{\text{Euro}}{\text{kWh}} = 2,4 \times 10^{-6} \text{ Euro}$$