

# Elettrostatica e Gravitazione: Coulomb vs. Newton

Coulomb



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

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

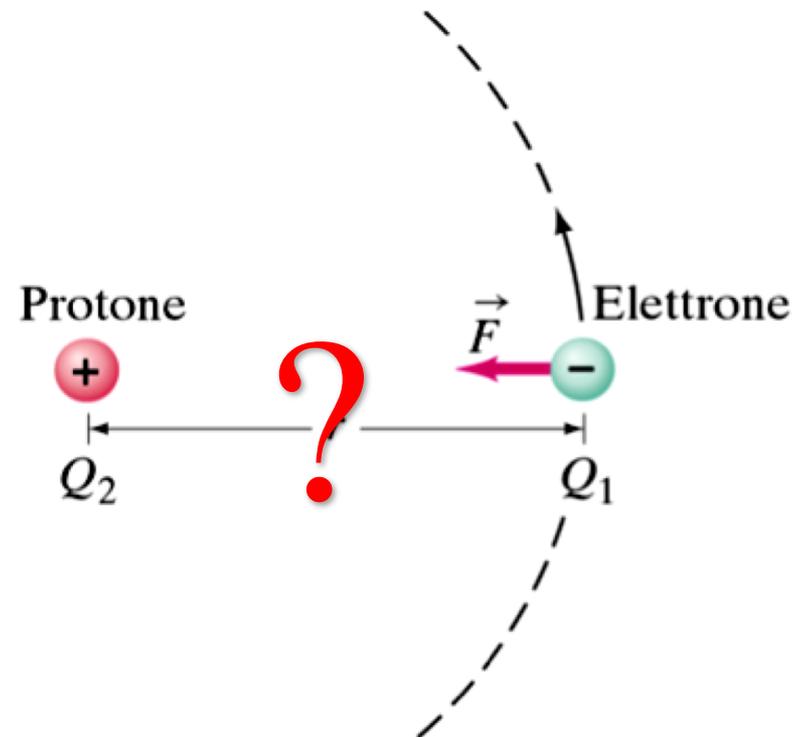
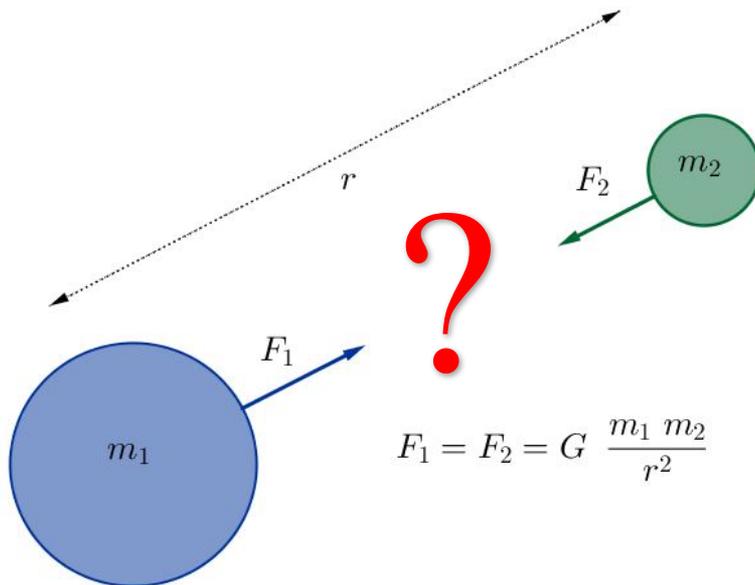


Newton

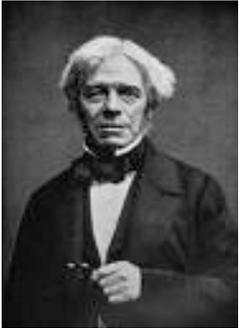
Legge di Coulomb	Legge di Newton
$F = k  Q   q  / d^2$	$F = G M m / d^2$
La forza elettrica è inversamente proporzionale al quadrato della distanza d	La forza gravitazionale è inversamente proporzionale al quadrato della distanza d
La forza elettrica è proporzionale al prodotto Q q delle cariche	La forza gravitazionale è proporzionale al prodotto M m delle masse
Esistono due tipi di cariche: quelle positive e quelle negative	Esiste un solo tipo di massa
La forza elettrica può essere attrattiva o repulsiva	La forza gravitazionale è sempre attrattiva
k è una costante che dipende dal mezzo in cui si trovano le cariche. E' massima nel vuoto.	G è una costante universale
Il valore numerico di k è molto grande ( $9 \cdot 10^9$ nel vuoto, in unità SI)	Il valore numerico di G è molto piccolo ( $6,67 \cdot 10^{-11}$ in unità SI)
Se i due corpi carichi sono <i>sferici</i> , la forza elettrica si determina <i>come se</i> la carica fosse concentrata nel centro di massa dei corpi.	Se i due corpi sono <i>sferici</i> , la forza gravitazionale si determina <i>come se</i> la massa fosse concentrata nel centro di massa dei corpi.

# 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 (come invece accade per le forze più comuni con cui abbiamo a che fare, tipo la forza di attrito, quella esercitata da una mano che tira o che spinge, o da una racchetta che colpisce la palla, etc.). **Ma come è possibile esercitare una azione a distanza?**



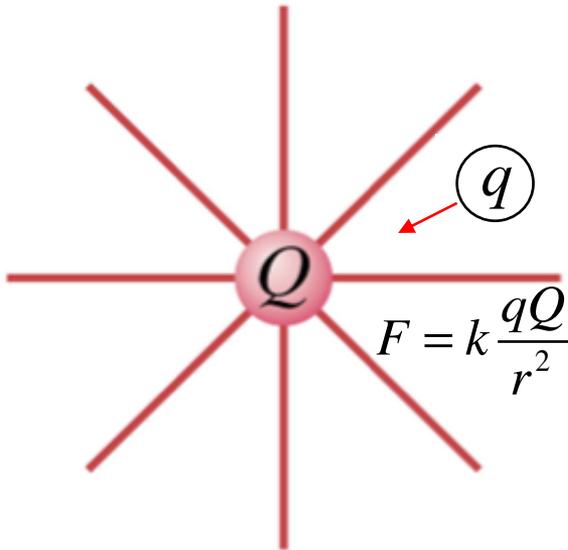
# Il Campo Elettrico



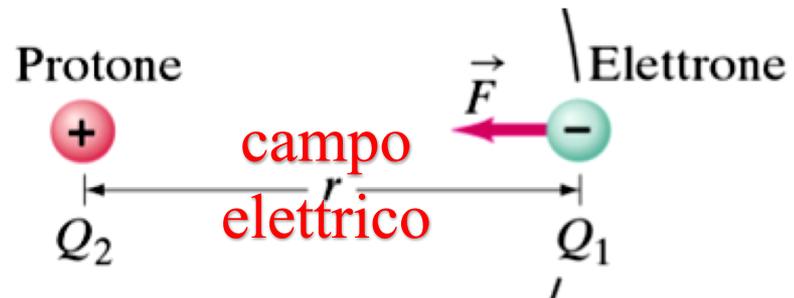
Michael Faraday  
(1791-1867)

Già Newton e Cartesio avevano qualche problema ad accettare l'esistenza di una interazione, come quella gravitazionale, che sembrava avvenire istantaneamente, indipendentemente dalla distanza e in assenza di un mediatore noto. Fu per rimediare a un tale disagio che nella prima metà dell'800 lo scienziato britannico **Michael Faraday** introdusse, nello studio dei fenomeni elettromagnetici, il celebre concetto di “**campo**”, che poi si è rivelata essere una idea delle più feconde nella storia della fisica moderna.

Faraday suggerì che ogni carica elettrica  $Q$  producesse attorno a sé una nuova entità, che chiamò “**campo elettrico**”, che pervade l'intero spazio (vedi figura). Una seconda carica  $q$  che venisse posta in un punto nelle vicinanze di  $Q$  risentirebbe quindi della forza elettrica esercitata su di essa non già *direttamente* dalla carica  $Q$  ma *indirettamente* dal campo elettrico prodotto da  $Q$ .



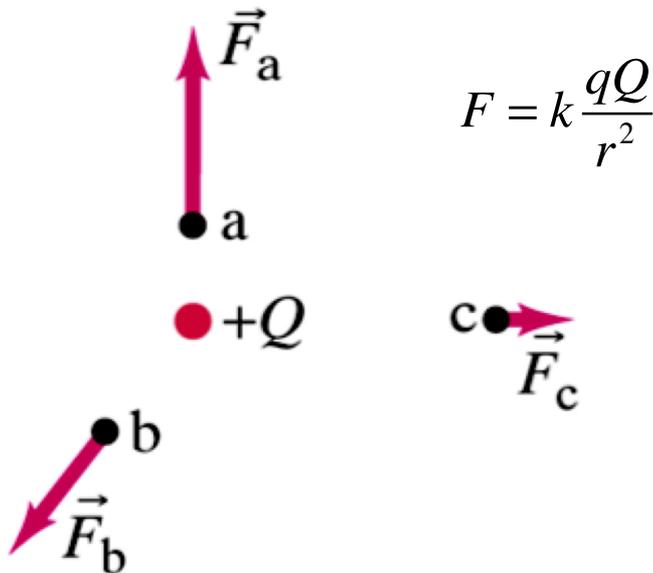
In questa descrizione dell'interazione elettrostatica, quindi, **le cariche non interagiscono più direttamente tra loro ma attraverso la mediazione del campo elettrico da esse generato**, campo che sarà tanto più intenso quanto più ci si trova nelle vicinanze della carica che lo ha prodotto.



# Il Campo Elettrico

Quantitativamente, il campo elettrico generato da una carica o da un insieme di cariche può essere studiato misurando la forza elettrostatica che esso esercita su una “**carica di prova**”  $q$ , **generalmente positiva**, che deve essere sufficientemente piccola da non perturbare significativamente il campo elettrico generato dalla distribuzione delle altre cariche.

Nella figura qui sotto immaginiamo che la **carica di prova**  $q$  venga posizionata successivamente in tre punti a, b e c, attorno ad una **carica positiva**  $Q$ : la forza che agisce sulla carica  $q$  in ciascuno dei tre punti è rappresentata da tre vettori che risultano tutti diretti *radialmente* lungo la retta congiungente le due cariche e rivolti verso l'esterno (essendo le cariche entrambe positive). Il modulo (la lunghezza) dei vettori invece varierà nei tre casi, essendo la forza (per la legge di Coulomb) inversamente proporzionale alla distanza di  $q$  dalla carica centrale  $Q$ .

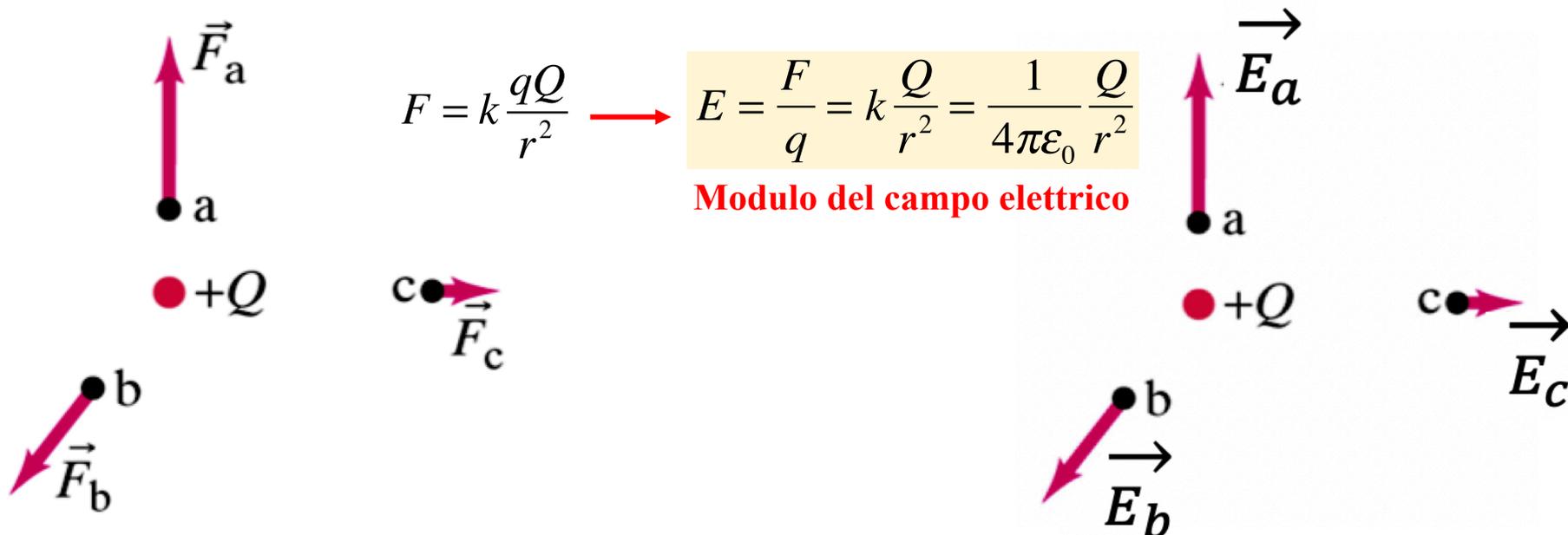


# Definizione di Campo Elettrico

Il **campo elettrico**  $\vec{E}$  in un dato punto dello spazio attorno a una carica o a una configurazione di cariche verrà a questo punto definito dal **rapporto** tra la forza  $\vec{F}$  agente su una carica di prova positiva  $q$  che si trovi in quel punto divisa per il valore di  $q$  (che si immagina tendente a zero):

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

Nel caso di una **carica puntiforme positiva Q**, il campo da essa generato in qualsiasi punto P posto ad una distanza  $r$  avrà dunque una intensità (modulo) pari a:

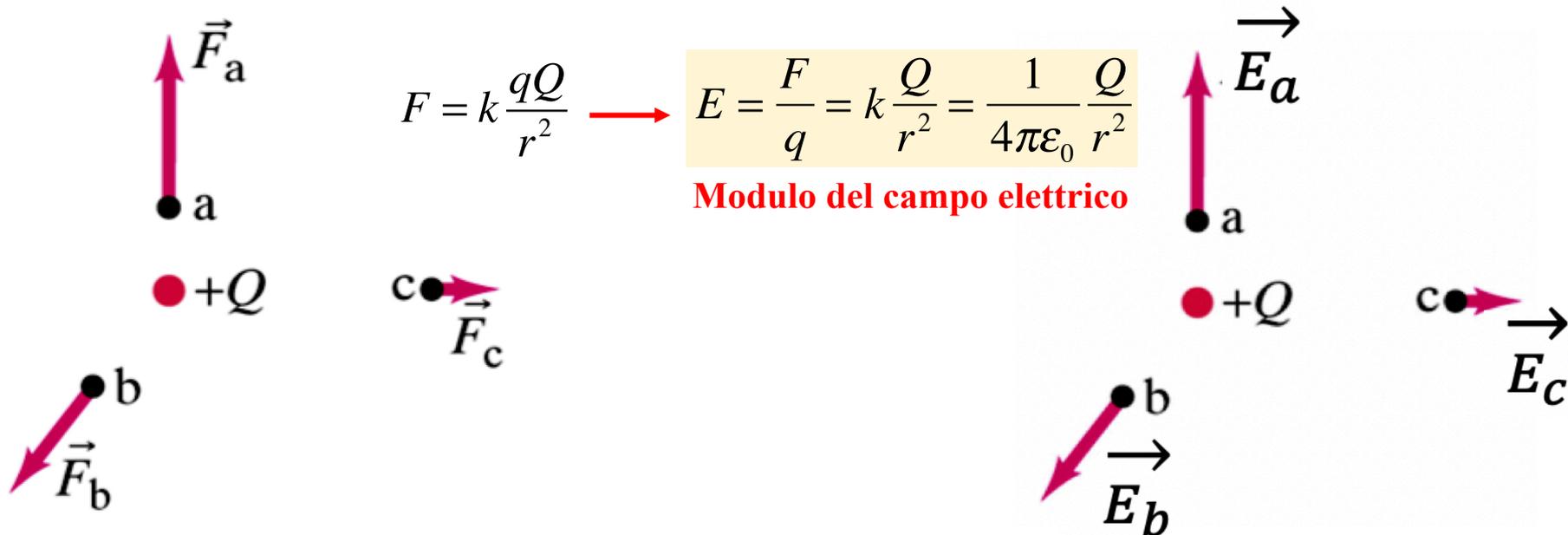


# Definizione di Campo Elettrico

Il **campo elettrico**  $\vec{E}$  in un dato punto dello spazio attorno a una carica 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 quel punto divisa per il valore di  $q$  (che si immagina tendente a zero):

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

La divisione per  $q$  deriva dal fatto che **il campo elettrico non deve dipendere dalla carica di prova ma solo dalla carica (o dalle cariche) che lo ha (hanno) generato**. Essa non altera quindi la direzione della forza ma solo il suo **modulo**, che sarà dato dalla forza per unità di carica e, nel sistema SI, si misurerà in Newton su Coulomb: N/C.

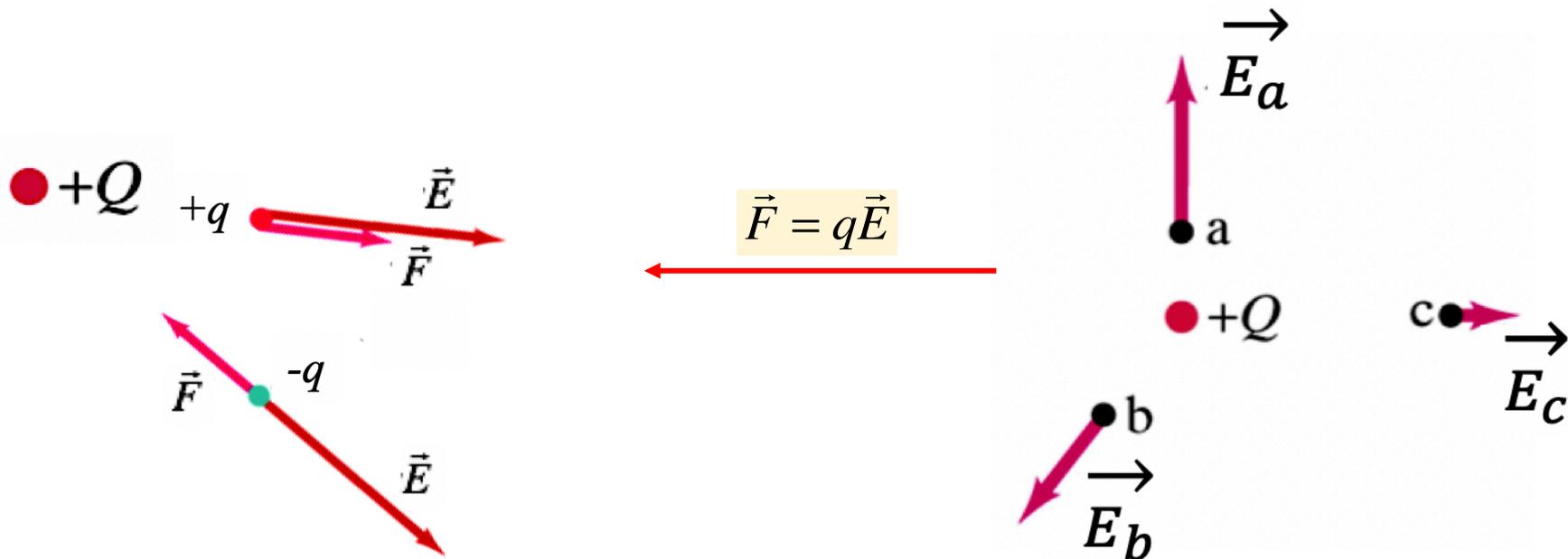


# Definizione di Campo Elettrico

Il **campo elettrico**  $\vec{E}$  in un dato punto dello spazio attorno a una carica o a una configurazione di cariche verrà a questo punto definito dal **rapporto** tra la forza  $\vec{F}$  agente su una carica di prova positiva  $q$  che si trovi in quel punto divisa per il valore di  $q$  (che si immagina tendente a zero):

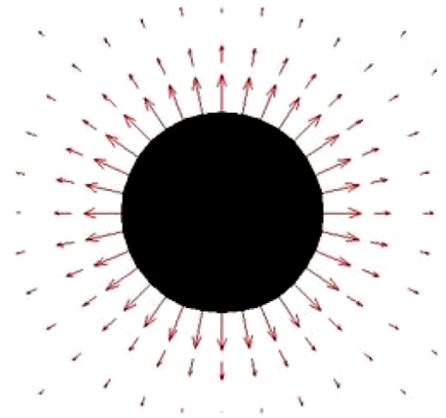
$$\vec{E} = \vec{F} / q$$

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

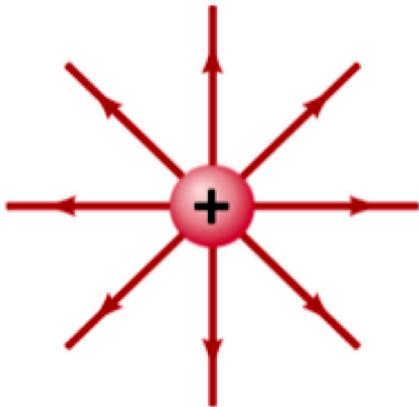


# Linee di Campo Elettrico

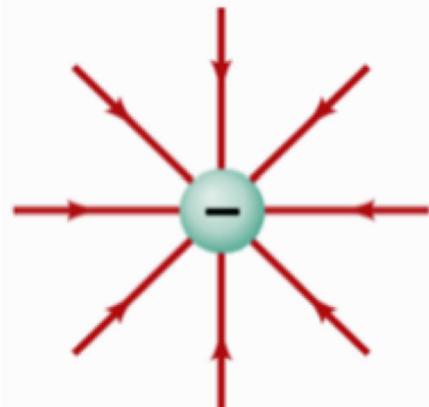
Il campo elettrico, potendo essere descritto punto per punto per mezzo di vettori, è un esempio di **campo vettoriale**. La rappresentazione grafica di un campo vettoriale per mezzo di frecce genera però rapidamente confusione all'aumentare del numero di punti considerato (che è potenzialmente infinito!).



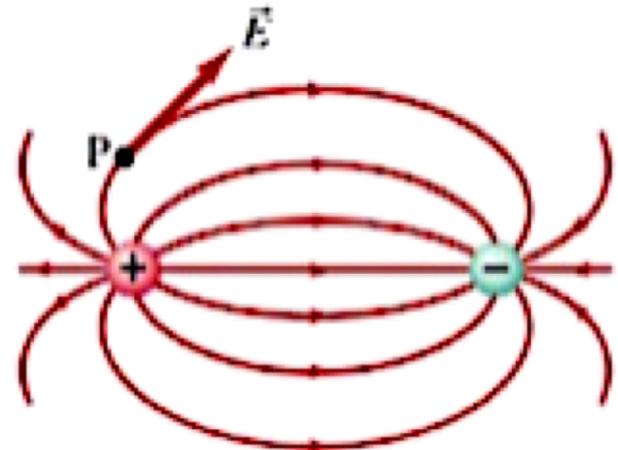
Una rappresentazione più pratica ed efficace è invece, sicuramente, quella delle cosiddette “**linee di campo**” o “**linee di forza**”, ciascuna delle quali individua la posizione del campo nei vari punti dello spazio secondo la regola che **il vettore campo elettrico deve essere tangente in quei punti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



**Carica positiva isolata**



**Carica negativa isolata**

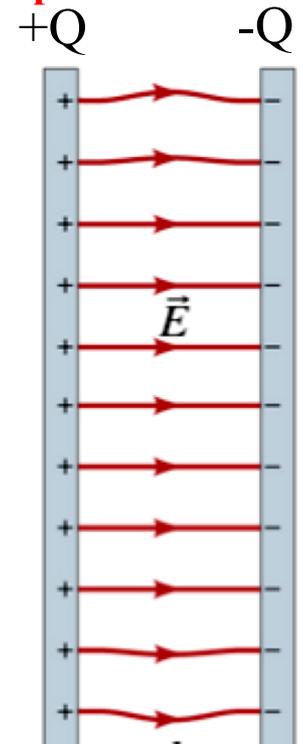
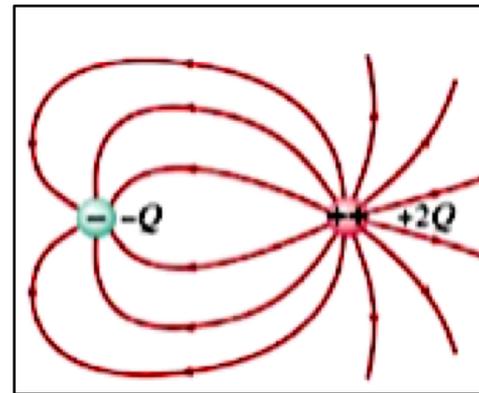
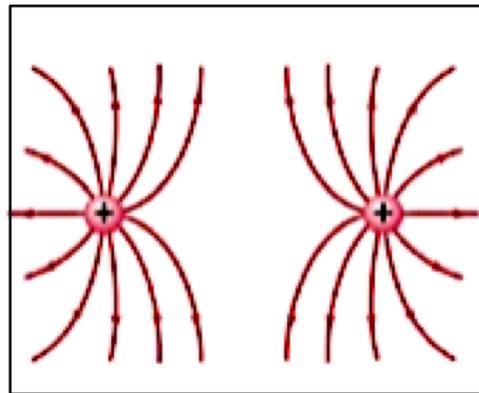
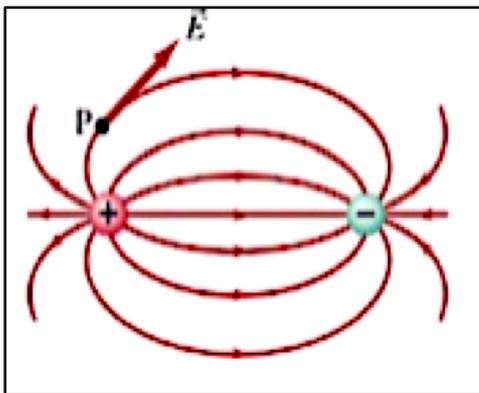


**Dipolo elettrico**

# 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;**
- 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;**

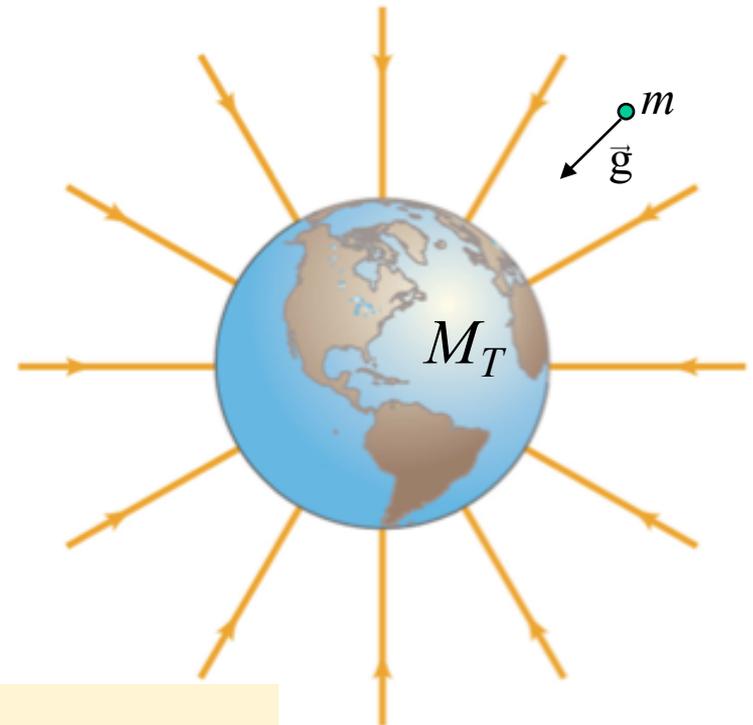


# Il Campo Gravitazionale

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.

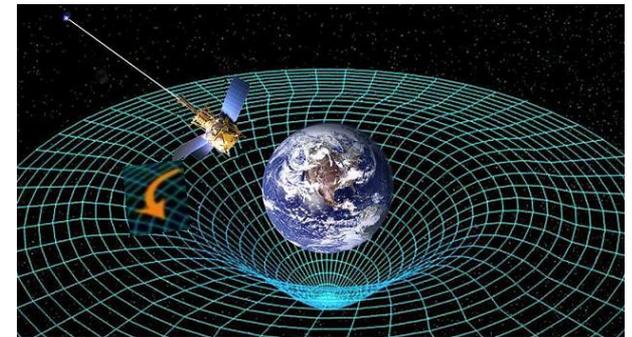
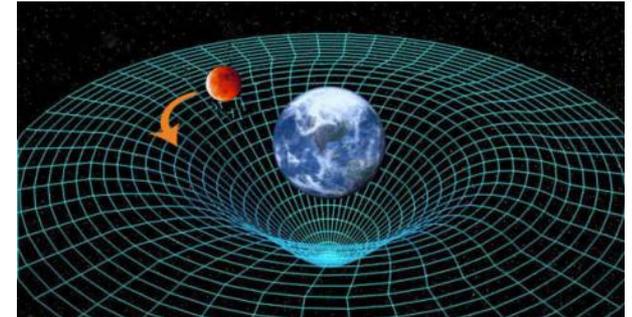
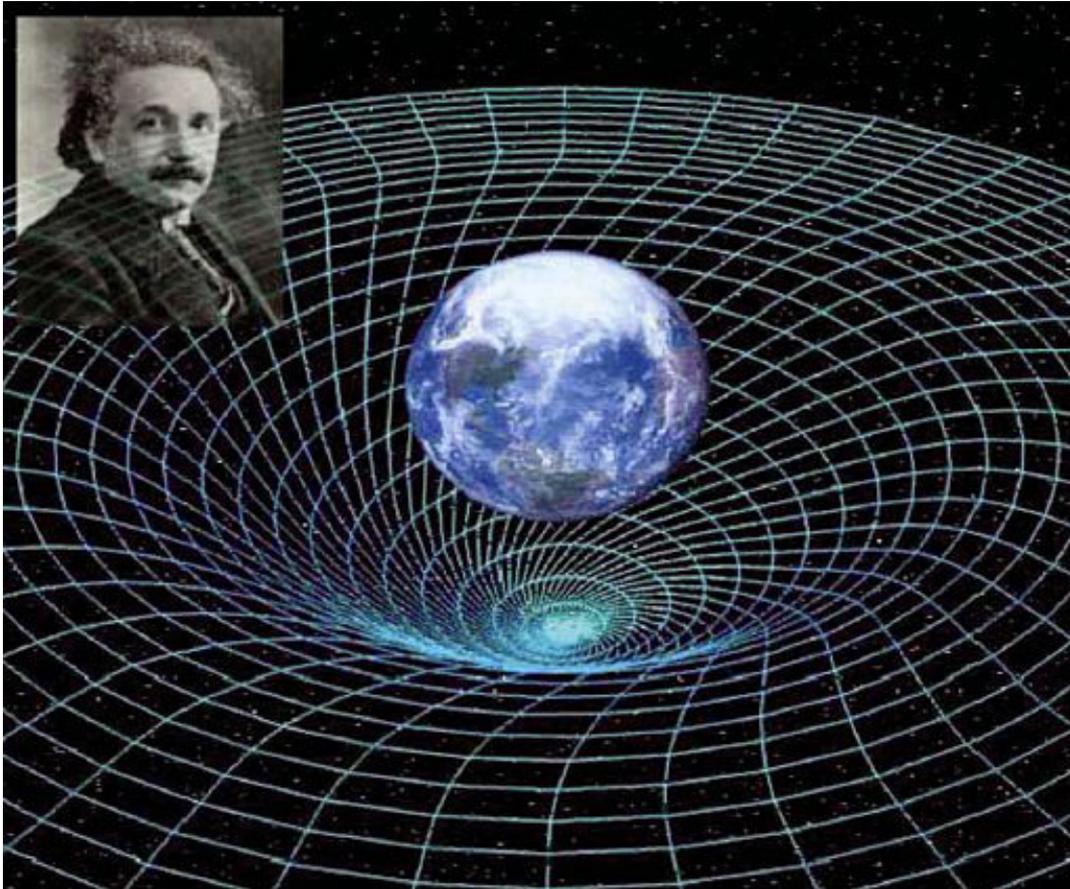
La Terra, ad esempio, genera un campo gravitazionale molto intenso responsabile della forza di attrazione sentita dai corpi che si trovano sulla sua superficie. Analogamente al caso elettrico, il **campo gravitazionale** prodotto dalla massa  $M$  in un punto viene definito come il rapporto tra la forza 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

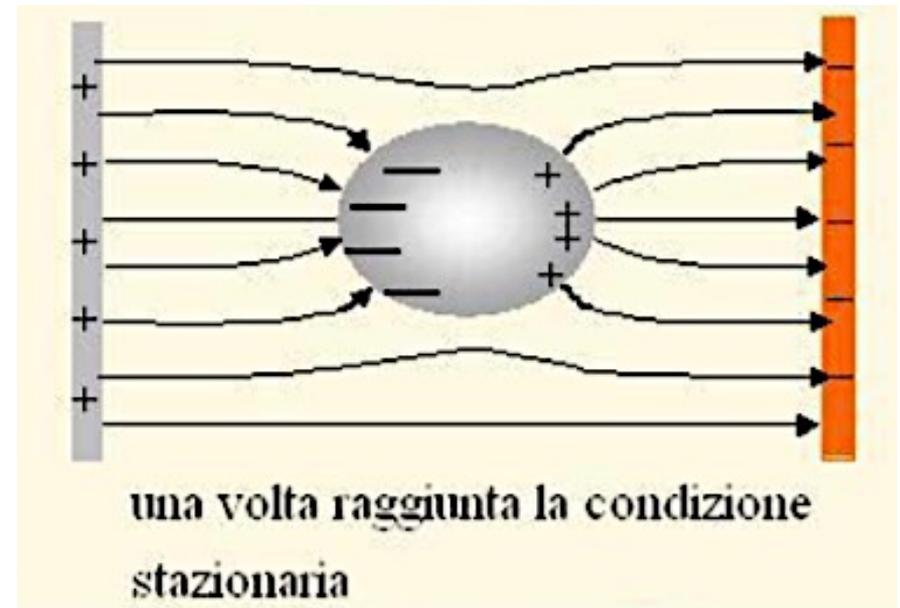
Oggi, grazie alla **Teoria della Relatività Generale** di Einstein (1915), possiamo visualizzare il campo gravitazionale generato dalla Terra come una *deformazione dello spazio-tempo* che “costringe” i suoi satelliti, naturali o artificiali, a percorrere una traiettoria circolare attorno ad essa.



# Campo Elettrico e Conduttori

Vediamo adesso alcune proprietà dei corpi conduttori riguardo al campo elettrico.

1) Innanzitutto osserviamo che in condizioni statiche, ossia quando le cariche sono a riposo, **all'interno di un conduttore il campo elettrico deve essere sempre nullo**: se così non fosse, infatti, gli elettroni liberi si muoverebbero sotto l'effetto della forza elettrostatica agente su di essi fino a raggiungere una posizione di equilibrio in cui il campo elettrico  $\vec{E}$ , e quindi la forza  $\vec{F}=q\vec{E}$ , risulta uguale a zero.



# Campo Elettrico e Conduttori

Vediamo adesso alcune proprietà dei corpi conduttori riguardo al campo elettrico.

1) Innanzitutto osserviamo che in condizioni statiche, ossia quando le cariche sono a riposo, **all'interno di un conduttore il campo elettrico deve essere sempre nullo**: se così non fosse, infatti, gli elettroni liberi si muoverebbero sotto l'effetto della forza elettrostatica agente su di essi fino a raggiungere una posizione di equilibrio in cui il campo elettrico  $\vec{E}$ , e quindi la forza  $\vec{F}=q\vec{E}$ , risulta uguale a zero. **Questo è il principio alla base della cosiddetta “gabbia di Faraday”**.

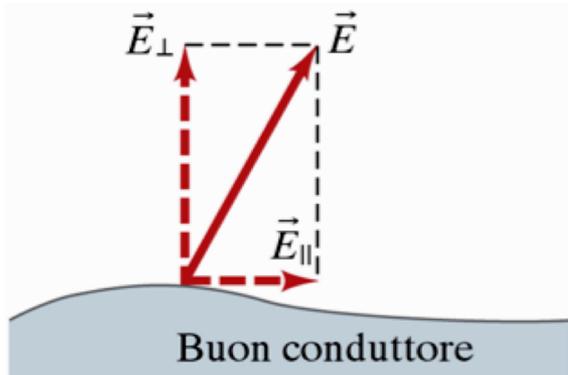
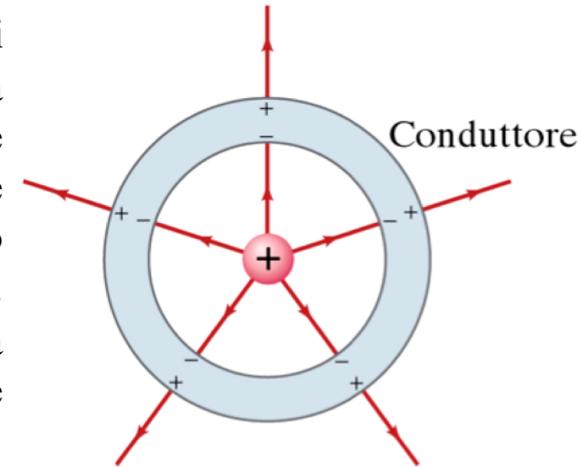


# Campo Elettrico e Conduttori

Vediamo adesso alcune proprietà dei corpi conduttori riguardo al campo elettrico.

1) Innanzitutto osserviamo che in condizioni statiche, ossia quando le cariche sono a riposo, **all'interno di un conduttore il campo elettrico deve essere sempre nullo**: se così non fosse, infatti, gli elettroni liberi si muoverebbero sotto l'effetto della forza elettrostatica agente su di essi fino a raggiungere una posizione di equilibrio in cui il campo elettrico  $\vec{E}$ , e quindi la forza  $\vec{F}=q\vec{E}$ , risulta uguale a zero. **Questo è il principio alla base della cosiddetta “gabbia di Faraday”**.

2) Da ciò deriva che **la carica in eccesso in un conduttore si distribuisce sulla sua superficie**: infatti, se supponiamo che una carica positiva  $Q$  sia circondata da un guscio sferico metallico isolato e scarico, non potendovi essere campo elettrico all'interno del conduttore evidentemente le linee di forza uscenti dalla carica positiva devono terminare su cariche negative sulla superficie interna del guscio. Quindi sulla superficie interna del guscio verrà indotta una carica totale  $-Q$  e, poichè il conduttore nel suo complesso deve rimanere neutro, una carica  $+Q$  verrà indotta sulla superficie esterna del guscio.



3) Una ulteriore, interessante proprietà dei conduttori, è che **il campo elettrico in qualunque punto della superficie esterna del conduttore è perpendicolare alla superficie**: se infatti il campo  $\vec{E}$  avesse una componente non nulla tangente alla superficie, gli elettroni liberi si muoverebbero sotto l'effetto della forza elettrostatica  $\vec{F}=e\vec{E}_{||}$  fino a raggiungere nuovamente una posizione di equilibrio in cui la componente tangenziale risulti uguale a zero.

# 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 tra due cariche 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  $b$ , 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).

