

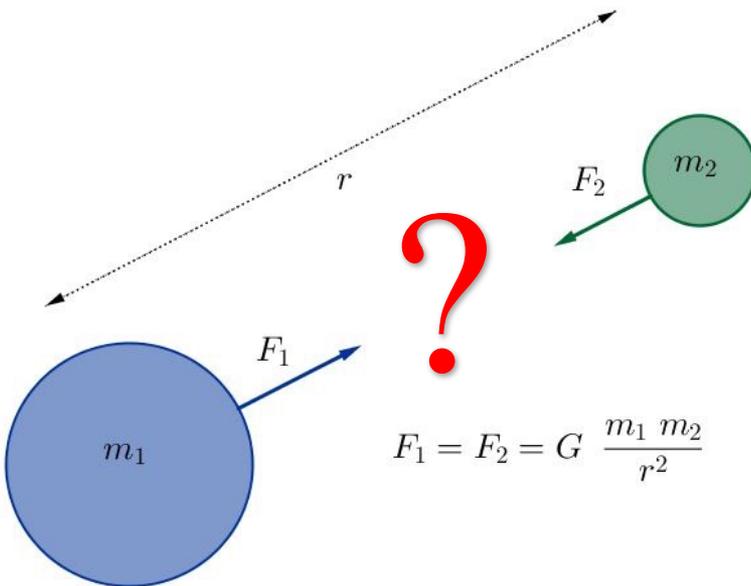
# L'enigma dell'azione a distanza delle forze

Abbiamo visto che una delle proprietà comuni sia all'interazione gravitazionale che a quella elettrostatica (in quanto interazioni fondamentali) è la cosiddetta “**azione a distanza**”, cioè la capacità di tali tipi di forze di esercitare attrazione o repulsione *senza bisogno di un contatto diretto* tra gli oggetti coinvolti nell'interazione, e che l'enigma di questa azione a distanza è stato risolto, nell'Ottocento, per mezzo dell'introduzione del concetto di **CAMPO**.

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$



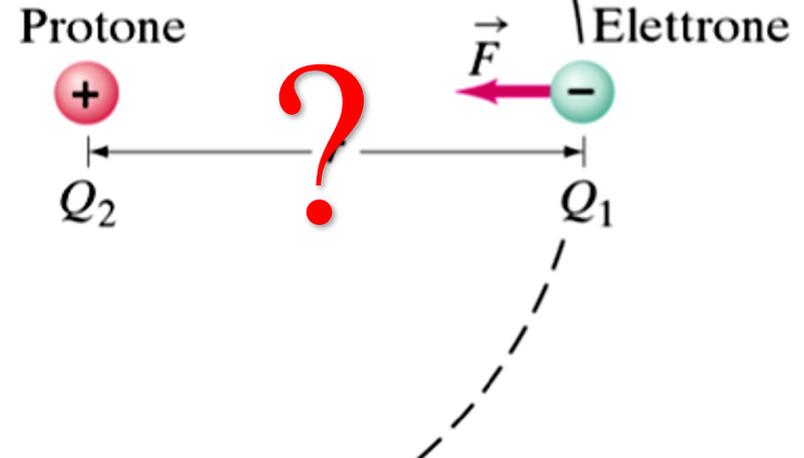
Newton



Coulomb



$$F = k \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$

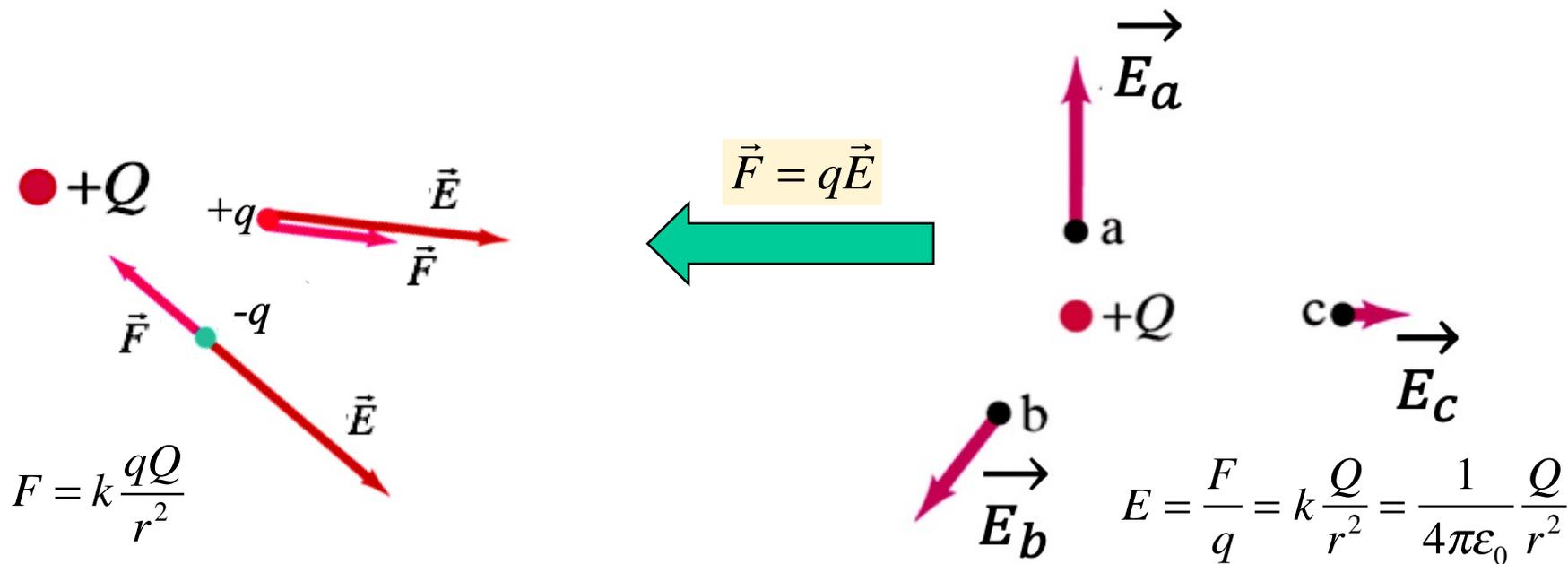


# Definizione di Campo Elettrico

Il **campo elettrico**  $\vec{E}$  in ciascuno dei tre punti dello spazio attorno alla carica  $Q$  (o a una configurazione di cariche) verrà a questo punto definito dal **rappporto** tra la forza  $\vec{F}$  agente su una carica di prova positiva  $q$  che si trovi in quei punti divisa per il valore di  $q$  stesso (che si immagina tendente a zero...):

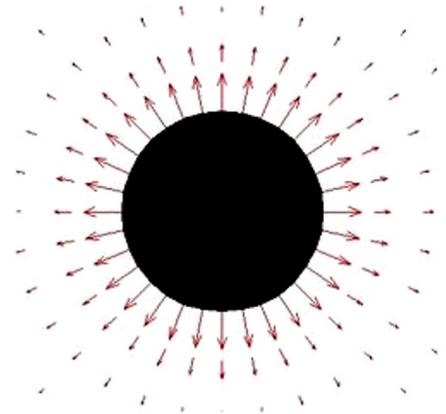
$$\vec{E} = \vec{F} / q$$

Dalla definizione di campo elettrico segue infine che, inversamente, la presenza di un **campo elettrico**  $\vec{E}$  in un qualsiasi punto  $P$  induce su una carica  $q$  una **forza** pari a  $\vec{F} = q\vec{E}$ , il cui verso dipenderà dal segno della carica  $q$ .

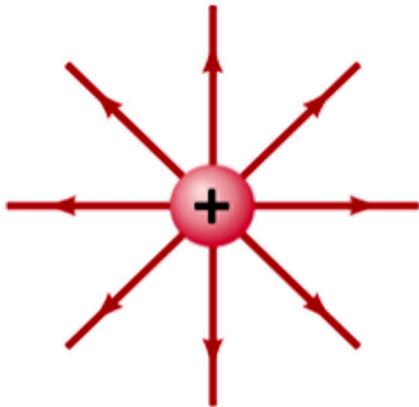


# Linee di Campo Elettrico

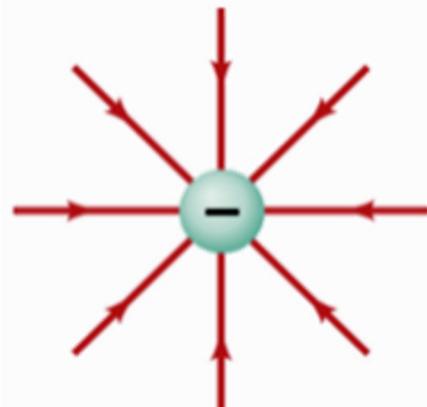
Il campo elettrico, potendo essere descritto punto per punto per mezzo di vettori, è un esempio di **campo vettoriale**. La rappresentazione grafica di un campo vettoriale per mezzo di frecce genera però rapidamente confusione all'aumentare del numero di punti considerato (che è potenzialmente infinito!).



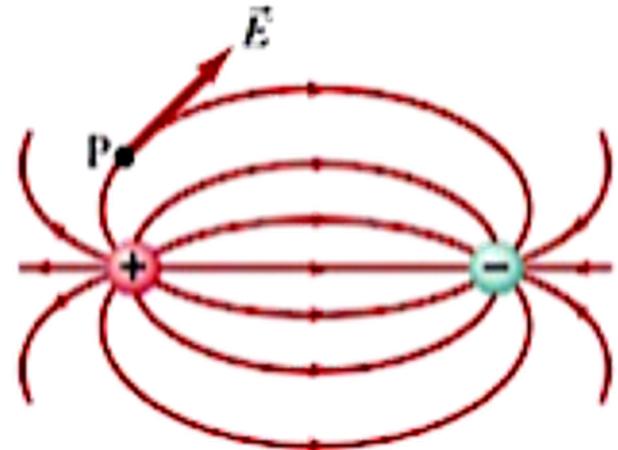
Una rappresentazione più pratica ed efficace è invece, sicuramente, quelle delle cosiddette “**linee di campo**” o “**linee di forza**”, ciascuna delle quali individua la posizione del campo nei vari punti dello spazio secondo la regola che **il vettore campo elettrico deve essere tangente in quei punti alla linea di campo**.



**Carica positiva isolata**



**Carica negativa isolata**

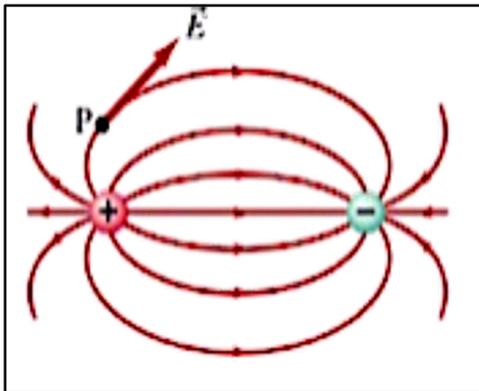


**Dipolo elettrico**

# Regole per le linee di Campo Elettrico

Se adesso consideriamo **varie configurazioni** delle linee di campo elettrico per situazioni leggermente più complicate di quella delle singole cariche isolate, notiamo che in ciascun caso le **proprietà generali** delle linee di forza del campo elettrico devono essere le seguenti:

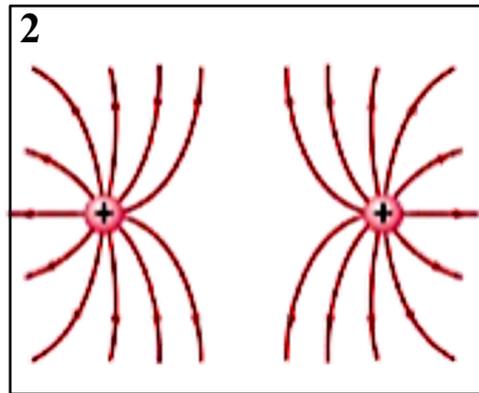
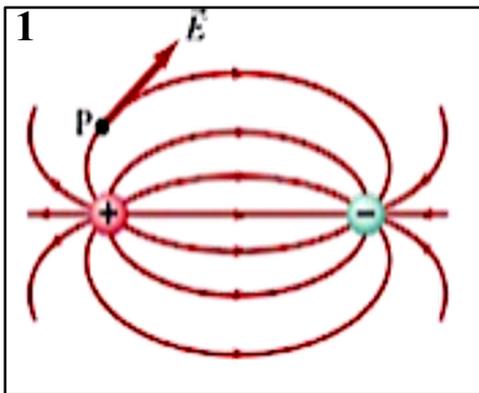
**1) Le linee individuano la direzione e il verso del campo elettrico in ogni punto dello spazio, essendo il vettore campo elettrico tangente alla linea di forza passante per quel punto;**



# Regole per le linee di Campo Elettrico

Se adesso consideriamo **varie configurazioni** delle linee di campo elettrico per situazioni leggermente più complicate di quella delle singole cariche isolate, notiamo che in ciascun caso le **proprietà generali** delle linee di forza del campo elettrico devono essere le seguenti:

- 1) Le linee individuano la direzione e il verso del campo elettrico in ogni punto dello spazio, essendo il vettore campo elettrico tangente alla linea di forza passante per quel punto;**
- 2) Le linee di campo non si intersecano mai: infatti il campo elettrico non può avere due direzioni diverse in uno stesso punto!**

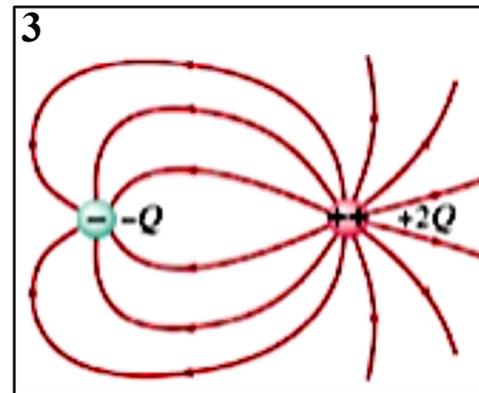
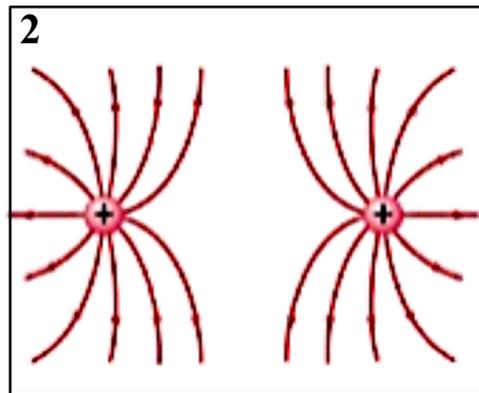
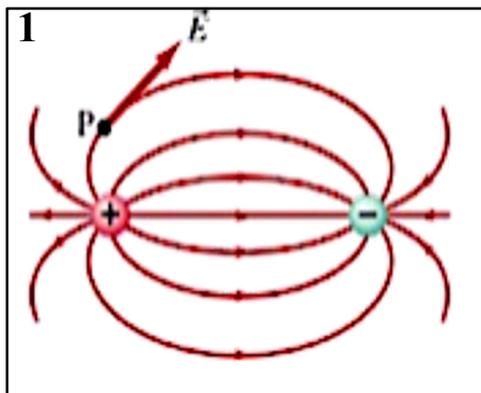


3

# Regole per le linee di Campo Elettrico

Se adesso consideriamo **varie configurazioni** delle linee di campo elettrico per situazioni leggermente più complicate di quella delle singole cariche isolate, notiamo che in ciascun caso le **proprietà generali** delle linee di forza del campo elettrico devono essere le seguenti:

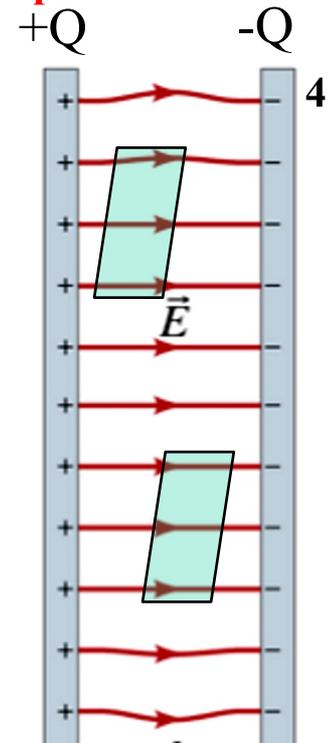
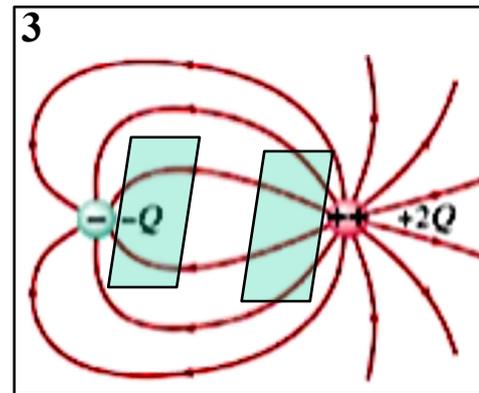
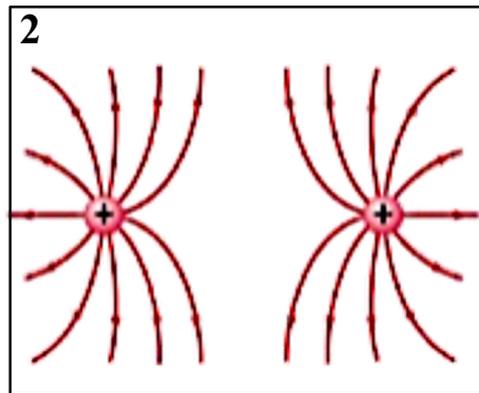
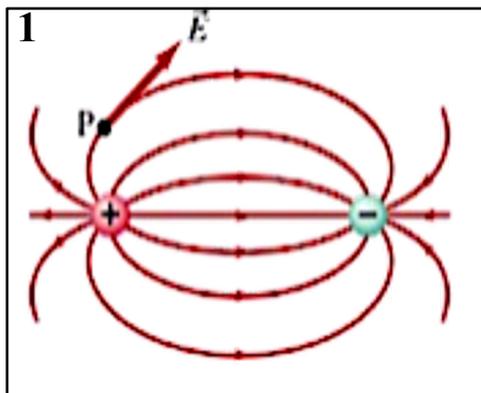
- 1) **Le linee individuano la direzione e il verso del campo elettrico in ogni punto dello spazio, essendo il vettore campo elettrico tangente alla linea di forza passante per quel punto;**
- 2) **Le linee di campo non si intersecano mai: infatti il campo elettrico non può avere due direzioni diverse in uno stesso punto!**
- 3) **Le linee sono uscenti dalle cariche positive ed entranti in quelle negative: il numero delle linee che convergono in un punto occupato da una carica puntiforme è proporzionale alla carica;**



# Regole per le linee di Campo Elettrico

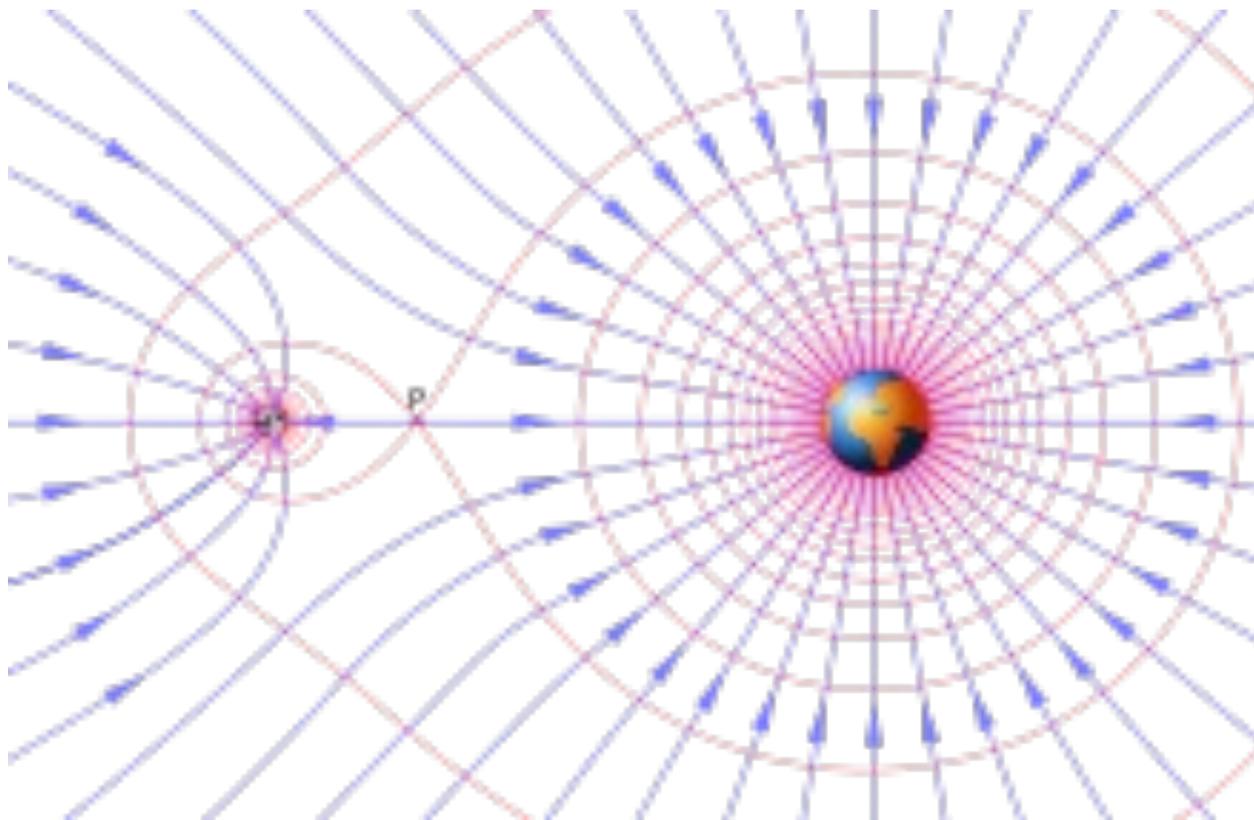
Se adesso consideriamo **varie configurazioni** delle linee di campo elettrico per situazioni leggermente più complicate di quella delle singole cariche isolate, notiamo che in ciascun caso le **proprietà generali** delle linee di forza del campo elettrico devono essere le seguenti:

- 1) **Le linee individuano la direzione e il verso del campo elettrico in ogni punto dello spazio, essendo il vettore campo elettrico tangente alla linea di forza passante per quel punto;**
- 2) **Le linee di campo non si intersecano mai: infatti il campo elettrico non può avere due direzioni diverse in uno stesso punto!**
- 3) **Le linee sono uscenti dalle cariche positive ed entranti in quelle negative: il numero delle linee che convergono in un punto occupato da una carica puntiforme è proporzionale alla carica;**
- 4) **Le linee sono tracciate in modo tale che l'intensità del campo elettrico in un punto sia proporzionale al numero di linee che attraversano una superficie di area unitaria posta in quel punto ortogonalmente alle linee del campo: quanto più le linee di campo sono dense, tanto più elevata è l'intensità del campo; se le linee sono parallele, il campo è uniforme.**



# Il Campo Gravitazionale

Ovviamente i concetti di **campo e di linee di forza** non si limitano a descrivere solo interazioni di tipo elettrico ma possono essere utilizzati per descrivere altre interazioni fondamentali a distanza, come ad esempio quella gravitazionale: **ogni corpo dotato di massa genera infatti un campo gravitazionale** mediante il quale attrae altri corpi anch'essi dotati di massa.

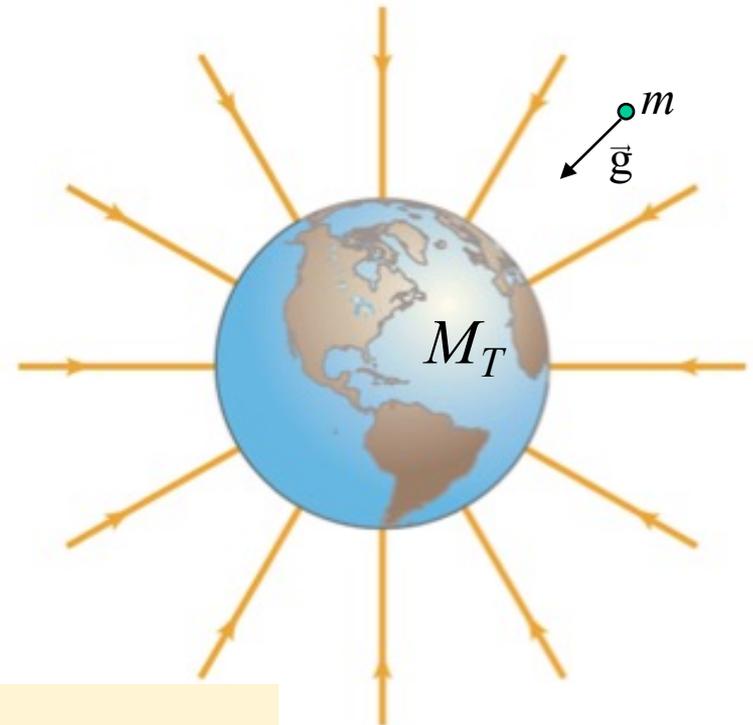


# Il Campo Gravitazionale

Ovviamente i concetti di **campo e di linee di forza** non si limitano a descrivere solo interazioni di tipo elettrico ma possono essere utilizzati per descrivere altre interazioni fondamentali a distanza, come ad esempio quella gravitazionale: **ogni corpo dotato di massa genera infatti un campo gravitazionale** mediante il quale attrae altri corpi anch'essi dotati di massa.

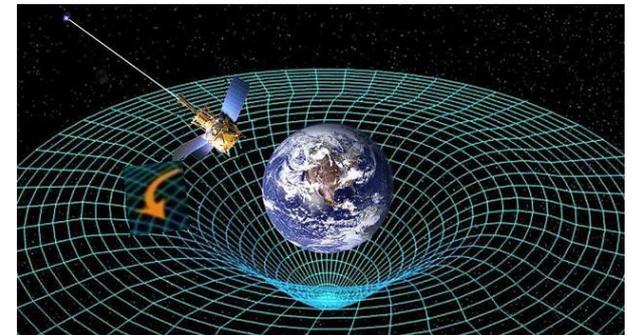
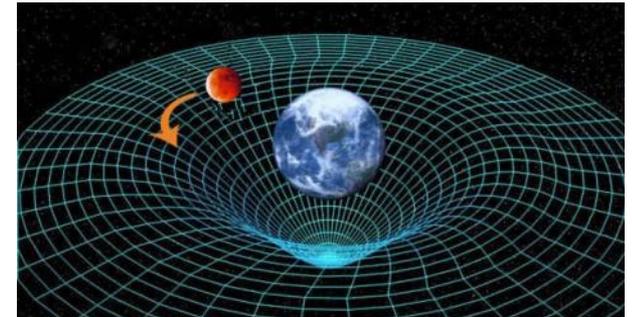
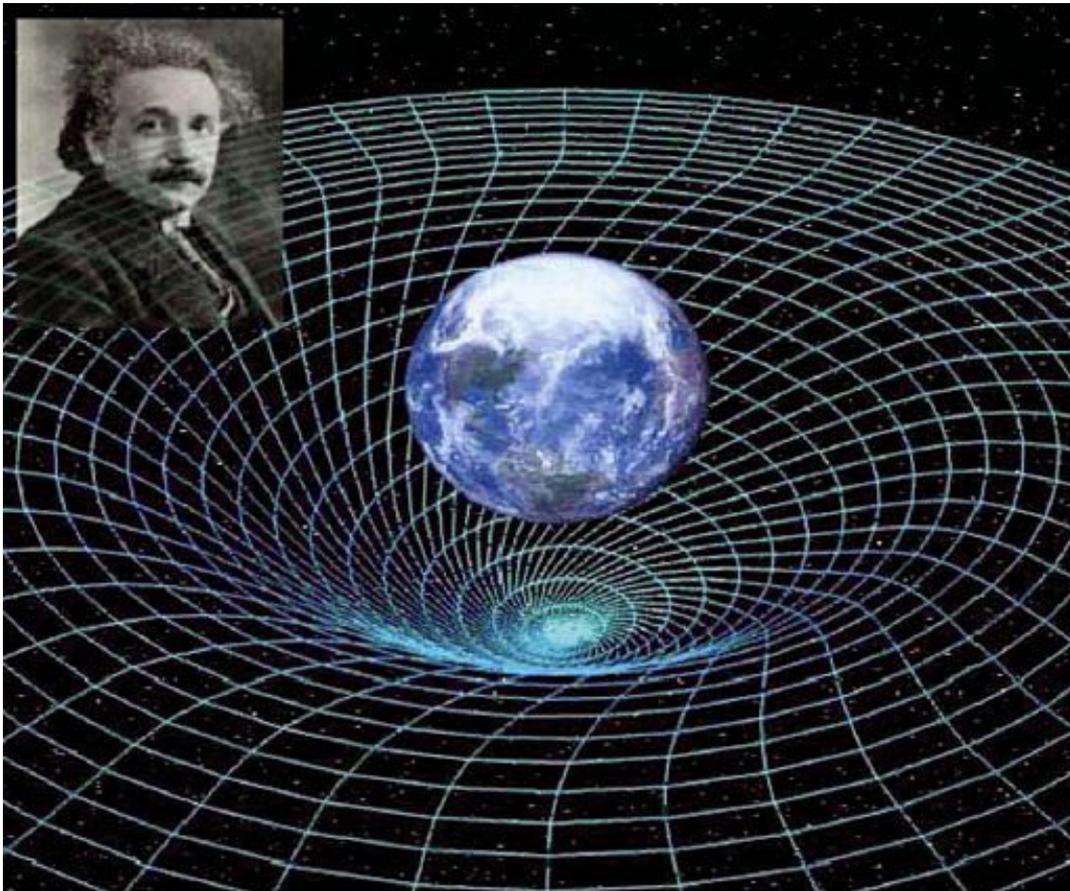
La Terra, ad esempio, genera un campo gravitazionale molto intenso responsabile della forza di attrazione sentita dai corpi che si trovano sulla sua superficie. Analogamente al caso elettrico, il **campo gravitazionale** prodotto dalla massa  $M$  in un punto viene definito come il rapporto tra la forza gravitazionale in quel punto divisa per una piccola massa di prova  $m$  e può essere rappresentato mediante *linee di forza*. Nel caso della Terra, che ha massa  $M_T$  e raggio  $r$ , il **campo gravitazionale sulla sua superficie** sarà radiale, entrante e di intensità (modulo) uguale all'**accelerazione di gravità  $g$** , cioè:

$$F = G \frac{mM_T}{r^2} = mg \rightarrow g = \frac{F}{m} = G \frac{M_T}{r^2} \text{ (campo gravitazionale)}$$

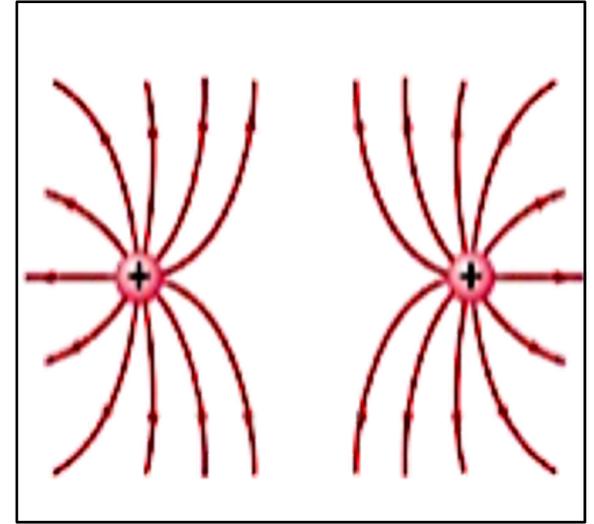
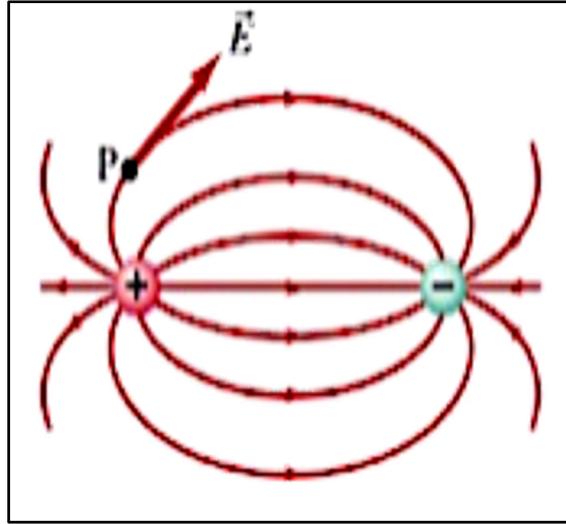
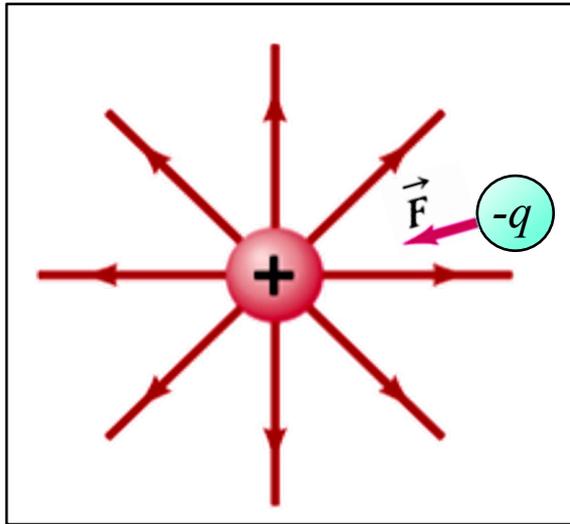


# Il Campo Gravitazionale

Oggi, grazie alla **Teoria della Relatività Generale** di Einstein (1915), possiamo visualizzare il campo gravitazionale generato dalla Terra come una *deformazione dello spazio* (più precisamente dello *spazio-tempo*) che “costringe” i suoi satelliti, naturali o artificiali, a percorrere una traiettoria circolare attorno ad essa.



# Campo Elettrico e Campo Gravitazionale

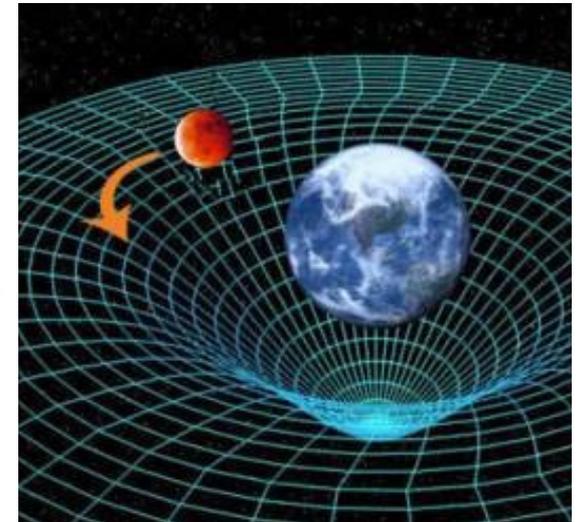
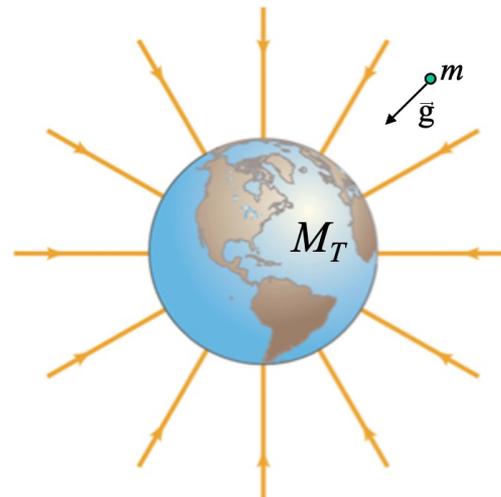


$$E = \frac{F}{q} = k \frac{Q}{r^2}$$

campo elettrico

$$g = \frac{F}{m} = G \frac{M_T}{r^2}$$

campo gravitazionale

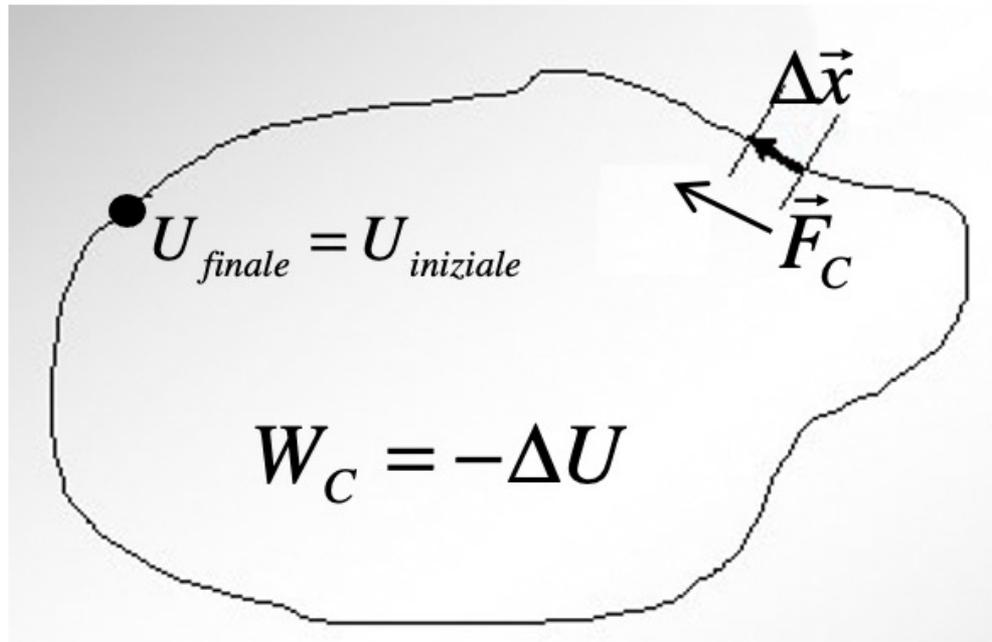


# Lavoro del Campo Elettrico ed Energia Potenziale Elettrica

Passiamo adesso a considerare gli **aspetti energetici dei fenomeni elettrici**, anticipando che, come abbiamo già visto accadere in meccanica, anche in elettrostatica l'approccio energetico si rivelerà di grande utilità. Al fine di estendere il **principio di conservazione dell'energia** anche ai fenomeni elettrici, è innanzitutto necessario definire il concetto di **energia potenziale elettrica**. A questo proposito ricordiamo che l'energia potenziale esiste soltanto per le **forze conservative**, per le quali il lavoro compiuto su un oggetto che si muove tra due punti non dipende dal percorso effettuato.

Es: Essendo il lavoro fatto dalle forza conservative indipendente dal percorso ma solo dal punto iniziale e finale, per un percorso chiuso esso è sempre uguale a zero

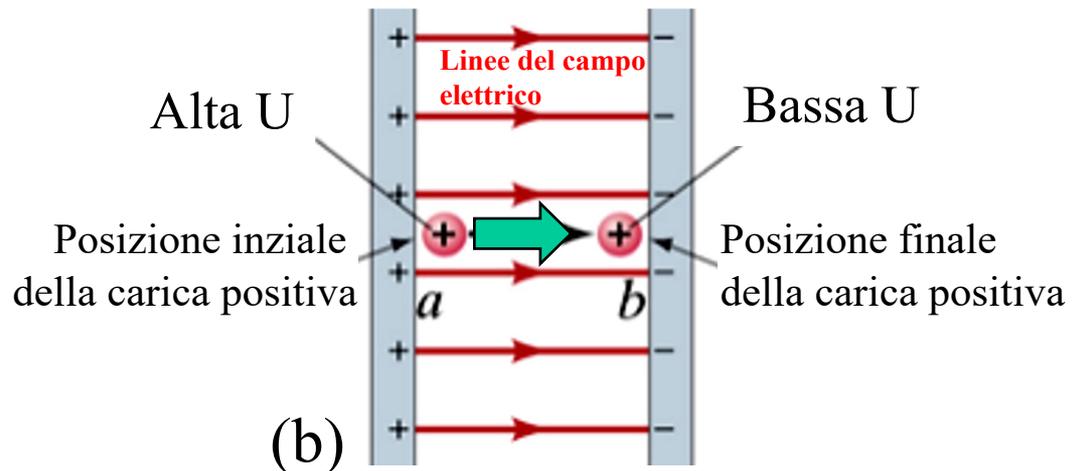
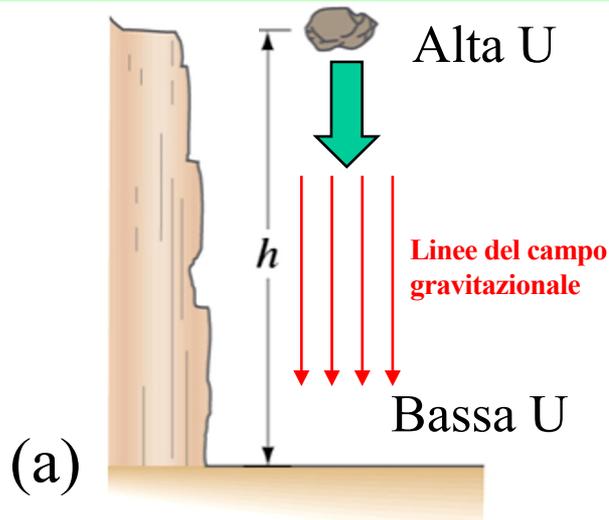
$$W_C = \sum \vec{F}_C \cdot \Delta\vec{x} = -\Delta U = 0 \quad \text{essendo } U_{finale} = U_{iniziale}$$



# Lavoro del Campo Elettrico ed Energia Potenziale Elettrica

Passiamo adesso a considerare gli **aspetti energetici dei fenomeni elettrici**, anticipando che, come abbiamo già visto accadere in meccanica, anche in elettrostatica l'approccio energetico si rivelerà di grande utilità. Al fine di estendere il **principio di conservazione dell'energia** anche ai fenomeni elettrici, è innanzitutto necessario definire il concetto di **energia potenziale elettrica**. A questo proposito ricordiamo che l'energia potenziale esiste soltanto per le **forze conservative**, per le quali il lavoro compiuto su un oggetto che si muove tra due punti non dipende dal percorso effettuato.

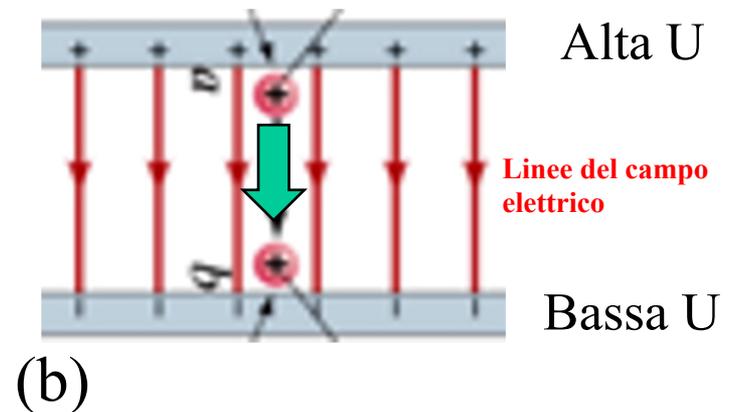
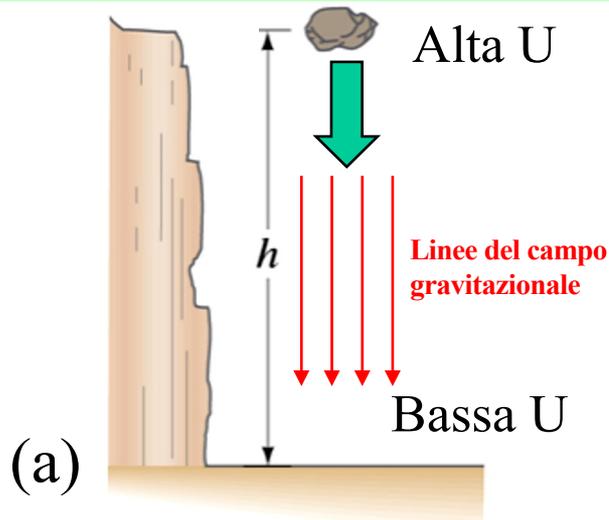
Ebbene, avendo la stessa forma funzionale della forza di gravità, si può dimostrare che **anche la forza elettrostatica è conservativa**: come accade dunque per una pietra (Fig.a) che, dopo essere stata sollevata da una forza esterna, cade sotto l'azione della forza di gravità riducendo così la sua energia potenziale gravitazionale, anche per una carica elettrica (Fig.b) potrà dunque definirsi una **energia potenziale  $U$**  la cui variazione  $\Delta U$  tra due punti  $a$  e  $b$  dovrà essere uguale al lavoro (cambiato di segno) compiuto dalla forza conservativa elettrostatica per spostare una carica positiva da  $a$  a  $b$  (lungo le linee di campo elettrico), cioè  $\Delta U = -W$ , lavoro che è uguale ed opposto a quello compiuto da una forza esterna per spostarla dal punto  $b$  al punto  $a$  (contro il campo elettrico).



# Lavoro del Campo Elettrico ed Energia Potenziale Elettrica

Passiamo adesso a considerare gli **aspetti energetici dei fenomeni elettrici**, anticipando che, come abbiamo già visto accadere in meccanica, anche in elettrostatica l'approccio energetico si rivelerà di grande utilità. Al fine di estendere il **principio di conservazione dell'energia** anche ai fenomeni elettrici, è innanzitutto necessario definire il concetto di **energia potenziale elettrica**. A questo proposito ricordiamo che l'energia potenziale esiste soltanto per le **forze conservative**, per le quali il lavoro compiuto su un oggetto che si muove tra due punti non dipende dal percorso effettuato.

Ebbene, avendo la stessa forma funzionale della forza di gravità, si può dimostrare che **anche la forza elettrostatica è conservativa**: come accade dunque per una pietra (Fig.a) che, dopo essere stata sollevata da una forza esterna, cade sotto l'azione della forza di gravità riducendo così la sua energia potenziale gravitazionale, anche per una carica elettrica (Fig.b) potrà dunque definirsi una **energia potenziale  $U$**  la cui variazione  $\Delta U$  tra due punti  $a$  e  $b$  dovrà essere uguale al lavoro (cambiato di segno) compiuto dalla forza conservativa elettrostatica per spostare una carica positiva da  $a$  a  $b$  (lungo le linee di campo elettrico), cioè  $\Delta U = -W$ , lavoro che è uguale ed opposto a quello compiuto da una forza esterna per spostarla dal punto  $b$  al punto  $a$  (contro il campo elettrico).



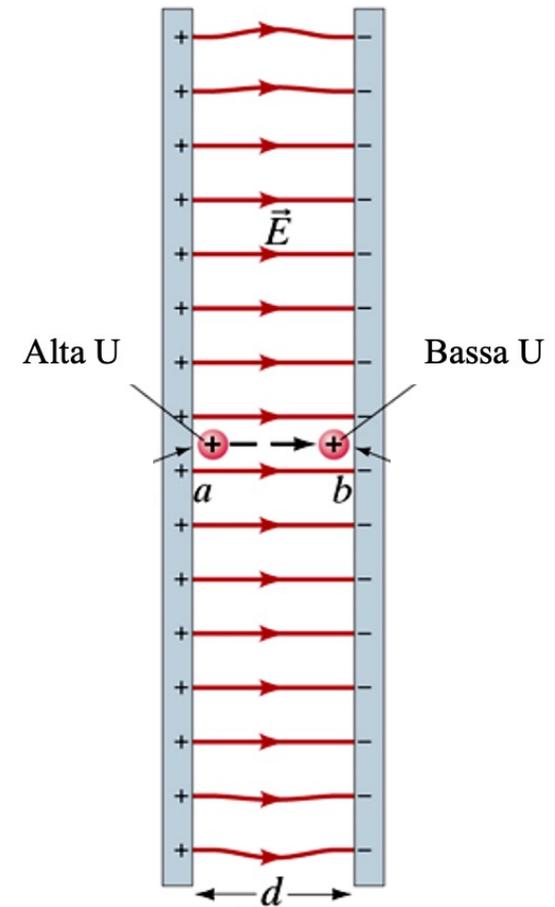
# Energia Potenziale e Potenziale Elettrico

Consideriamo ad esempio il **campo elettrico uniforme di modulo  $E$**  che si genera tra due lastre piane parallele (armature) con carica uguale ed opposta, poste alla distanza  $d$ , e poniamo una **piccola carica di prova  $q$  positiva** (ad es. una particella carica di massa  $m$ ) nelle vicinanze dell'armatura positiva: se la carica viene lasciata libera di muoversi, la **forza elettrostatica  $F=qE$**  compirà **lavoro** su di essa **accelerandola** (per la seconda legge della dinamica) verso l'armatura negativa, con accelerazione  **$a=F/m=qE/m$** .

Per definizione, il **lavoro  $W$  compiuto dal campo elettrico  $E$**  per spostare la **carica  $q$**  su una **distanza  $d$**  sarà quindi pari a  **$W=Fd=qEd$** , da cui la variazione di **energia potenziale elettrica** sarà:  **$\Delta U = -qEd$**

Visto che nel suo moto la particella accelera, la sua **energia potenziale** elettrica diminuirà, cioè  **$\Delta U < 0$** , mentre la sua **energia cinetica** aumenterà della stessa quantità: quindi, in accordo con la legge di conservazione dell'energia, **la somma di energia cinetica e potenziale (energia totale) resterà costante!**

In analogia con la definizione di campo elettrico come forza per unità di carica, è utile definire a questo punto il cosiddetto **potenziale elettrico  $V$** , o semplicemente **potenziale**, come l'**energia potenziale elettrica per unità di carica**, cioè  **$V=U/q$** , che quindi non dipende dalla carica di prova  $q$  ma solo dalle cariche che generano il campo (in questo caso quelle sulle armature...).

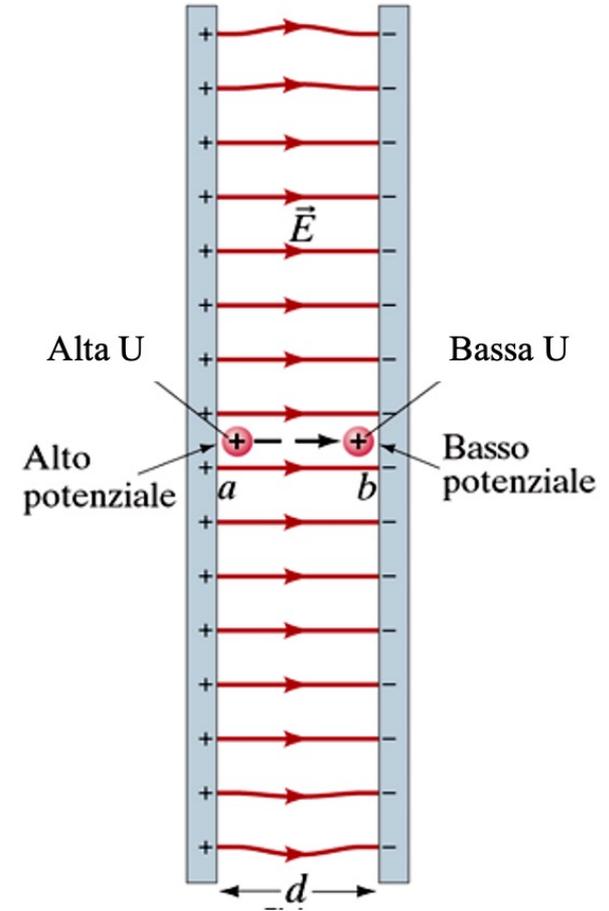


# Il Potenziale Elettrico: $V=U/q$

Analogamente a quanto abbiamo visto valere per l'energia potenziale, che è sempre definita rispetto ad uno zero arbitrario, anche in questo caso ciò che è effettivamente misurabile non è il valore assoluto del potenziale in un punto ma piuttosto la **differenza di potenziale  $\Delta V$**  tra due punti, ad esempio tra i punti  $a$  e  $b$  tra le due armature conduttrici della figura precedente. Data la solita **carica di prova positiva  $q$**  che si sposta dal punto  $a$  (ad alta energia potenziale  $U_a$ ) al punto  $b$  (a bassa energia potenziale  $U_b$ ) a causa della forza elettrostatica dovuta al campo elettrico presente tra le armature, avremo allora:

$$\Delta V = V_b - V_a = \frac{U_b}{q} - \frac{U_a}{q} = \frac{\Delta U}{q} = -\frac{W}{q}$$

dove  $W$  è il lavoro compiuto dal campo elettrico, che sarà quindi uguale a  $W = -q\Delta V$ . Notiamo anche che, se le cariche **positive** si muovono spontaneamente da punti a potenziale più alto a punti a potenziale più basso, quelle **negative** si muoveranno nel verso opposto, risalendo lungo le linee del campo.



Alessandro Volta  
(1745-1827)

Dalla definizione di potenziale elettrico risulta che l'**unità di misura** della differenza di potenziale è (nel SI) il Joule/Coulomb, che prende il nome di **Volt** ( $1V=1J/1C$ ) dallo scienziato italiano **Alessandro Volta** (per cui la differenza di potenziale viene spesso detta anche "**voltaggio**").

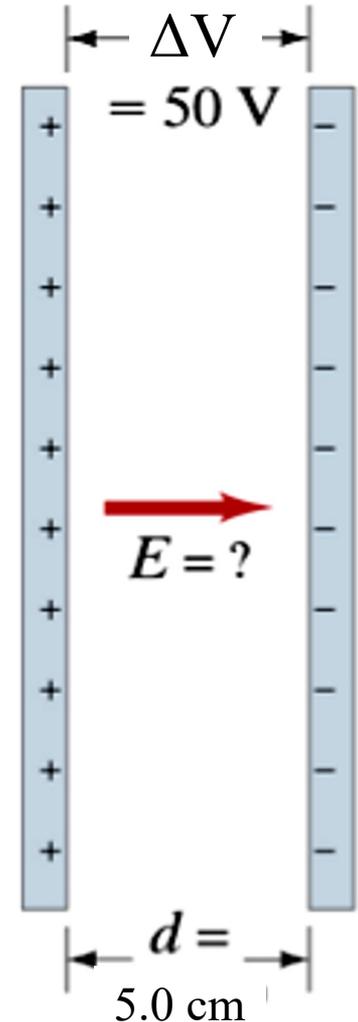
# Relazione tra Potenziale e Campo Elettrico

La relazione tra il potenziale elettrico, che è una grandezza scalare, e il campo elettrico, che è invece una grandezza vettoriale, risulta facilmente ricavabile dalle formule già viste. Infatti, dato ad esempio un **campo uniforme incognito**  $E$  tra due armature piane parallele, separate da una distanza totale  $d=5.0$  cm, tra cui vi sia una differenza di potenziale  $\Delta V=50V$ , considerando che il lavoro compiuto dalla forza elettrostatica  $F$  per spostare una carica positiva  $q$  da un punto a potenziale più alto ad uno a potenziale più basso è anche uguale, come abbiamo già visto, alla forza per lo spostamento, avremo:

$$\begin{cases} W = -q\Delta V \\ W = Fd = qEd \end{cases} \rightarrow qEd = -q\Delta V \rightarrow E = -\frac{\Delta V}{d}$$

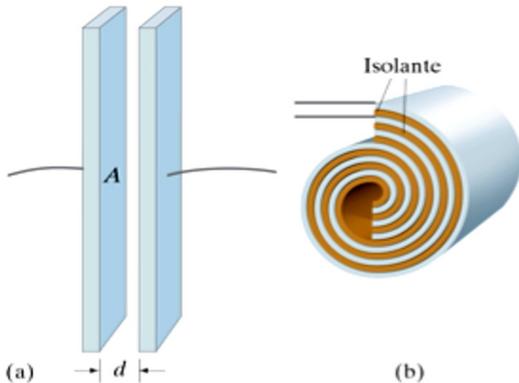
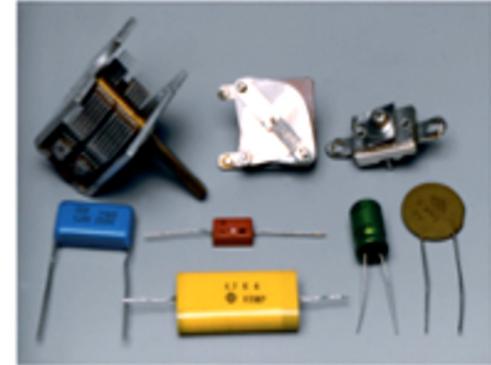
Quest'ultima è appunto la **relazione cercata tra l'intensità del campo elettrico e la differenza di potenziale**, nella quale il segno meno indica semplicemente che il verso del campo elettrico è sempre quello per il quale il potenziale  $V$  decresce (si noti che il campo elettrico, oltre che in N/C, può quindi anche essere misurato in **volt su metro**). Il campo incognito si può dunque calcolare facilmente:

$$\rightarrow |E| = \frac{50V}{0.05m} = 1000 \frac{V}{m}$$



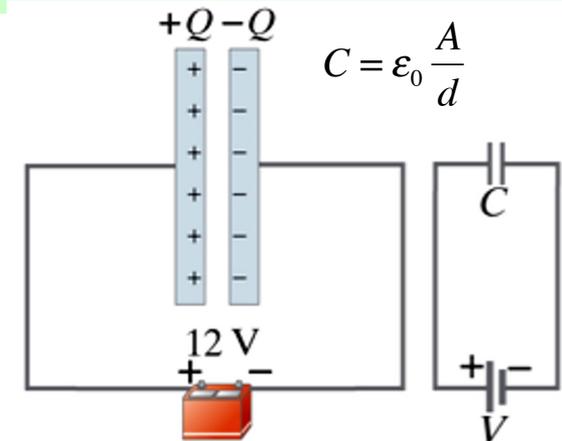
# Capacità e Condensatori

Abbiamo più volte fatto riferimento al campo elettrico pressoché uniforme che si genera all'interno di due superfici conduttrici piane e parallele (armature) dotate di cariche uguali ma di segno opposto: un tale sistema è un esempio di **condensatore**, cioè di un dispositivo in grado di immagazzinare carica elettrica per poi rilasciarla al momento opportuno e che ha una vastissima applicazione nei circuiti elettrici ed elettronici moderni (dai flash delle macchine fotografiche alla memoria RAM dei calcolatori).



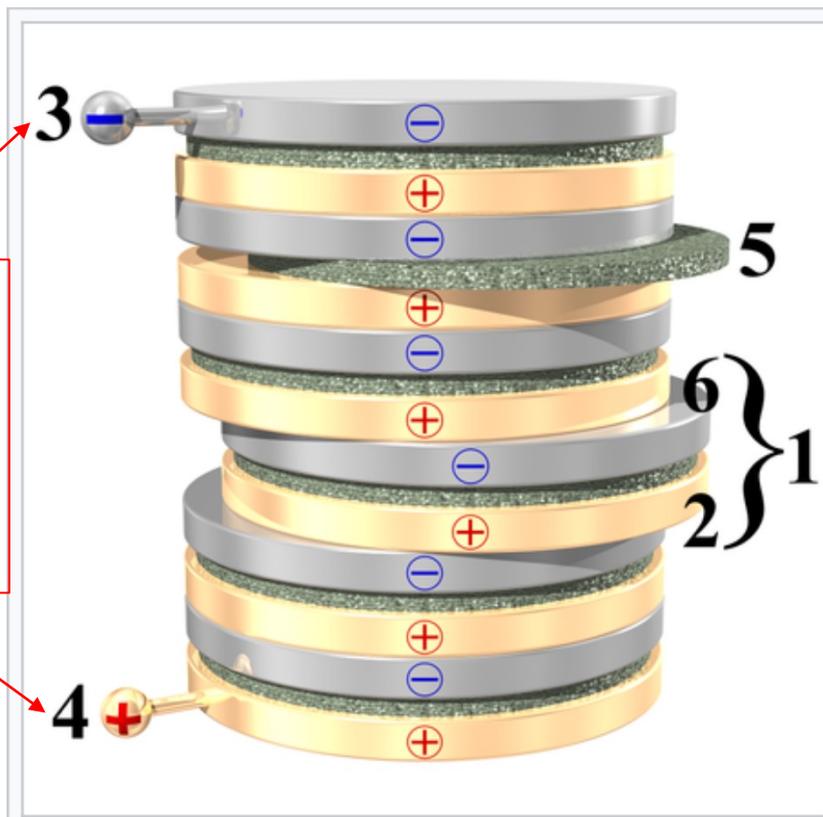
In un **condensatore tipico** le due armature, di area  $A$  e poste ad una (piccola) distanza  $d$  (fig.a) vengono spesso separate per mezzo di un sottile strato di materiale isolante e poi arrotolate in modo da formare un cilindro (fig.b). Se si applica una differenza di potenziale  $V$  (**tensione**) a un condensatore scarico collegando le due armature ai poli di un generatore di tensione mediante fili conduttori, esso si caricherà rapidamente...

In particolare, una delle due armature acquisterà una carica  $Q$  negativa e l'altra una uguale carica  $Q$  positiva e tra le due armature si creerà la stessa **differenza di potenziale** (ad es. 12 V) presente tra i due poli del generatore: a questo punto si può verificare sperimentalmente che la carica  $Q$  sarà proporzionale alla tensione applicata  $V$  secondo la relazione  $Q=CV$ , dove  $C$  è la cosiddetta "**capacità**" del condensatore, che si misura in **Farad (F)** e che dipende solo dalle caratteristiche geometriche del condensatore.



# Elettrodinamica: la Corrente Elettrica

Prima del 1800 la tecnologia coinvolta nello studio dell'elettricit  era molto primitiva e gli scienziati si limitavano a produrre elettricit  statica mediante strofinio dei corpi. Tutto cambi  all'improvviso quando nel 1801 **Alessandro Volta** present  a Napoleone Bonaparte la sua **pila elettrica** (cio  il primo esempio di generatore di tensione), che si dimostr  in grado di produrre per la prima volta un flusso continuo di carica, cio  quella che oggi chiamiamo una **corrente elettrica** continua.



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 (acqua e acido solforico);
6. strato di zinco.

# Elettrodinamica: la Corrente Elettrica

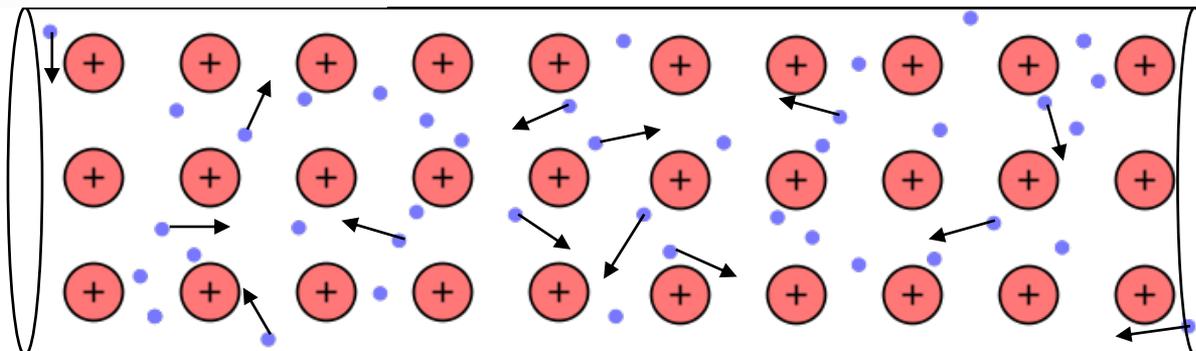
Prima del 1800 la tecnologia coinvolta nello studio dell'elettricit  era molto primitiva e gli scienziati si limitavano a produrre elettricit  statica mediante strofinio dei corpi. Tutto cambi  all'improvviso quando nel 1801 **Alessandro Volta** present  a Napoleone Bonaparte la sua **pila elettrica** (cio  il primo esempio di generatore di tensione), che si dimostr  in grado di produrre per la prima volta un flusso continuo di carica, cio  quella che oggi chiamiamo una **corrente elettrica** continua.



La **corrente elettrica** che fluisce nel filo (di rame) viene definita come *la quantit  di carica che attraversa la sezione trasversale del filo nell'unit  di tempo*, cio :

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

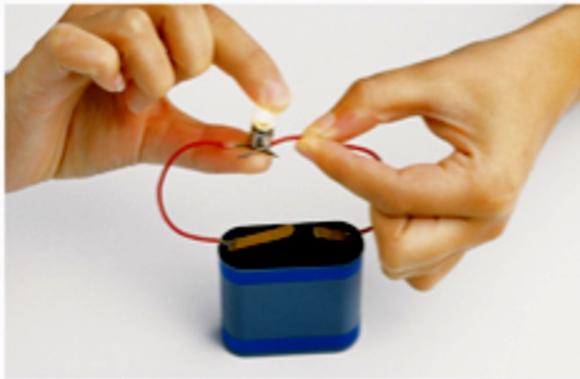
La sua **unit  di misura** sar  dunque il Coulomb al secondo, detto **Amp re** (A):  $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$  (che   una delle 7 unit  di misura fondamentali del sistema internazionale SI)



Struttura interna di un filo elettrico in assenza di tensione

# Elettrodinamica: la Corrente Elettrica

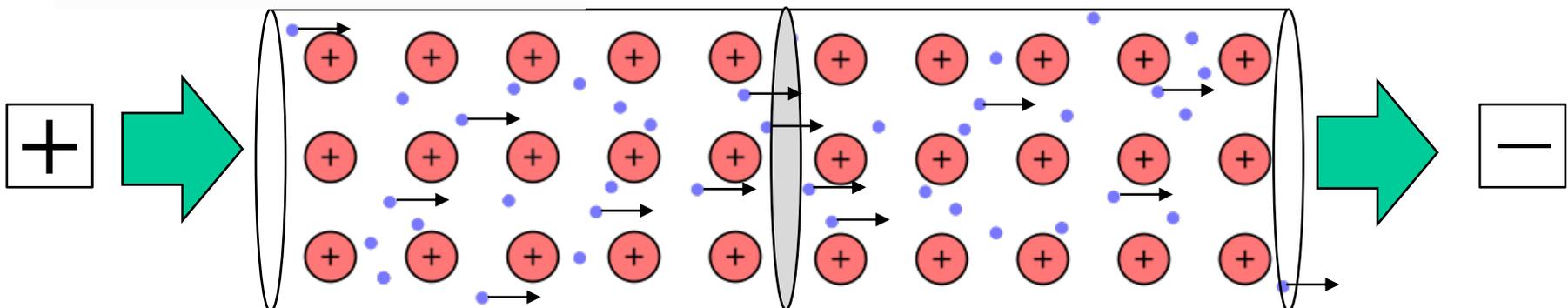
Prima del 1800 la tecnologia coinvolta nello studio dell'elettricit  era molto primitiva e gli scienziati si limitavano a produrre elettricit  statica mediante strofinio dei corpi. Tutto cambi  all'improvviso quando nel 1801 **Alessandro Volta** present  a Napoleone Bonaparte la sua **pila elettrica** (cio  il primo esempio di generatore di tensione), che si dimostr  in grado di produrre per la prima volta un flusso continuo di carica, cio  quella che oggi chiamiamo una **corrente elettrica** continua.



La **corrente elettrica** che fluisce nel filo (di rame) viene definita come *la quantit  di carica che attraversa la sezione trasversale del filo nell'unit  di tempo*, cio :

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

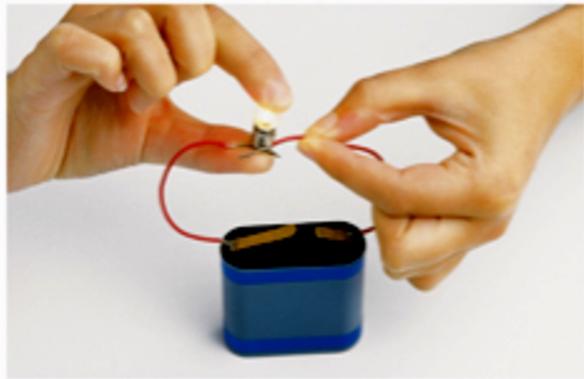
La sua **unit  di misura** sar  dunque il Coulomb al secondo, detto **Amp re** (A):  $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$  (che   una delle 7 unit  di misura fondamentali del sistema internazionale SI)



Struttura interna di un filo elettrico in presenza di tensione

# Elettrodinamica: la Corrente Elettrica

Prima del 1800 la tecnologia coinvolta nello studio dell'elettricit  era molto primitiva e gli scienziati si limitavano a produrre elettricit  statica mediante strofinio dei corpi. Tutto cambi  all'improvviso quando nel 1801 **Alessandro Volta** present  a Napoleone Bonaparte la sua **pila elettrica** (cio  il primo esempio di generatore di tensione), che si dimostr  in grado di produrre per la prima volta un flusso continuo di carica, cio  quella che oggi chiamiamo una **corrente elettrica** continua.

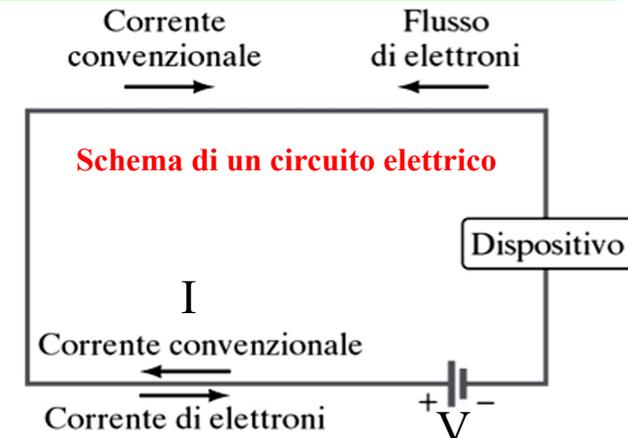


La **corrente elettrica** che fluisce nel filo (di rame) viene definita come *la quantit  di carica che attraversa la sezione trasversale del filo nell'unit  di tempo*, cio :

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

La sua **unit  di misura** sar  dunque il Coulomb al secondo, detto **Amp re (A)**:  $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$  (che   una delle 7 unit  di misura fondamentali del sistema internazionale SI)

Noi sappiamo che la carica che fluisce nel filo conduttore   trasportata dagli **elettroni liberi**, ma da un punto di vista pratico conviene pensare alla corrente elettrica  $I$  in un circuito come ad un **flusso di cariche positive uscente dal polo positivo ed entrante nel polo negativo della pila o batteria** (senso orario in figura). Si noti che la corrente  $I$ , pur essendo dotata di un verso, non   una grandezza vettoriale ma scalare ( $I$    detta anche "intensit  di corrente").



# Corrente e Tensione (analogia gravitazionale)

E' abbastanza intuitivo rendersi conto che, in un circuito, l'intensità della corrente elettrica dipende dalla **tensione** (cioè dalla differenza di potenziale elettrico o **voltaggio**) applicata ai capi del circuito. Per convincersene è utile l'**analogia con la corrente d'acqua** che scorre in un fiume a causa del dislivello (differenza di potenziale gravitazionale) tra la sorgente situata in montagna e la foce del fiume situata in pianura: anche in questo caso un **aumento del dislivello** (della differenza di potenziale) produce un aumento del flusso d'acqua nel letto del fiume, proprio come un **aumento del voltaggio** (detto anche "caduta di potenziale") produce un aumento del flusso di elettroni nel filo conduttore.

