

## Elettrostatica

- La forza di gravità è una delle forze fondamentali presenti in natura in quanto governa le proprietà della materia a larga scala come la struttura del cosmo.
- La seconda classe di forze fondamentali è quella delle forze elettromagnetiche: esse sono responsabili della struttura della materia (colore, durezza, conducibilità) come noi la conosciamo.
- Gli atomi sono costituiti da elettroni (negativi) e nuclei (positivi) che interagiscono mediante forze elettriche; la struttura della materia dipende dalle forze elettriche che si esercitano fra gli atomi.
- Causa di queste interazioni è la **carica elettrica**. Sperimentalmente si verifica che esistono due tipi di carica elettrica, convenzionalmente chiamati **positiva** e **negativa**.

# Elettrostatica

- L'esistenza di due tipi di cariche fa sì che le forze elettromagnetiche possano essere attrattive o repulsive: cariche dello stesso segno si respingono, mentre cariche di segno opposto si attraggono.
- Chiameremo **forze elettriche** le forze che si esercitano fra corpi carichi in quiete, e **forze magnetiche** quelle che si esercitano fra cariche in moto.
- L'elettrostatica si occupa delle forze fra particelle cariche in quiete, oppure in moto, ma, con velocità sufficientemente piccola da rendere trascurabile l'interazione magnetica.

## La carica elettrica

- La carica di un elettrone è uguale e opposta a quella del protone:  $|e| = 1.6 \times 10^{-19}$  Coulomb.
- Gli atomi hanno uguale numero di protoni ed elettroni,  $Z$  che ne definisce la specie chimica.
- Il numero di neutroni (a parità di numero di protoni) definisce i vari isotopi di un atomo.
- Gli atomi possono diventare carichi se il loro numero di elettroni cambia, se vengono cioè aggiunti o rimossi degli elettroni: atomi carichi vengono detti Ioni.
- **Principio di conservazione della carica:** le cariche elettriche non possono essere nè create nè distrutte. Si possono avere trasferimenti di carica, detti correnti elettriche.
- La carica elettrica di ogni elemento è un multiplo intero della carica elettrica elementare  $e$ .

## Conduttori e isolanti

- È facile generare correnti elettriche nei metalli, poiché i loro elettroni esterni sono praticamente liberi (gas di elettroni) di muoversi da un atomo all'altro all'interno del materiale. I materiali metallici sono quindi detti **conduttori**.
- I metalli sono buoni conduttori di corrente per lo stesso motivo per cui sono buoni conduttori di calore, a causa della mobilità dei loro elettroni esterni, chiamati **elettroni di conduzione**.
- Altri materiali, come il vetro o la plastica, non possiedono elettroni altrettanto mobili, e quindi non sono buoni conduttori. Questi materiali vengono quindi detti **isolanti**. Esistono poi dei materiali con caratteristiche intermedie: i **semiconduttori**.
- I materiali possono quindi essere classificati sulla base della loro capacità di ospitare correnti elettriche.

## Elettrizzazione per strofinio, contatto e induzione

In una rappresentazione "planetaria" dell'atomo, gli elettroni "orbitano" attorno al nucleo e quelli più esterni sono meno legati, e possono essere rimossi più facilmente, ionizzando l'atomo.

Elettrizzazione per **strofinio** è basata sul cedere ed acquistare elettroni se viene fornita energia. Chi cede elettroni diventa positivamente carico ed è quindi in grado di attrarre oggetti negativamente carichi.

Elettrizzazione per **contatto**: se un oggetto negativamente carico viene messo a contatto con un oggetto neutro, gli elettroni vanno dall'oggetto negativo verso quello neutro che quindi si caricherà negativamente.

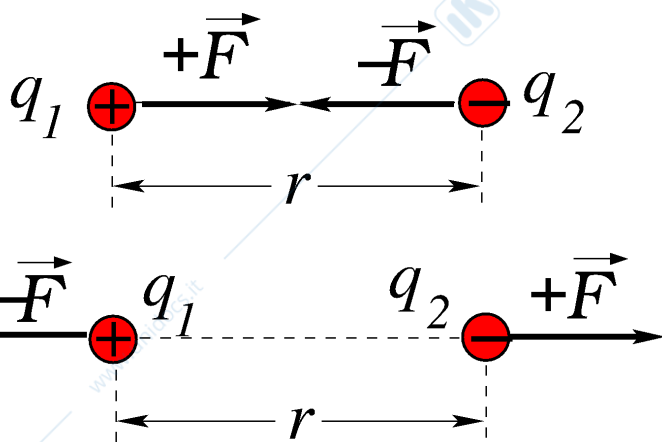
Elettrizzazione per **induzione**: si avvicina un oggetto carico ad un oggetto neutro senza toccarlo. Se due sfere conduttrici neutre sono poste a contatto, e si avvicina un conduttore negativamente carico si ha che la carica negativa si va a disporre il più lontano possibile a causa della repulsione elettrostatica. Se separiamo le due sfere, una rimarrà caricata negativamente e l'altra positivamente.

Il fenomeno dell'induzione è possibile solo per materiali conduttori, in quanto richiede uno spostamento macroscopico degli elettroni all'interno del corpo.

## La legge di Coulomb

1785 Coulomb:  $|\vec{F}|$  fra  $q_1$  e  $q_2$  dipende dalle cariche e da  $1/r^2$ :

$$|\vec{F}| = K \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$



$K$  dipende dal sistema di unità di misura scelto, e dal mezzo interposto fra le due cariche.

$K = N \cdot m^2 / C^2$  Nel S.I. l'unità di misura della carica è il Coulomb ( $C$ ), (multiplo di  $e$ ).

1 Coulomb è quella carica che, se posta alla distanza di 1 metro da una carica uguale, genera una forza di interazione di  $8.98 \times 10^9 N$ . Nel vuoto:  $K = 8.98 \times 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$

Per semplicità si usa esprimere la costante come:

$$K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

$\epsilon_0$  costante dielettrica del vuoto:  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \frac{C^2}{N \cdot m^2}$

Legge di Coulomb fra due cariche puntiformi nel vuoto:

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1 q_2|}{r^2} \quad (1)$$

Se il mezzo non è il vuoto:

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{|q_1 q_2|}{r^2} \quad (2)$$

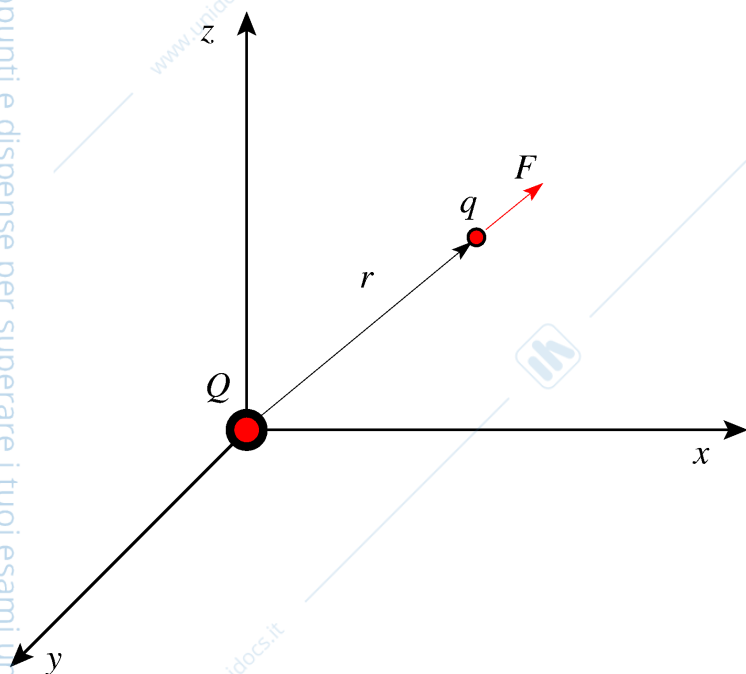
dove  $\epsilon_r$  è un numero puro che prende il nome di **costante dielettrica relativa**, dipendente dal mezzo interposto fra le cariche.

Acqua a  $20^\circ C$ ,  $\epsilon_r = 80.4$ .

Materiale	$\epsilon$
Vuoto	1
Vetro	5-10
Mica	3-6
Mylar	3.1
Neoprene	6.70
Plexiglas	3.40
Poliethilene	2.25
Teflon	2.1
Acqua	80.4
Glicerina	42.5
Ammoniaca liquida(-78 C)	25
Benzene	2.284
Aria(1 atm)	1.00059
Aria(100 atm)	1.0548

**Tabella:** Alcuni valori della costante dielettrica relativa  $\epsilon_r$ .

## Il campo elettrico



La forza  $\vec{F}$  che si esercita sulla carica  $q$  dipende dalla sua posizione  $\vec{r}$ .

Per la legge di Coulomb

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

Questa equazione può risciversi:

$$\vec{F} = q \left[ \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \right]$$

$Q$  genera un campo elettrico

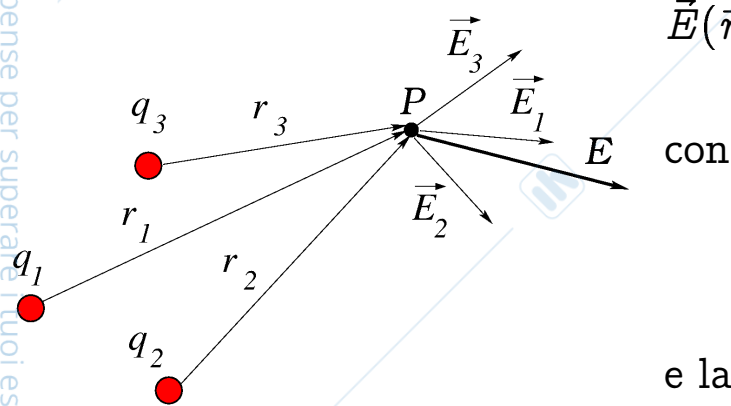
$$\vec{F} = q\vec{E} \Rightarrow \vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

con:

$$\vec{E} = \vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$$

## Principio di sovrapposizione dei campi elettrici

$n$  cariche  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$  nei punti  $\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_n$ , il campo elettrico complessivo è la somma vettoriale dei campi dovuti a ciascuna carica.



$$\vec{E}(\vec{r}) = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i(\vec{r}) = \vec{E}_1(\vec{r}) + \vec{E}_2(\vec{r}) + \dots + \vec{E}_n(\vec{r})$$

con

$$\vec{E}_i(\vec{r}_i) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{|\vec{r}_i|^2} \quad i = 1, \dots, n$$

e la forza che agisce su  $q$  è data da:

$$\vec{F}(\vec{r}) = q\vec{E}(\vec{r}).$$

Se  $q = 1C$ , si ha che:  $\vec{F} = \vec{E}$ , il campo elettrico può essere definito come la forza che agisce su una carica unitaria "esploratrice", una carica cioè che rivela e misura il campo  $\vec{E}$  attraverso la forza che agisce su di essa quando viene posta in varie posizioni  $\vec{r}$ .

## Rappresentazione del campo elettrico

- I campi elettrici possono, come originariamente proposto da Faraday, essere rappresentati mediante le **linee di forza**.
- Le linee di forza iniziano sempre dalle cariche positive e terminano su quelle negative senza interruzione e senza intersecarsi. Il numero di linee di forza che escono dalla carica positiva o che entrano in quella negativa, dipendono dall'intensità della carica.
- Le linee di campo indicano la direzione del campo elettrico: in ogni punto il campo è tangente alla linea stessa.
- L'intensità del campo elettrico è proporzionale alla densità di linee di forza (numero di linee che attraversano una superficie unitaria): tanto più le linee sono vicine, tanto maggiore è l'intensità del campo.

www.unidocs.it

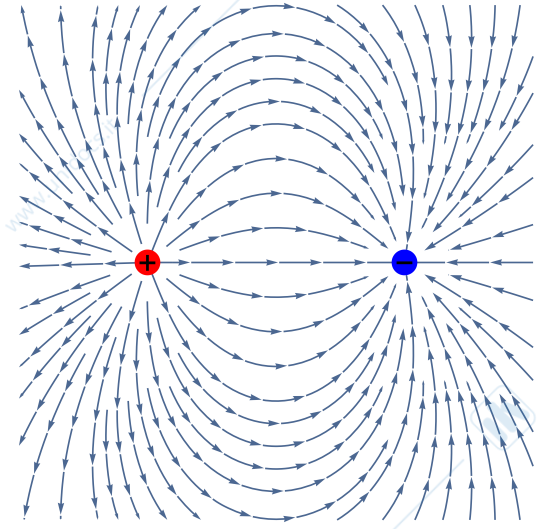
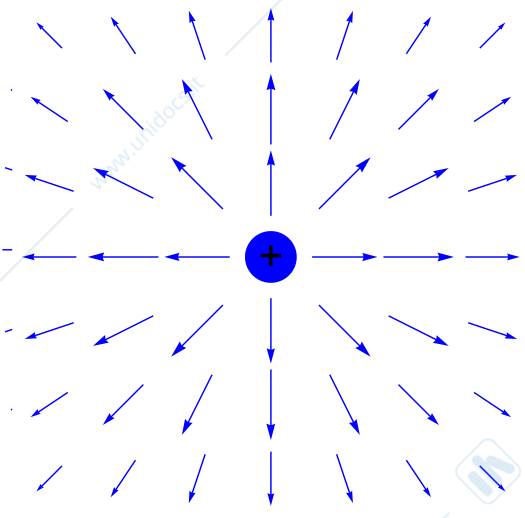
www.unidocs.it

www.

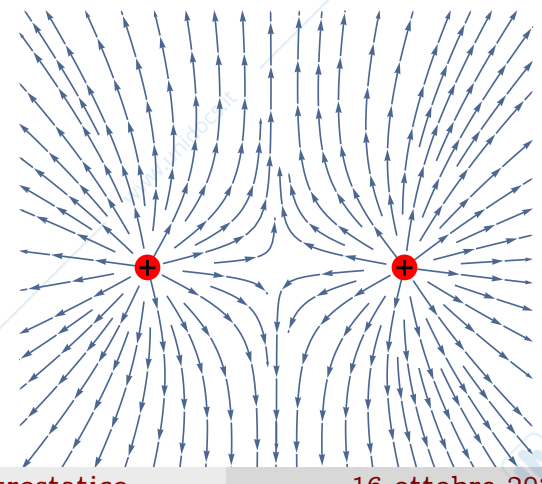
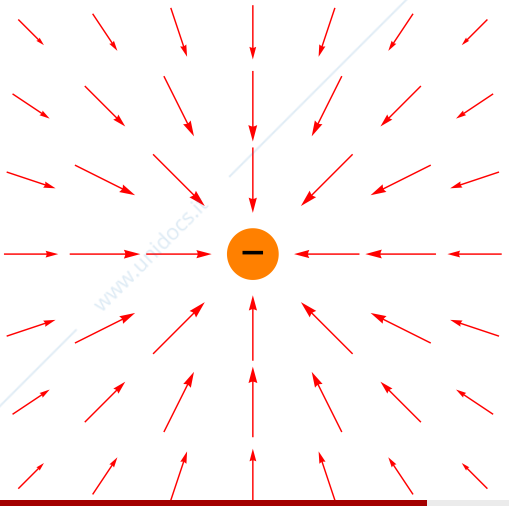
www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

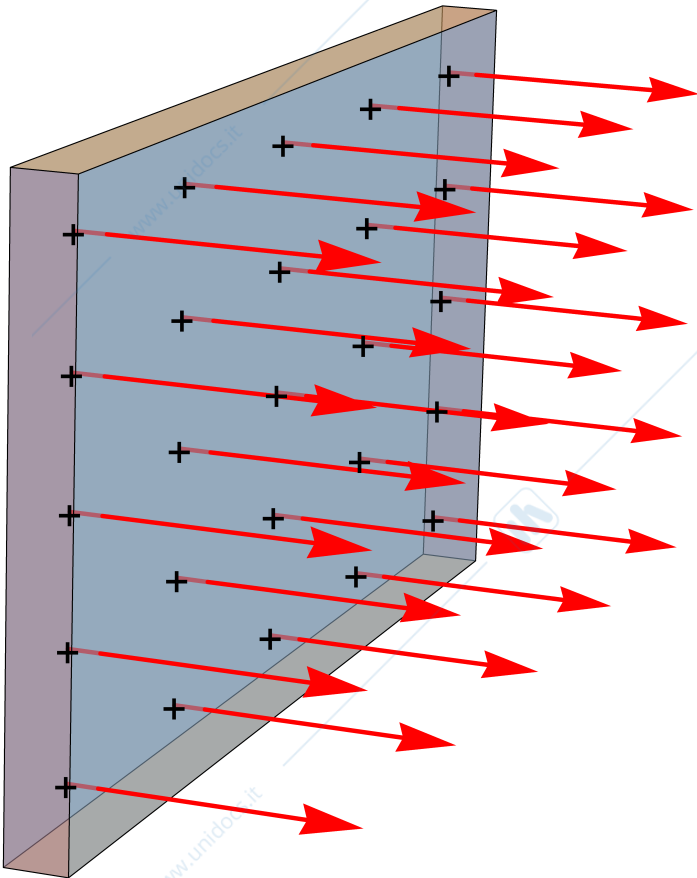
www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

a



b





Campo elettrico generato da una piastra positivamente carica.

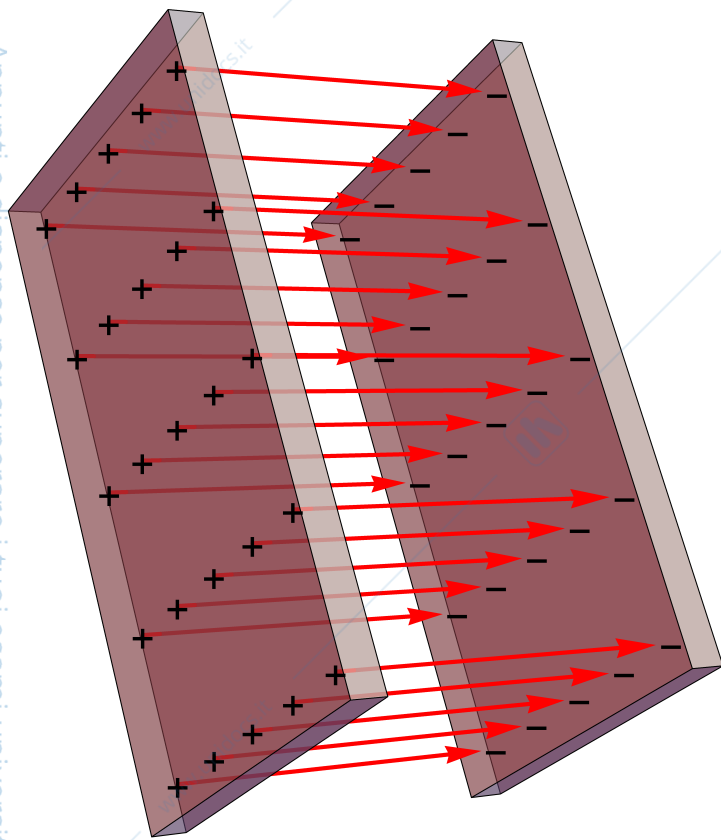
Una delle configurazioni di carica più semplici è quella ottenuta distribuendo cariche dello stesso segno in maniera uniforme, con una densità costante, su di un piano. Se indichiamo con  $\sigma$  la densità di carica per unità di superficie  $A$ :

$$\sigma = \frac{q}{A}$$

si può dimostrare che il campo elettrico in prossimità della superficie del piano è costante e vale:

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

$\epsilon_0$  costante dielettrica del vuoto.



Campo elettrico fra due piani uniformemente carichi: **condensatore**.

Notiamo che, anche nel caso del condensatore, come per il piano uniformemente carico, il campo elettrico è costante e perpendicolare alla superficie. Per il calcolo dell'intensità del campo, da motivi di simmetria (o applicando il Teorema di Gauss), si ottiene che:

$$E = \frac{q}{\epsilon_0 A} = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

$\sigma$  densità superficiale di carica.

## Campo elettrico nei conduttori

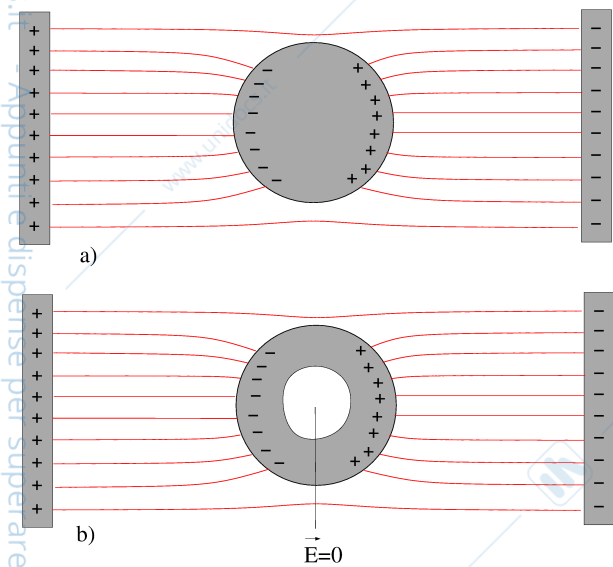
Nei conduttori le cariche sono mobili, e ciò condiziona la disposizione del campo elettrico sia sulla superficie che all'interno. Se all'interno del conduttore si accumulano cariche elettriche di segno uguale, fra queste inizia ad esercitarsi una forza repulsiva, che fa sì che queste cariche si dispongano il più lontano possibile l'una dall'altra, cioè sulla superficie del conduttore. Una volta che le cariche si sono disposte tutte sulla superficie si raggiunge una situazione di equilibrio stabile e le cariche non si muovono più.

**In un conduttore le cariche si dispongono sulla superficie.**

Quando le cariche sono disposte sulla superficie, all'interno del conduttore, per motivi di simmetria il campo elettrico è nullo.

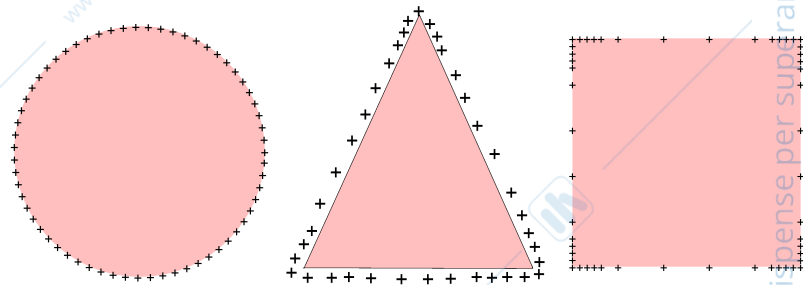
**All'interno di un conduttore il campo elettrico è nullo.**

Se immergiamo un conduttore in un campo elettrico, si crea una condizione all'interno del conduttore per cui il campo elettrico è nullo; perciò, le linee di forza del campo elettrico non penetrano all'interno del conduttore. Questo effetto è la base per la costruzione degli schermi elettrostatici, chiamati gabbie di Faraday in onore del loro ideatore, Michael Faraday.



(a) Conduttore in un condensatore. Le linee di forza del campo elettrico non penetrano all'interno del conduttore (linee di forza sempre perpendicolari al conduttore).

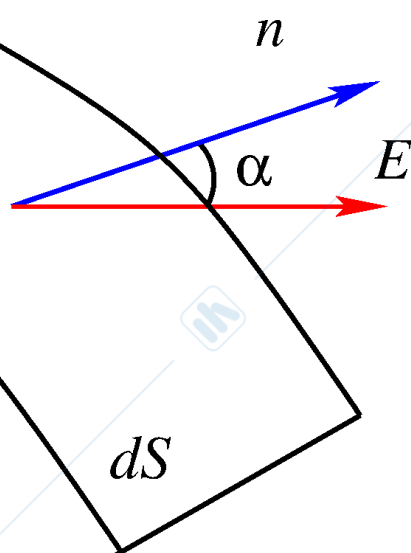
(b) Il campo elettrico all'interno del conduttore è nullo.



Le cariche elettriche nei conduttori si dispongono in superficie e si addensano in corrispondenza delle zone in cui il conduttore ha degli spigoli. *Effetto punta* dei conduttori.

## Il teorema di Gauss

$E$  (carica puntiforme) diminuisce col quadrato della distanza.



flusso infinitesimo del campo elettrico attraverso  $dS$  la quantità scalare:

$$d\Phi(E) \equiv \vec{E} \cdot \vec{n} \cdot dS = E \cdot \cos \alpha \cdot dS$$

$\vec{n}$  versore normale alla superficie

Su una superficie generica si sommano tutti i contributi infinitesimi:

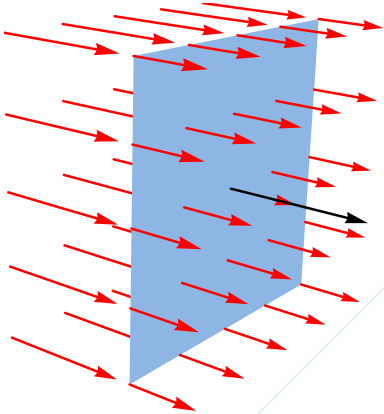
$$\Phi(E) = \int_S d\Phi = \int_S \vec{E} \cdot \vec{n} dS$$

Superficie chiusa  $\Phi_S(E) = \oint_S \vec{E} \cdot \vec{n} dS$

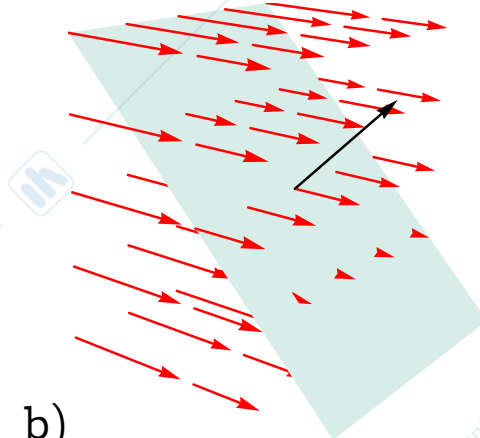
Per superfici semplici  $S$  e campo costante :

$$\Phi_S(\mathbf{E}) = S \cdot \mathbf{E} \cdot \cos(\alpha).$$

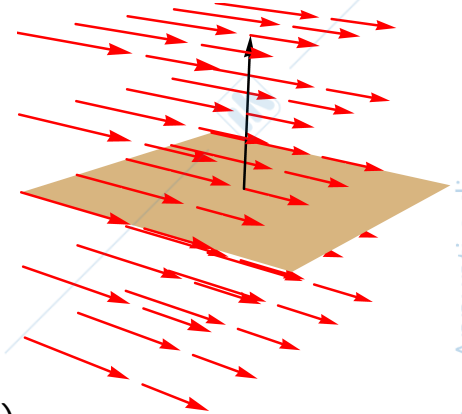
Visualizzazione geometrica:



a)



b)



c)

a) Il flusso è massimo ( $\cos(\alpha) = 1$ ), b) Il flusso ha un valore intermedio fra il massimo ed il minimo  $\cos(\alpha) = \frac{\sqrt{2}}{2}$ , c) Il flusso ha valore minimo ( $\cos(\alpha) = 0$ ).

**Teorema di Gauss: il flusso del campo elettrico attraverso una superficie chiusa è proporzionale alla carica netta contenuta dentro la superficie:**

$$\Phi_S(E) = \frac{1}{\epsilon_0} Q_{int}$$

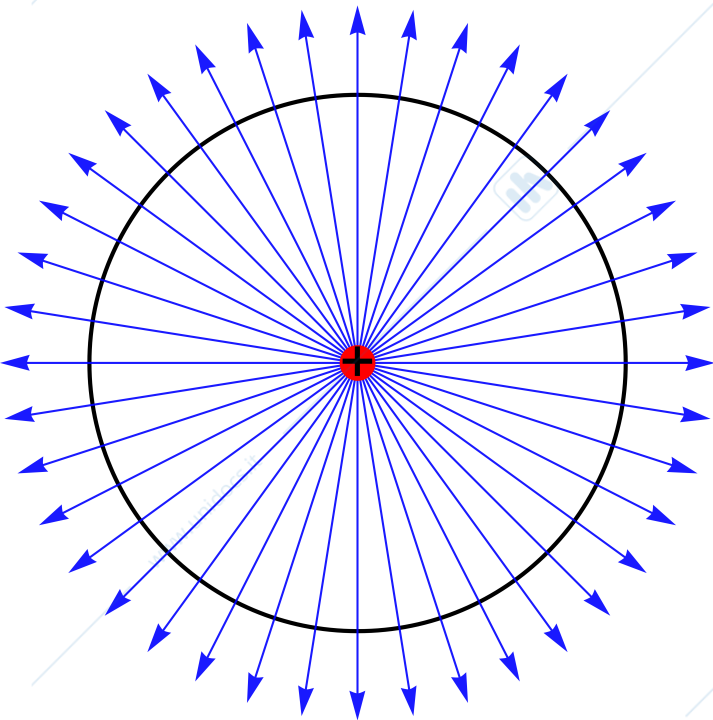
$Q_{int}$  somma algebrica delle cariche interne.

Carica singola:

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

Linee di forza  $\perp$  ad  $S$  e l'area è uguale a  $4\pi r^2$ :

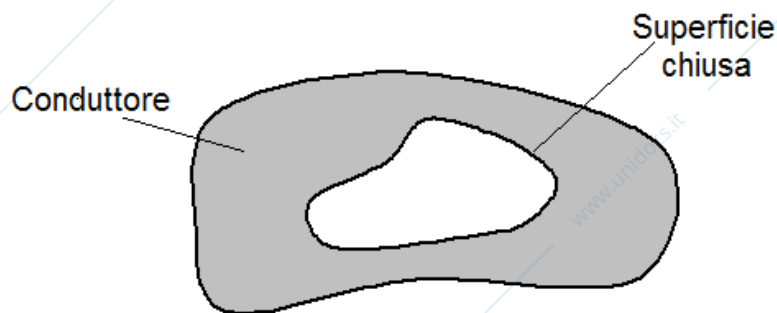
$$\begin{aligned}\Phi &= S \cdot E \cos(\alpha) \\ &= 4\pi \cdot r^2 \cdot \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \\ &= \frac{q}{\epsilon_0}\end{aligned}$$



Supponiamo di caricare un conduttore con una certa carica  $Q$ . Poiché all'interno del conduttore  $\vec{E} = 0$ , applicando il Teorema di Gauss a una qualunque superficie chiusa interna al conduttore otteniamo che:

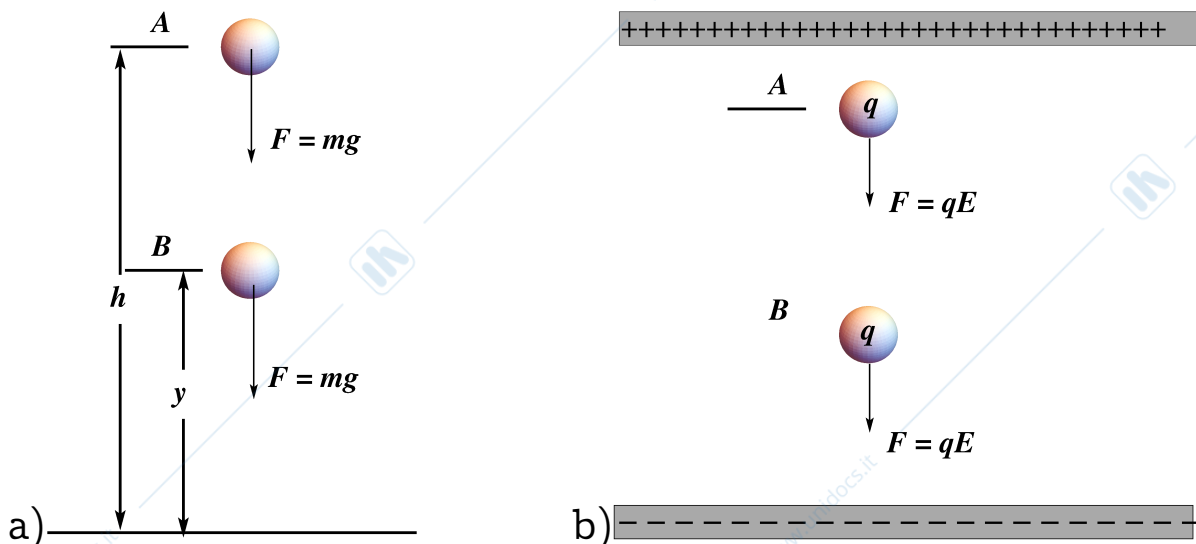
$$\oint_S \vec{E} \cdot \vec{n} dS = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0} = 0.$$

La carica contenuta entro ogni superficie chiusa interna al conduttore deve essere nulla poichè, in un conduttore carico, le cariche si dispongono sulla sua superficie. Risultato vero anche per il conduttore cavo: le cariche statiche si raccolgono sulla superficie esterna.

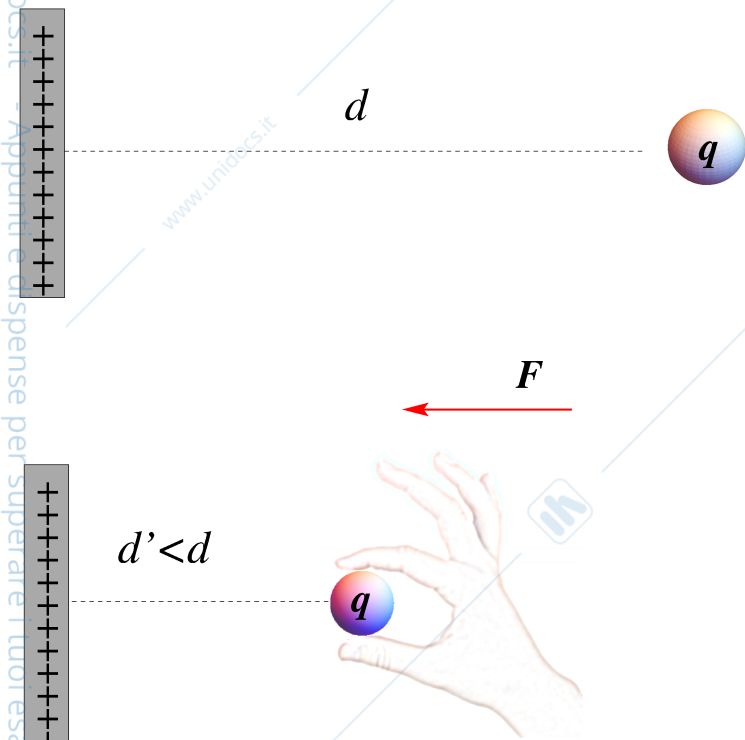


## Lavoro del campo elettrico, Energia potenziale e Potenziale elettrico

Come in Meccanica, un oggetto carico possiede un'energia potenziale che dipende dalla sua posizione all'interno di un campo elettrico.



- a) La forza di gravità  $mg$  agisce sulla massa  $m$ . Questa forza compie lavoro per spostare  $m$  da punto A a punto B.
- b) Il campo elettrico  $E$  genera una forza  $qE$  agente sulla carica  $q$  (supposta positiva) e, nel momento in cui la carica si sposta dal punto A al punto B questa forza esegue un lavoro.



L'energia potenziale della carica  $q$  positiva è inversamente proporzionale alla distanza dalla distribuzione di carica positiva. Per avvicinare la carica alla distribuzione occorre esercitare una forza  $F$  e quindi compiere un lavoro che cambia l'energia potenziale della carica.

Questo lavoro cambia l'energia potenziale dell'oggetto carico come il lavoro fatto per sollevare un grave ne cambia la sua energia potenziale. Se la particella carica viene poi rilasciata, acquista un'accelerazione che la spinge lontana dalla piastra carica e la sua energia potenziale si trasforma in cinetica.

## Energia potenziale elettrostatica

Ricordando la definizione di lavoro meccanico (lavoro compiuto da un campo di forze) :

$$dL = \vec{F}(\vec{r}) \cdot d\vec{r}$$

Ora, essendo la forza elettrostatica  $\vec{F}(\vec{r}) = q\vec{E}(\vec{r})$  si ha:

$$dL = q\vec{E}(\vec{r}) \cdot d\vec{r}$$

La forza di Coulomb è una forza conservativa e quindi il suo lavoro non dipende dal percorso. Anche in questo caso possiamo definire una funzione **energia potenziale elettrostatica** la cui variazione è opposta al lavoro meccanico, e quindi, se chiamiamo  $U$  questa funzione abbiamo:

$$L_{AB} = -\Delta U$$

## Potenziale elettrico, definizione e proprietà

Oltre al lavoro della forza elettrica si può anche definire il "lavoro" del campo elettrico. Poiché il campo elettrico è la forza elettrica sulla carica di prova  $E = F/q$ , questo lavoro non sarà altro che il lavoro meccanico diviso per la carica:  $L/q$ . L'energia potenziale della carica, definisce una funzione la cui variazione dà il lavoro elettrico:

$$V = \frac{U}{q}$$

L'unità di misura del potenziale elettrico nel S.I. è  $N/C$  detti Volt ( $V$ ). Il lavoro elettrico è dato dalla variazione di potenziale elettrico:

$$L_{E_{AB}} = -\Delta V$$

- Il valore del potenziale  $V$  in un punto  $\vec{r}$  non ha significato fisico (la d.d.p. si).
- Le cariche positive vengono accelerate dalle regioni a potenziale maggiore verso quelle a potenziale minore, mentre le cariche negative hanno un comportamento opposto.
- Elettron-Volt  $eV$ : (energia di ionizzazione, massa di particelle).  $E'$  l'energia potenziale acquisita da un elettrone accelerato da una ddp di 1 Volt:

$$1e \cdot V = 1.6 \times 10^{-19} C \times 1 V = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Joule}$$

- Una **superficie equipotenziale** è una superficie sulla quale il potenziale elettrico è costante in ogni punto. Per le cariche puntiformi il potenziale è uguale se  $r$  si mantiene uguale, per cui le superfici equipotenziali sono delle sfere centrate nella carica.
- All'aumentare della distanza  $r$  dalla carica il potenziale diminuisce.
- Se una carica elettrica si muove su una superficie equipotenziale allora la forza elettrica compie lavoro nullo.

## Esempi di energia potenziale e potenziale elettrico

Energia potenziale di una carica singola (positiva).

Poiché  $L = F \cdot r$  otteniamo :

$$L = F \cdot r = \frac{qQ}{4\pi r^2} \cdot r = \frac{qQ}{4\pi r}$$

Per cui l'energia potenziale  $U$  è data da:

$$U = \frac{qQ}{4\pi r}$$

Dall'energia potenziale elettrica è facile ottenere il potenziale elettrico ricordando che  $V = U/q$ :

$$V = \frac{Q}{4\pi r}$$

In un condensatore si ha  $E$  costante  $F = q \cdot E$ .

Il lavoro meccanico per trasportare una carica da una piastra all'altra è dato da  $F \cdot \Delta s$ .

Quindi, la differenza di potenziale elettrico :

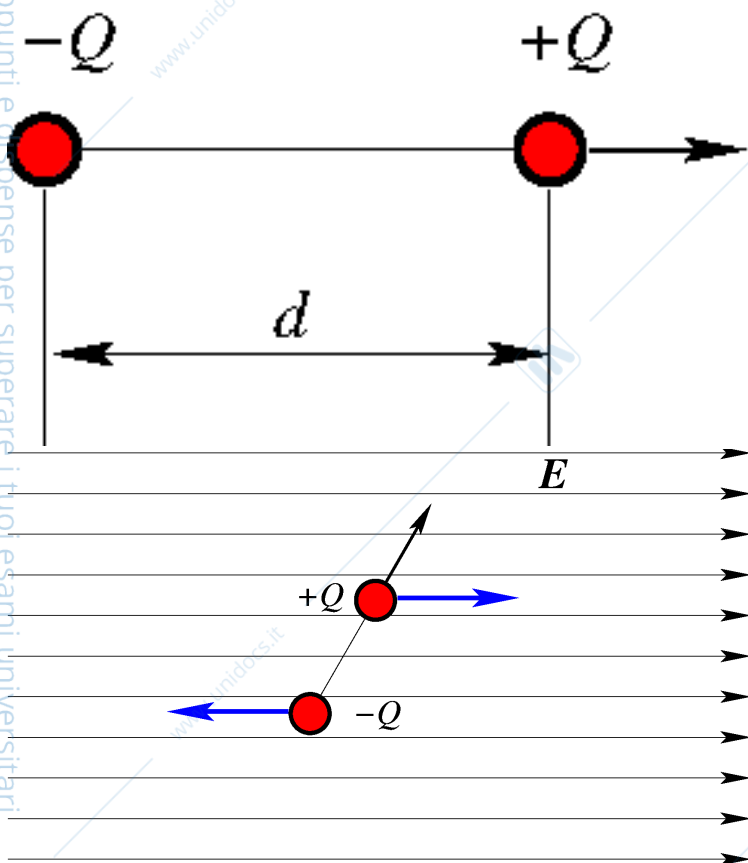
$$-L/q = \Delta V = -qE\Delta s/q$$

$$E = -\frac{\Delta V}{\Delta s}$$

Questa relazione dice che il campo elettrico è dato dal **gradiente di potenziale**: variazione di potenziale sulla distanza.

Il campo elettrico si misura in  $V/m$ .

## Il dipolo elettrico



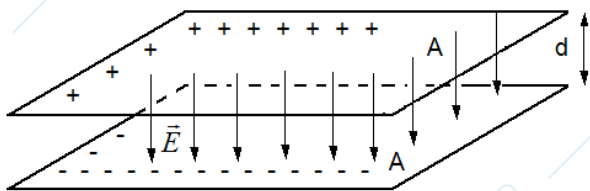
A partire dal dipolo elettrico si definisce un vettore  $\vec{p}$  detto momento di dipolo elettrico, il cui modulo è:

$$|\vec{p}| = Q \cdot d$$

ed è diretto dalla carica  $-Q$  alla carica  $+Q$ . Il dipolo elettrico, se posto in un campo elettrico, si orienta in maniera tale da minimizzare la sua energia potenziale  $U = -\vec{p} \cdot \vec{E}$ .

**Condensatore: due conduttori isolati,  $+q$  e  $-q$  detti "armature".**

Condensatore piano: piastre parallele di area  $A$  a distanza  $d$ .



Campo elettrico fra le armature uniforme e nullo altrove

Il potenziale varia linearmente:

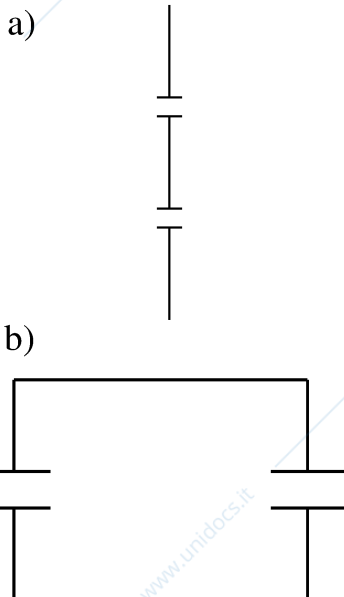
$$\Delta V = Ed.$$

- $V$  ddp tra le armature
- $q$  carica sulle piastre
- "Capacità"  $C = \frac{q}{V}$
- $C$  dipende solo dalla geometria (forma e distanza) del condensatore e quantifica la carica accumulata.
- Misura SI  $C/V$  (Coulomb/Volt): Farad ( $F$ ).

$$\text{Per il condensatore piano: } C = \epsilon \frac{A}{d}$$

$C$  aumenta con la superficie  $A$ , con l'inverso della distanza  $d$  e con il potere isolante del mezzo tra le armature.

Nelle applicazioni elettrotecniche un condensatore è indicato con il simbolo  $\parallel$ . I condensatori possono essere collegati “in serie “ o “in parallelo”.



Due condensatori in serie sono equivalenti ad un unico condensatore di capacità

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

Due condensatori in parallelo sono equivalenti ad un unico condensatore di capacità

$$C = C_1 + C_2$$

## Energia accumulata in un condensatore

Condensatore con cariche  $+q$  e  $-q$  e ddp  $V$ , per spostare  $dq$  da una piastra all'altra, si compie un lavoro:

$$dL = V \cdot dq$$

poichè  $V = q/C$ , si ha

$$dL = \frac{q \cdot dq}{C}$$

$L$  dipende da  $q$  e da  $C$ . Il lavoro di carica (da  $q = 0$  a  $q = Q$  è):

$$L = \int_0^Q \frac{q dq}{C} = \frac{1}{C} \int_0^Q q dq = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$

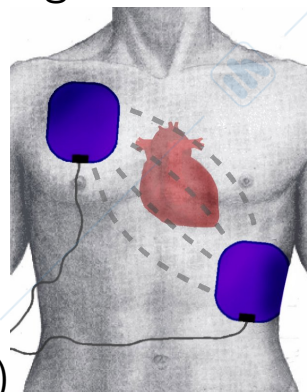
A condensatore scarico non si ha campo elettrico fra le armature, mentre quando è carico è presente un campo elettrico. Il lavoro  $L$  corrisponde all'energia del campo elettrico. Poiché  $C = Q/V$ , si può anche scrivere:

$$L = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} CV^2$$

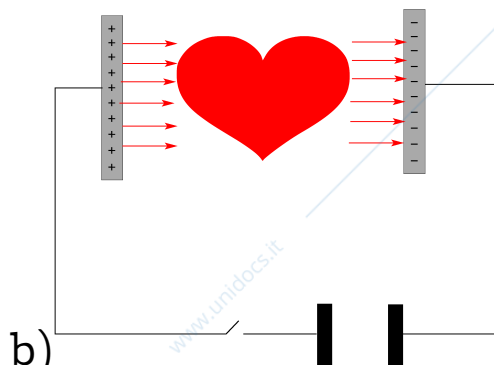
## Applicazioni BioMediche

Le applicazioni in campo biomedico dei fenomeni elettrostatici sono innumerevoli: 1) effetti dei campi elettrici agli organismi viventi, 2) misure di attività bioelettriche (attività cerebrale, muscolare, e persino cellulare).

- Potenziale di riposo in cellule elettricamente eccitabili e non. Questi potenziali variano da  $20 \text{ mV}$  a  $-70 \text{ mV}$
- Potenziali d'azione in cellule eccitabili (comportamento non Ohmico)
- Misure di potenziali elettrici
- Elettroencefalografia, Elettromiografia ed Elettrocardiografia



a)

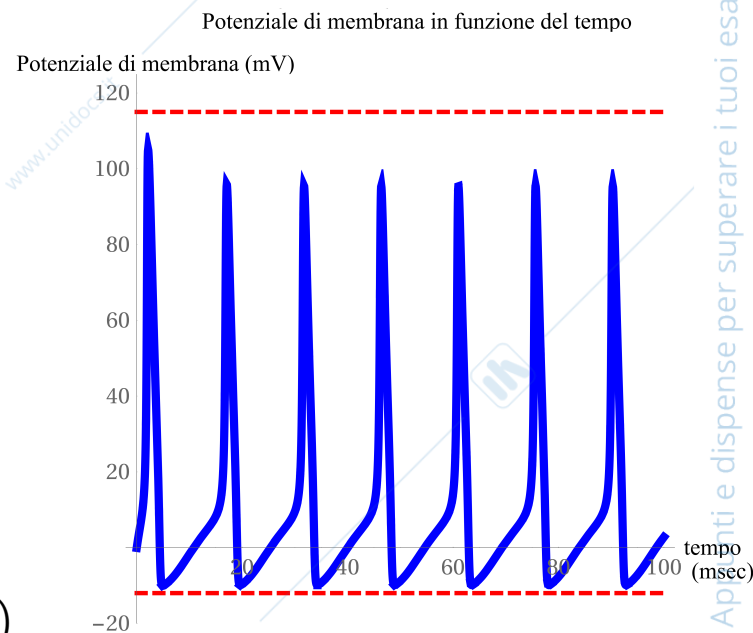
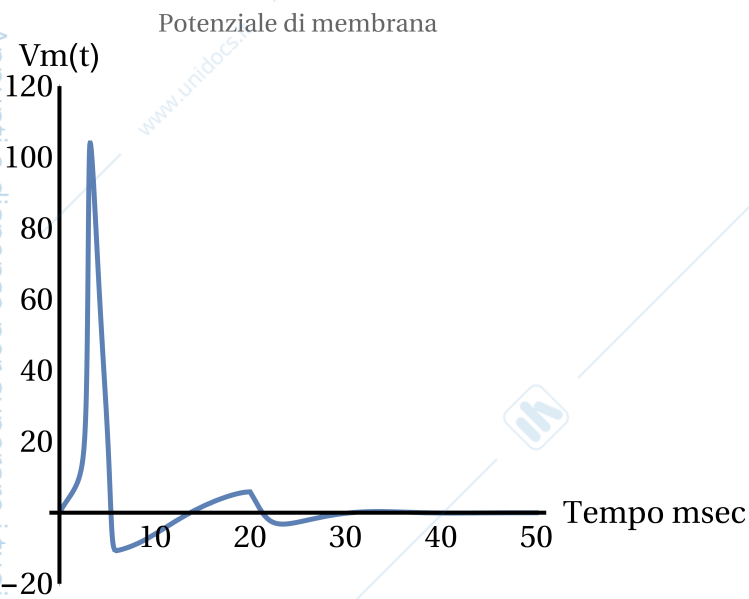


b)

Durante un attacco cardiaco, il cuore produce battiti non regolari: **fibrillazione cardiaca** e se questo perdura si può avere la morte. Ciò può essere fermato da una scarica elettrica rapida e potente che attraversi il cuore. Defibrillatore cardiaco: due elettrodi planari connessi ad un condensatore generano una scarica elettrica (pari anche a  $1000\text{ V}$ ) per pochi millisecondi: dopo pochi secondi il cuore riprende il suo battito regolare.

a) I due elettrodi vanno applicati sul torace ai lati del cuore; b) schema semplificato del defibrillatore, che praticamente consiste in un condensatore.

- Il sistema nervoso trasmette informazioni tramite impulsi elettrici.
- **impulso di depolarizzazione**: il potenziale di membrana di ogni assone passa da negativo a positivo.
- Gruppi di assoni formano i nervi, e formano anche sinapsi
- Il potenziale di membrana a riposo  $V_{eq} = \frac{RT}{zF} \log\left(\frac{I_{ext}}{I_{int}}\right)$
- Quando il potenziale di membrana cambia (canali ionici) l'assone inizia a "condurre".
- L'innesco del potenziale d'azione è un fenomeno "digitale" che dipende da una soglia



Tipici grafici di potenziali d'azione: a) potenziale d'azione singolo; b) treno di potenziali d'azione. Le misure sono state svolte sull'assone gigante del calamaro, e quindi i valori del potenziale di membrana e quello del picco del potenziale d'azione sono diversi da quelli umani.

Molte tecniche diagnostiche utilizzate in medicina si basano sul fatto che in alcuni punti della superficie del corpo umano si trovano a potenziali elettrici diversi. Le differenze di potenziale tipiche sono piccole, sull'ordine dei  $\mu V$  o di poche centinaia di  $\mu V$ .

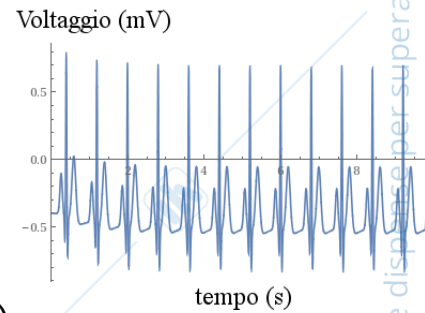
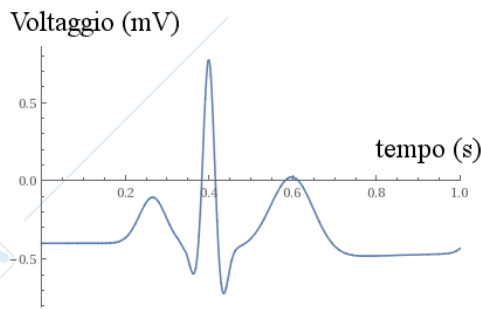
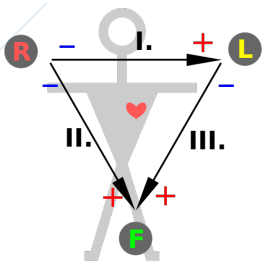
Segnale	Ampiezza
Elettrocardiogramma (ECG)	$1 \text{ mV}$
Elettroencefalogramma (EEG)	$10\text{-}100 \mu V$
Elettromiogramma (EMG)	$300 \mu V$
Elettro-Oculogramma	$500 \mu V$
Potenziale di membrana	$10\text{-}100 \text{ mV}$

Questi segnali elettrici, se opportunamente amplificati, possono essere rilevati da vari dispositivi quali quelli utilizzati in Elettrocardiografia, Elettroencefalografia, Elettromiografia etc. Queste ddp danno informazioni sull'attività elettrica delle cellule coinvolte, ad esempio le cellule neuronali e muscolari. L'attività elettrica di gruppi di queste cellule può essere rilevata anche sulla superficie del corpo umano.

Anche le cellule muscolari sono elettricamente eccitabili (rispondono ad un impulso di corrente in modo attivo e che quindi generano un potenziale d'azione); le cellule elettricamente non eccitabili danno una risposta graduata e non generano potenziali d'azione.

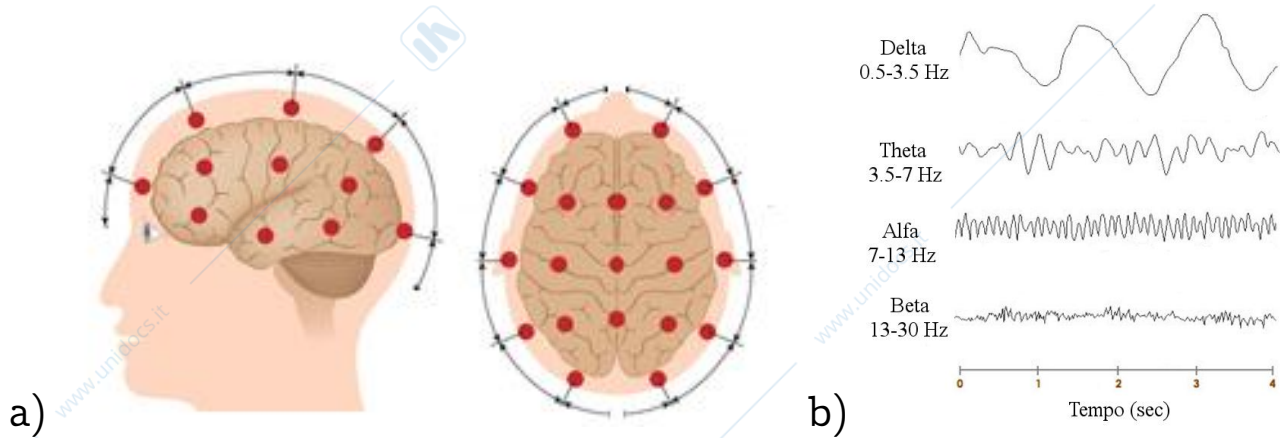
Un tipico tracciato elettrocardiografico è ottenuto tramite elettrodi che vengono sistemati sulla superficie del corpo umano. La differenza di potenziale fra due punti cambia ad ogni battito, formando una serie di potenziali elettrocardiografici (la forma dell'elettrocardiogramma dipende anche da come si sistemano gli elettrodi).

Da un'analisi di un tracciato ECG si notano delle regioni caratteristiche, dette P, Q, R, S e T che sono associabili a fasi specifiche del ciclo cardiaco. Le alterazioni nell'ECG sono usate per individuare aritmie, fibrillazioni o stati patologici dell'attività cardiaca.



a) Rappresentazione del triangolo di Einthoven per le derivazioni elettrocardiografiche. b) Singolo potenziale d'azione cardiaco. c) Treno di potenziali d'azione associati al battito cardiaco.

L'Elettroencefalografia è la tecnica che consente di registrare l'attività elettrica cerebrale risultante dai potenziali d'azione di gruppi di neuroni. Il dispositivo consiste di un numero variabile di elettrodi (da uno ad un centinaio) che vengono posizionati in varie regioni del cranio. Il grafico della differenza di potenziale in funzione del tempo viene detto Elettroencefalogramma (EEG). Le varie parti dell'EEG sono chiamate onde o ritmi. Il ritmo principale del cervello è chiamato ritmo (o onda)  $\alpha$  e anomalie dell'onda  $\alpha$  possono essere collegate a disturbi neurologici quali le sindromi di affaticamento o i disturbi del sonno.



**Figura:** a) Una disposizione tipica degli elettrodi per EEG. b) Curve elettroencefalografiche che mostrano i ritmi più comuni ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$ ,  $\theta$ ).