

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TERAMO

Fisica

Medicina Veterinaria — Semestre Aperto
2026

Prof. Francesco de Pasquale

Lezioni 54, 55 e 56

Linee di Forza del Campo Elettrico

Le **linee di forza** (o linee di campo) sono una rappresentazione grafica di $\vec{E}$. La tangente in ogni punto di una linea di forza indica la direzione del campo in quel punto.

Regola 1 — Densità

La **densità delle linee di forza** è proporzionale all'intensità del campo: più linee per unità di area $\rightarrow$ campo più intenso. Vicino alla carica il campo è più forte.

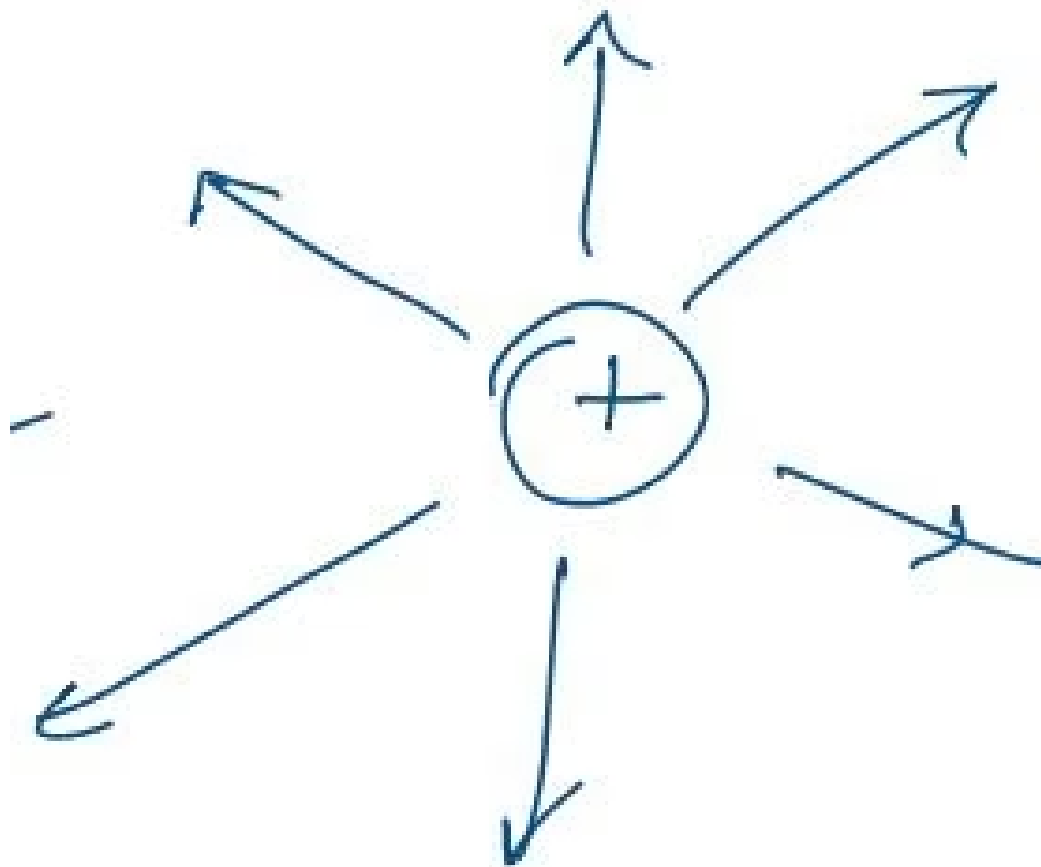
Regola 2 — Tangente

In ogni punto, la tangente alla linea di forza indica la direzione della forza di Coulomb che agirebbe su una carica di prova positiva posta in quel punto.

Regola 3 — Non si incrociano mai

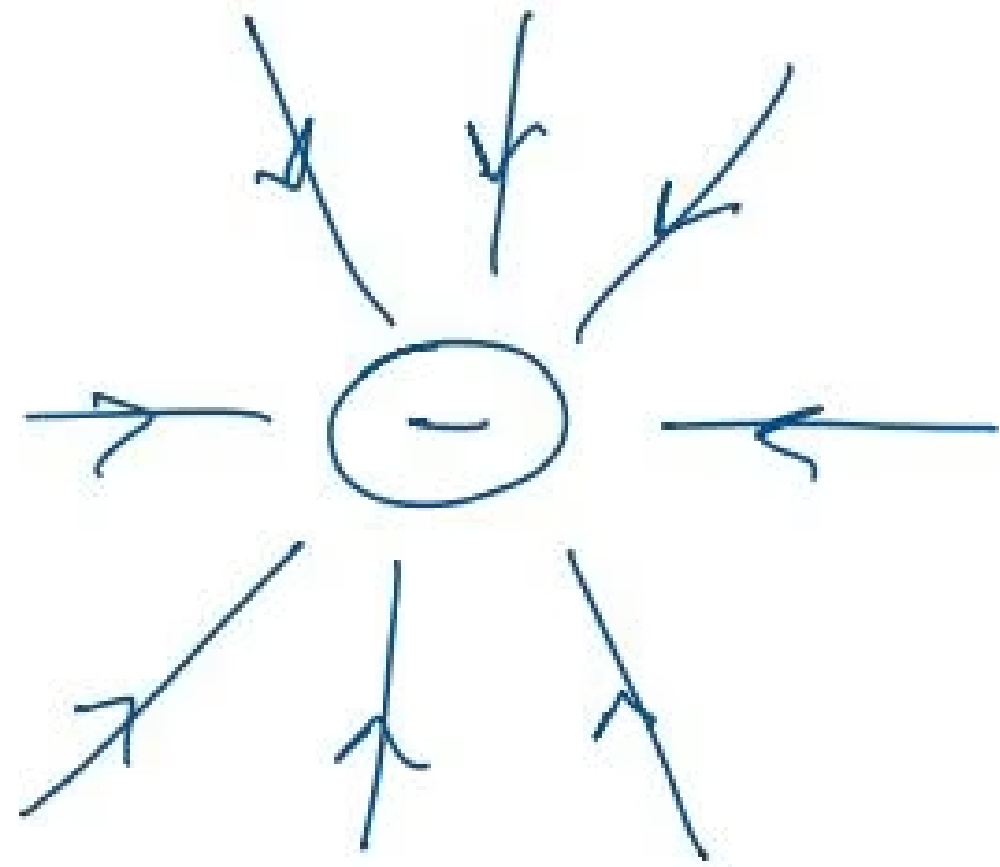
Due linee di forza **non possono mai incrociarsi**: in ogni punto dello spazio il campo ha una direzione univoca. Se si incrociassero, ci sarebbero due direzioni nel medesimo punto — impossibile.

Linee di Forza: Carica Positiva e Negativa



Carica positiva (+)

Le linee escono radialmente verso l'esterno.

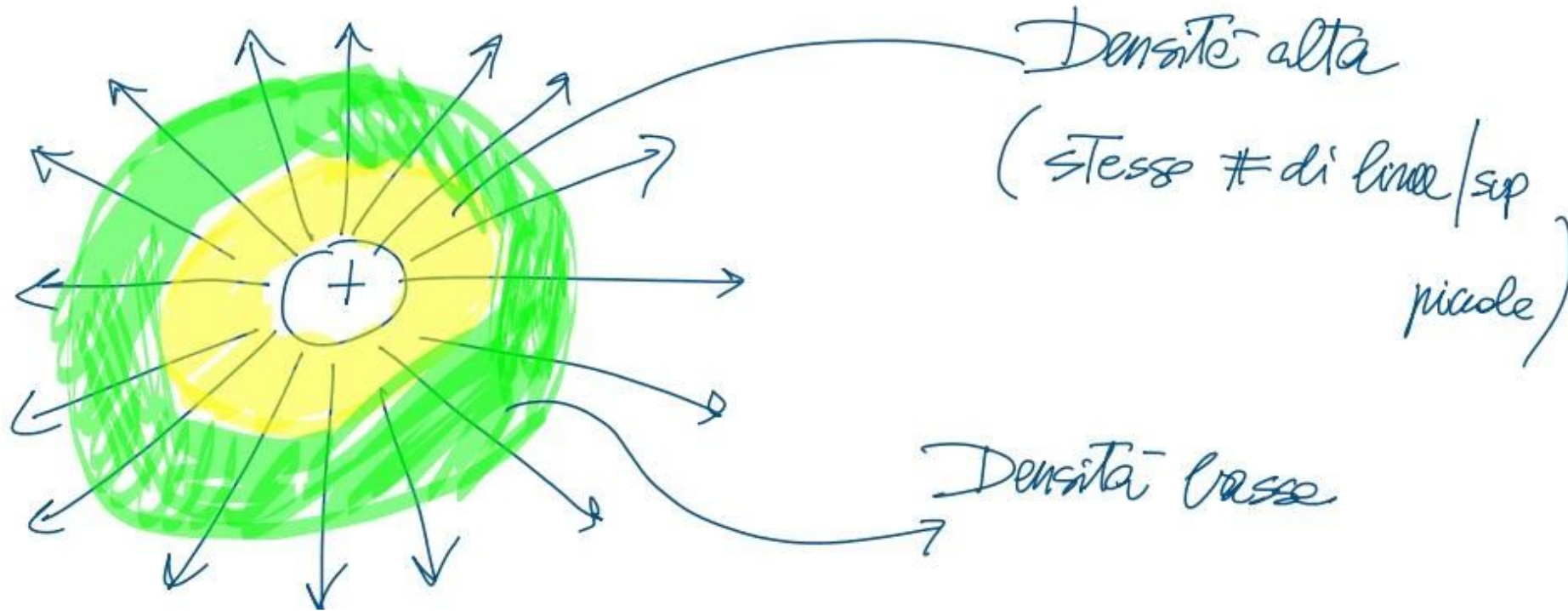


Carica negativa (-)

Le linee entrano radialmente verso il centro.

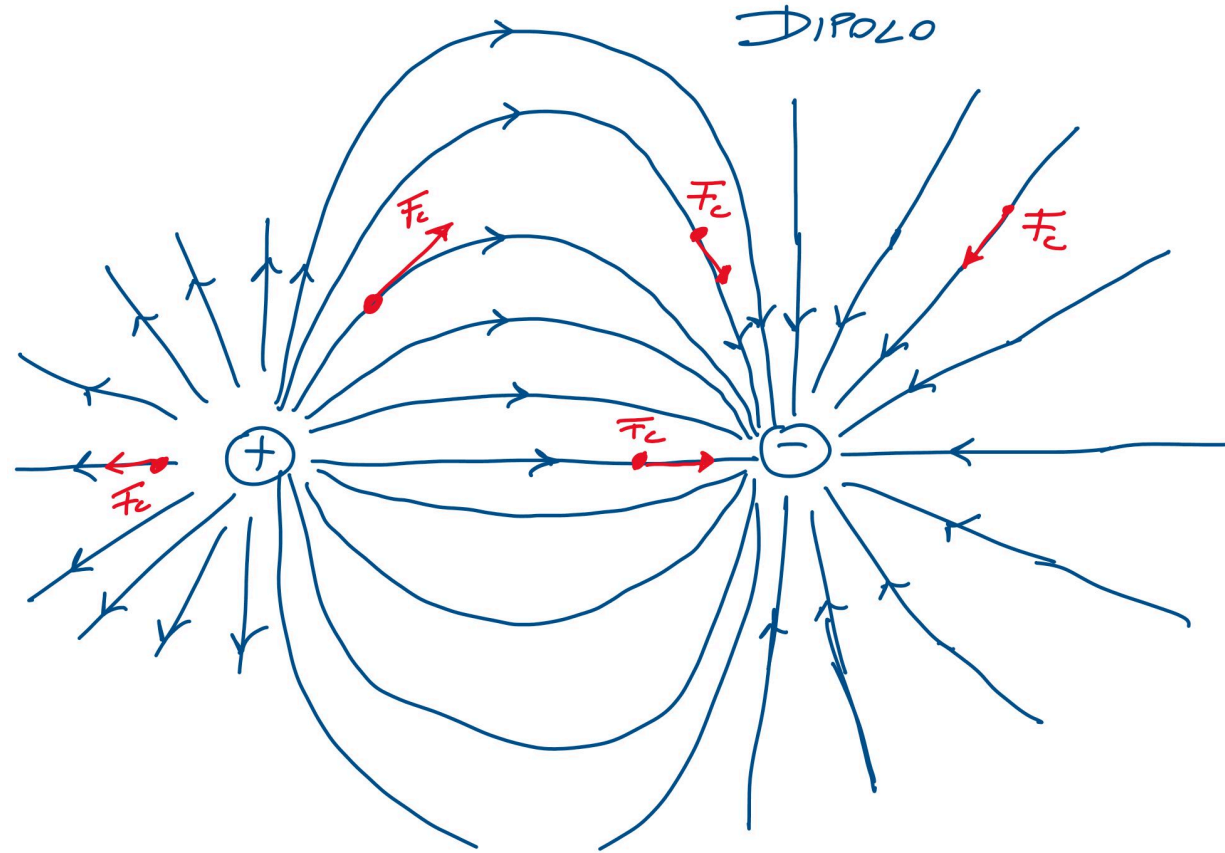
Convenzione: le linee di forza sono sempre orientate nella direzione in cui si muoverebbe una **carica di prova positiva**. Dalla carica positiva escono, nella carica negativa entrano.

Densità delle Linee di Forza



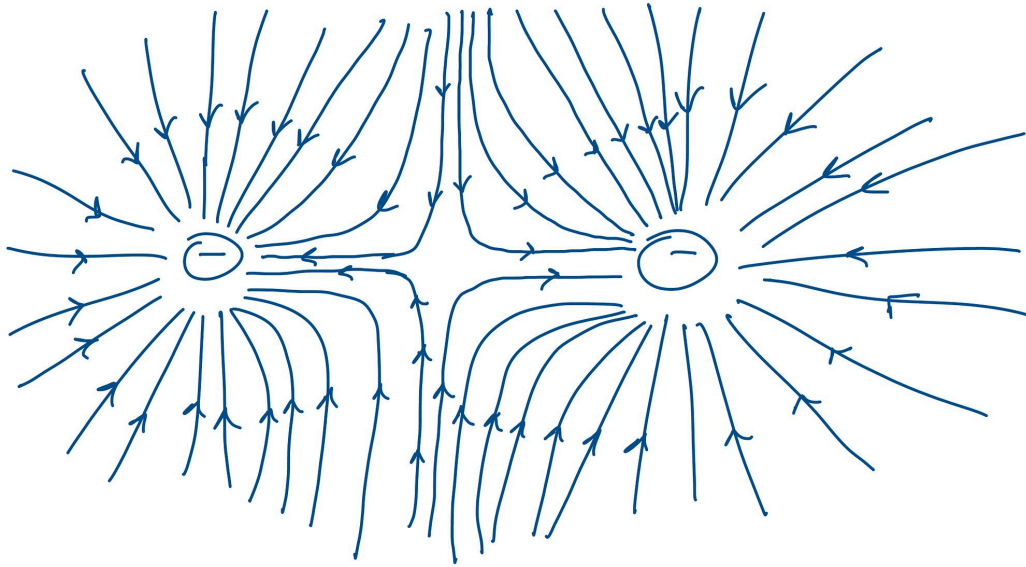
La **densità alta** di linee vicino alla carica corrisponde a un campo intenso, mentre la **densità bassa** nelle zone lontane indica un campo debole. Questo è coerente con la legge $E \propto 1/r^2$: raddoppiando la distanza, il campo si riduce di 4 volte.

Linee di Forza di un Dipolo Elettrico



Il **dipolo elettrico** è un sistema composto da due cariche uguali e opposte ($+q$ e $-q$). Le linee di forza escono dalla carica positiva, si curvano nello spazio e entrano nella carica negativa. Il campo è più intenso nella zona tra le due cariche. I dipoli elettrici sono fondamentali in biologia: le molecole polari come l'acqua (H_2O) sono dipoli permanenti.

Campo Elettrico di Due Cariche negative

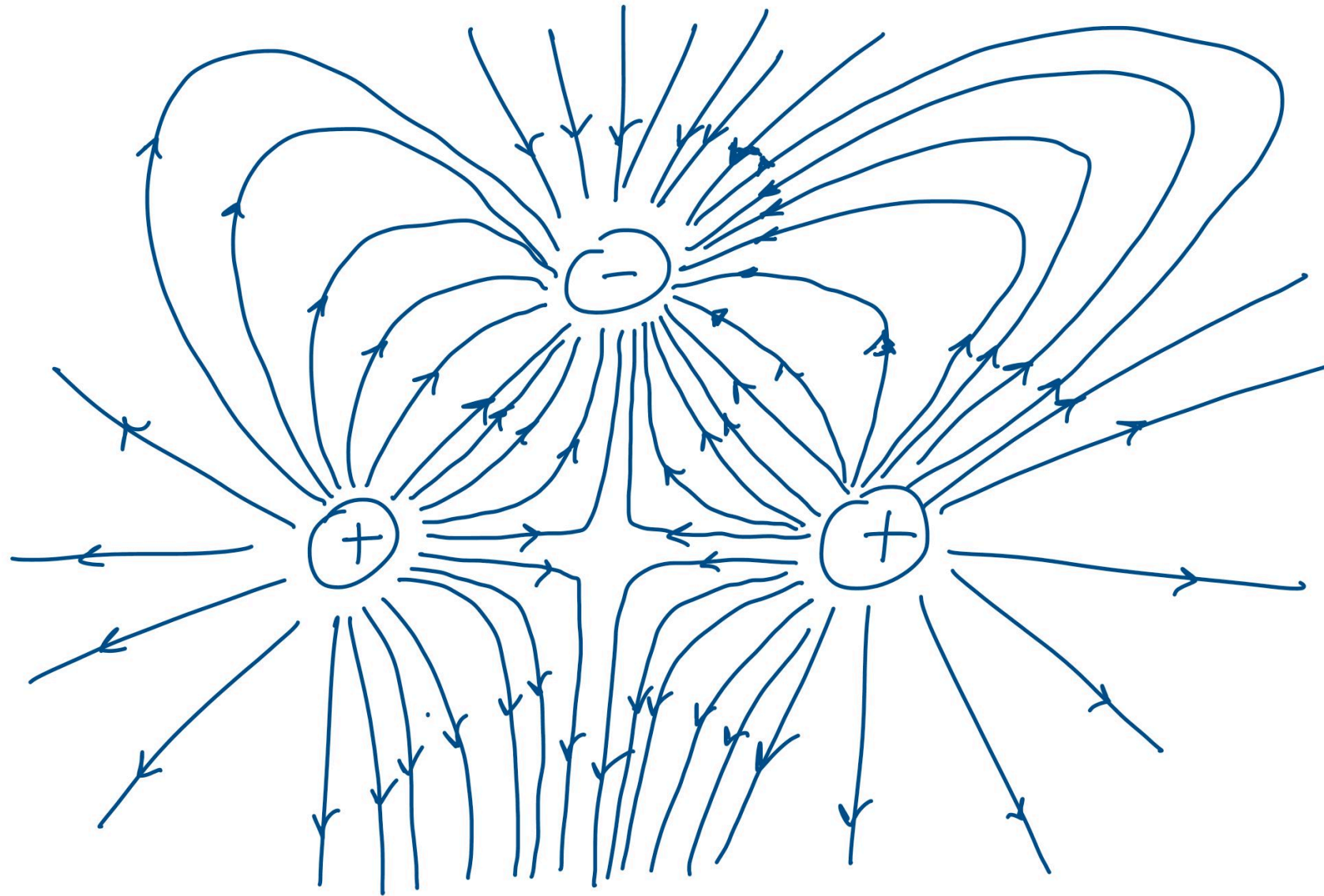


Due cariche dello stesso segno

Quando due cariche positive sono vicine, le linee di forza si **respingono**: escono da entrambe le cariche e si deflettono a vicenda. Nella zona equidistante tra le due cariche i contributi si cancellano parzialmente, dando luogo a una regione di campo debole.

Il campo risultante si ottiene **sommando vettorialmente** i contributi delle due cariche in ogni punto dello spazio.

Esempio



Campo elettrico generato da una distribuzione di cariche puntiformi

Quando il campo elettrico è generato da più cariche contemporaneamente, vale il principio di sovrapposizione:

Il campo elettrico totale in un punto è uguale alla somma vettoriale dei campi elettrici generati, separatamente, da ciascuna carica presente nel sistema:

$$\vec{E}_{\text{tot}} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \cdots + \vec{E}_N$$

è necessario quindi scomporre ogni campo nelle componenti cartesiane lungo gli assi x e y :

$$E_x = \sum_i E_{ix} \quad E_y = \sum_i E_{iy}$$

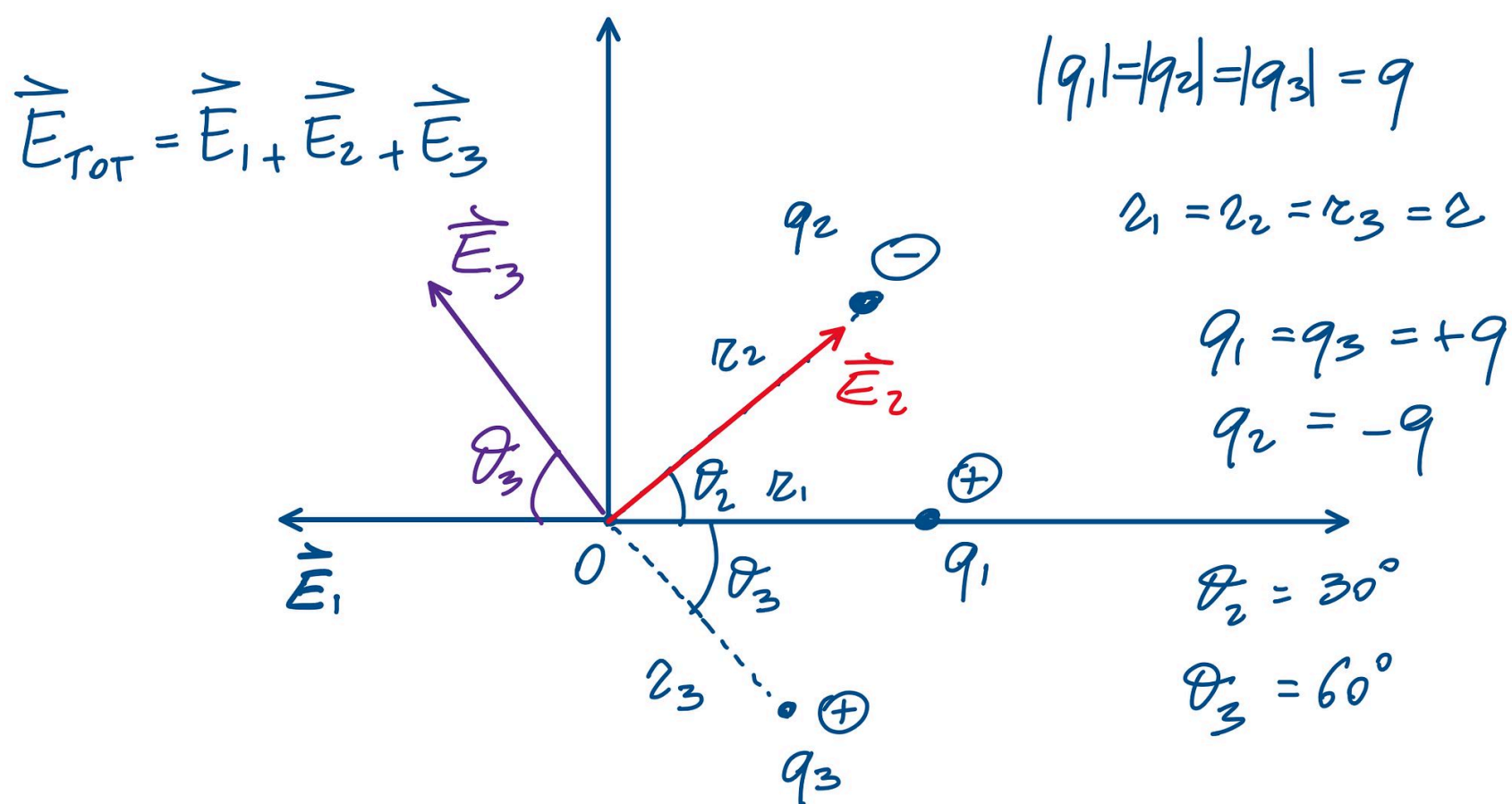
Una volta calcolate le componenti totali, il modulo del campo risultante è:

$$E_{\text{tot}} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$$

L'angolo θ che il campo forma con l'asse x si determina mediante:

$$\theta = \arctan \left(\frac{E_y}{E_x} \right)$$

Esempio



$$\begin{cases} E_{TOT,x} = -E_1 + E_2 \cos \theta_2 - E_3 \cos \theta_3 \\ E_{TOT,y} = E_2 \sin \theta_2 + E_3 \sin \theta_3 \end{cases}$$

$$\begin{cases} E_{TOT,x} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[-\frac{q}{r^2} + \frac{q}{r^2} \cos \theta_2 - \frac{q}{r^2} \cos \theta_3 \right] \end{cases}$$

$$\begin{cases} E_{TOT,y} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{q}{r^2} \sin \theta_2 + \frac{q}{r^2} \sin \theta_3 \right] \end{cases}$$

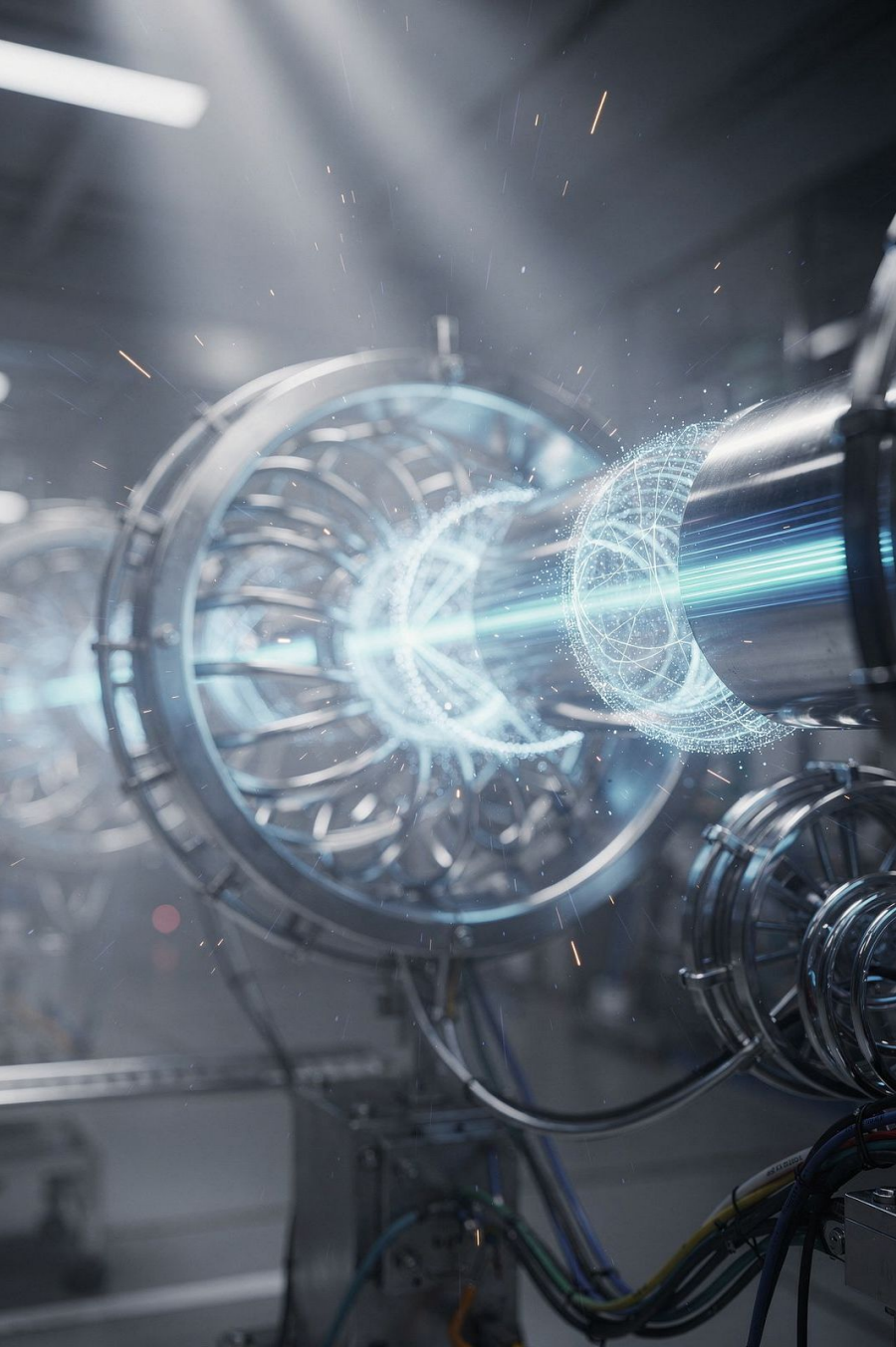
$$\begin{cases} E_{TOT,x} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \left(-1 + \cos \theta_2 - \cos \theta_3 \right) \end{cases}$$

-0,63

$$\begin{cases} E_{TOT,y} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \left(\sin \theta_2 + \sin \theta_3 \right) \end{cases}$$

0,91

$$|\vec{E}_{TOT}| = \sqrt{E_{TOT,x}^2 + E_{TOT,y}^2} ; \theta = \arctan\left(\frac{E_{TOT,y}}{E_{TOT,x}}\right)$$



Moto di una Carica Elettrica in un Campo $\vec{E}$

Quando una carica q di massa m è immersa in un campo elettrico $\vec{E}$, subisce una forza di Coulomb che le imprime un'accelerazione. Applicando la seconda legge di Newton:

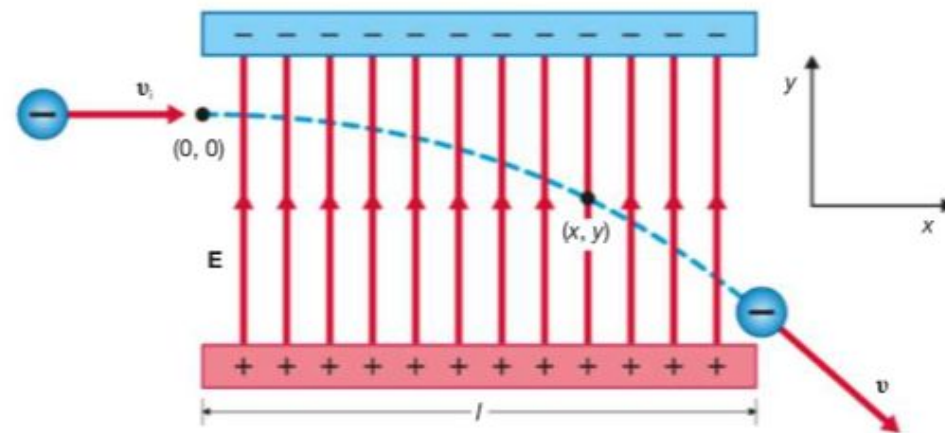
$$\vec{F} = q\vec{E} = m\vec{a} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\vec{a} = \frac{q}{m}\vec{E}}$$

Se il campo è **uniforme**, l'accelerazione è **costante** $\rightarrow$ moto uniformemente accelerato.

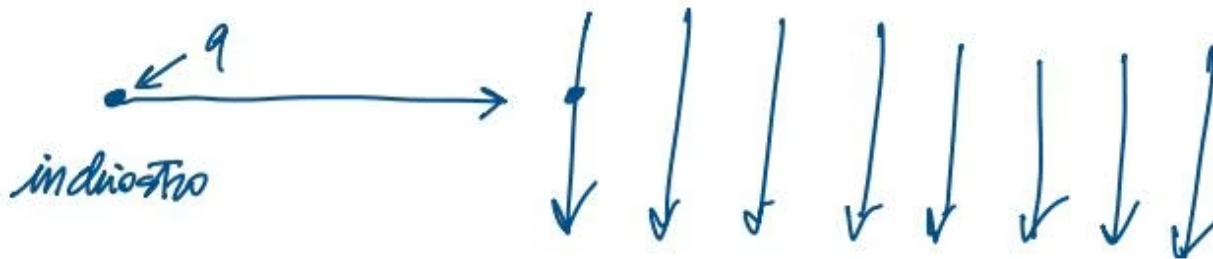
Moto Parabolico in Campo Uniforme

Se la carica entra nel campo con una velocità **perpendicolare** al campo stesso, il moto è analogo a quello di un proiettile in caduta libera: si compone di un moto rettilineo uniforme nella direzione iniziale e di un moto uniformemente accelerato nella direzione del campo.

Il risultato è una **traiettoria parabolica**, esattamente come quella di una palla lanciata orizzontalmente in un campo gravitazionale.

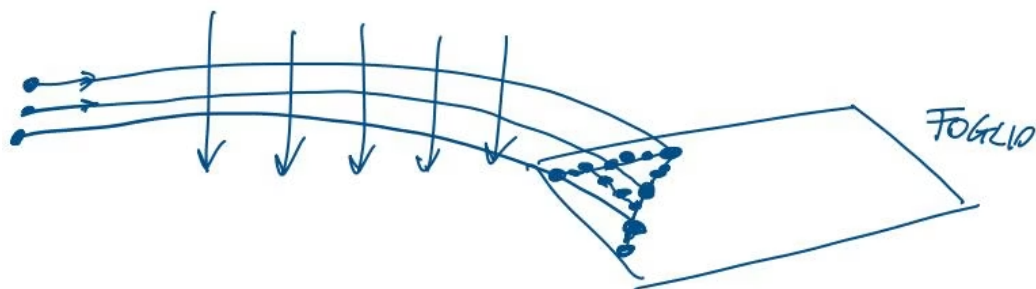


Esempio: Stampante Ink-Jet



La stampante ink-jet sfrutta proprio il **moto parabolico** di cariche in campo uniforme. Le goccioline di inchiostro vengono caricate elettricamente e poi fatte passare attraverso un campo elettrico uniforme $\vec{E} = \text{cost.}$ L'accelerazione $a = \frac{q}{m}E$ dipende dalla carica: gocce con cariche diverse subiscono deviazioni diverse, atterrando in punti diversi del foglio.

Deviazione Differenziale e DPI



Ogni goccia viene deviata di una quantità diversa: $a \propto q/m$

DPI — Dots Per Inch

La risoluzione di stampa si misura in **DPI (Dot Per Inch)**: quanti punti vengono stampati per pollice lineare.

- **300 DPI**: risoluzione standard, sufficiente per testi
- **600 DPI**: alta risoluzione, per immagini dettagliate

Maggiore è il numero di cariche distinte gestibili, maggiore è la risoluzione: ogni valore di q porta la goccia in un punto preciso del foglio.

Esercizi

Esercizio 1477

Q

$4Q$

$r = 90 \text{ cm}$

q

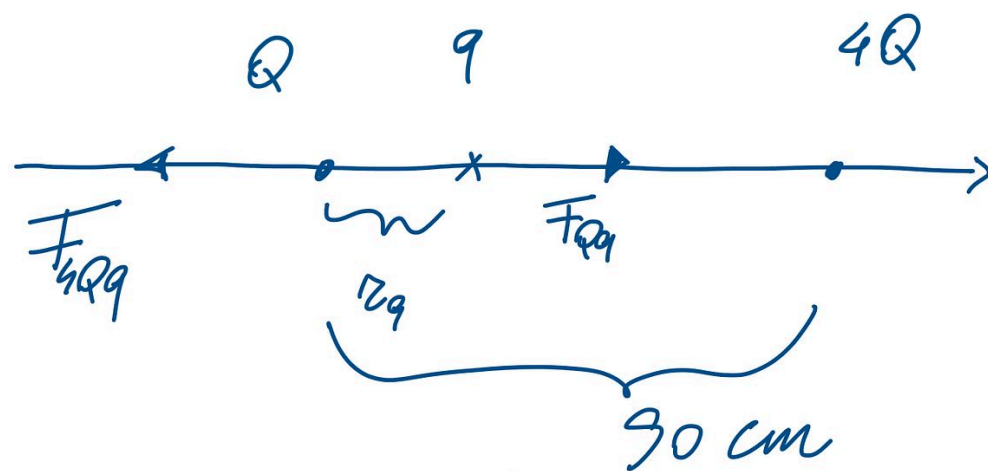
A) 15 cm

→ B) 30 "

C) 45 "

D) 60 "

E) 75 "



$$F_{4Qq} = F_{Qq}$$

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{4Qq}{(90 - r_q)^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq}{r_q^2}$$

$$\sqrt{4r_q^2} = \sqrt{(90 - r_q)^2}$$

$$2r_q = (90 - r_q)$$

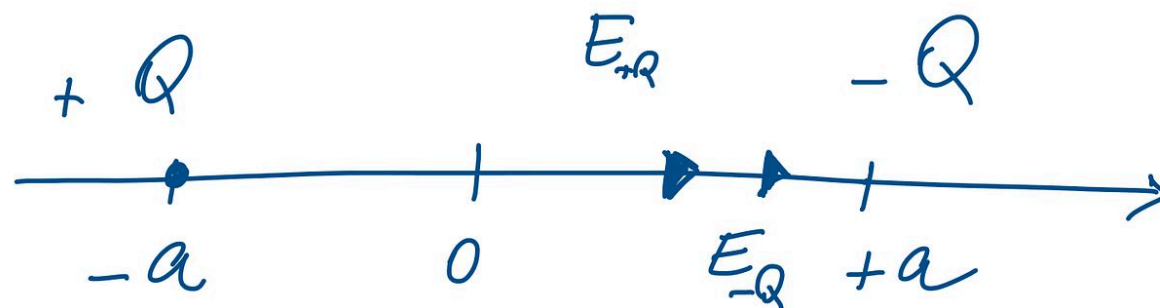
$$2r_q + r_q = 90$$

$$3r_q = 90$$

$$r_q = 30 \text{ cm}$$

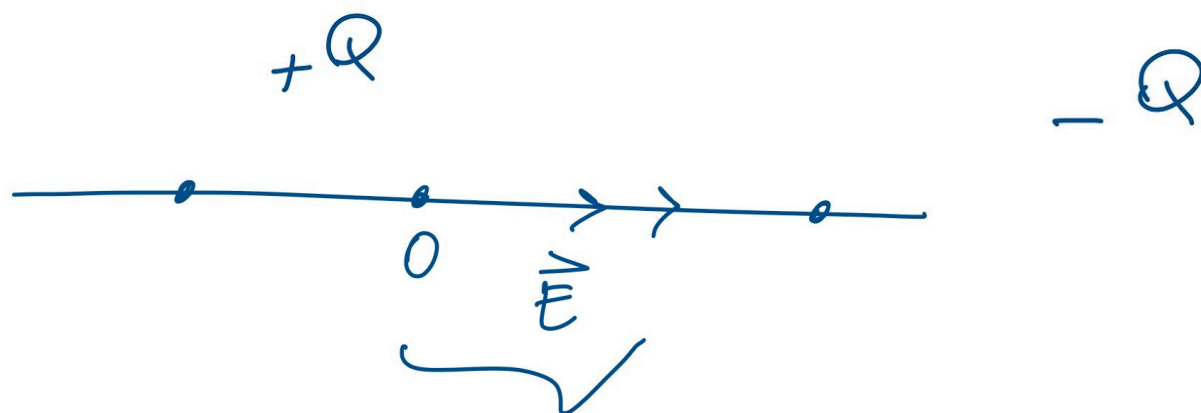
B ✓

$+Q$; $-Q$



in $x=0 \Rightarrow E = ?$

- A) $\neq 0$ x
- B) indeterminato
- C) $= 0$ x SIMETRIA
- ~~D) $= 0$ solo se $Q > 0$~~
- ~~E) $\neq 0$ $\perp$ x~~



$\Rightarrow$ A) $E \neq 0$ lungo x

Esercizio # 1486

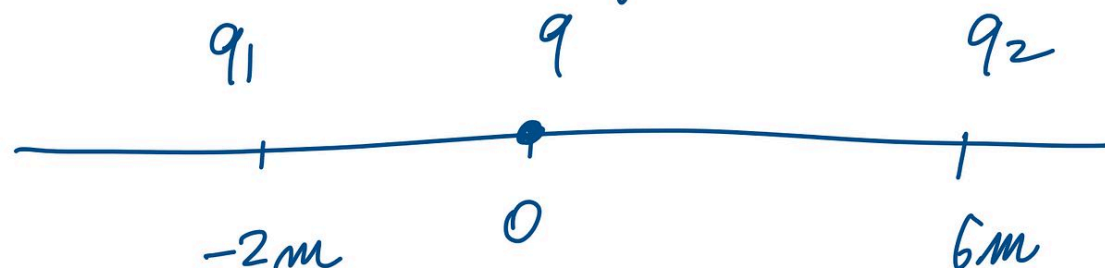
-2m ; 6m

$$\frac{q_1}{q_2}$$

$$\Downarrow$$

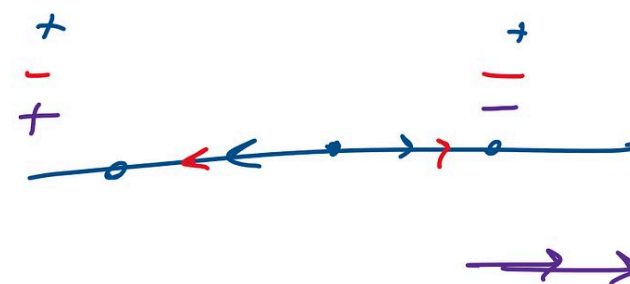
$$F_E = 0$$

q posto all'origine



- | | | | |
|----|----------------|----|-----------------|
| A) | -9 | D) | $\frac{1}{9}$ ← |
| B) | $-\frac{1}{9}$ | E) | 9 |
| C) | 1 | | |

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{(-2)^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2}{(6)^2}$$



$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{(-2)^2}{6^2} = \frac{4}{36} = \frac{1}{9}$$

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{1}{9}$$

⇒ ✓

Fusion # 1516

$$\Delta V = 60 \text{ V}$$

c) ✓



Forze Conservative e Lavoro

La **forza di Coulomb** è una **forza conservativa**, esattamente come la forza gravitazionale. Ciò significa che il lavoro da essa compiuto dipende solo dal punto di partenza e di arrivo, non dal percorso seguito.

$$L = \vec{F} \cdot \Delta\vec{s} = F\Delta s \cos \theta$$

Per la forza peso: $\Delta U_{\text{grav.}} = -L_{F_p}$. Analogamente, per la forza elettrica si definisce un'**energia potenziale elettrica**.

Dal Lavoro all'Energia Potenziale Elettrica

Una carica di prova q_0 in un campo elettrico uniforme $\vec{E}$ subisce una forza costante $\vec{F} = q_0 \vec{E}$. Poiché la forza è costante, il lavoro si calcola con la definizione elementare:

$$L = \vec{F} \cdot \Delta \vec{s} = q_0 E \Delta s \cos \theta$$

Caso semplice: spostamento d lungo la direzione del campo ($\theta = 0$):

$$L = q_0 E d$$

Ora dal moment che la forza è conservativa, il lavoro dipende solo dai punti iniziale (IN) e finale (FIN), non dal percorso. Per questo può essere scritto come diminuzione di una energia potenziale, esattamente come per la forza peso ($L = -\Delta U_{\text{grav.}}$)

Definizione Energia Potenziale Elettrica ΔU

$$L_{IN \rightarrow FIN} = -\Delta U_{\text{elettrica}} = U_{IN} - U_{FIN}$$

se il campo è uniforme:

$$\Delta U = -q_0 E d$$

Per il campo di una carica puntiforme Q :

$$U(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q q_0}{r} = k \frac{Q q_0}{r}$$

con riferimento $U = 0$ a distanza infinita. $U > 0$ se le cariche hanno lo stesso segno (si respingono), $U < 0$ se hanno segno opposto (si attraggono).

 Il lavoro della forza di Coulomb = - variazione di energia potenziale elettrica.

Il Potenziale Elettrico

Il potenziale elettrico rappresenta l'energia potenziale elettrica per unità di carica:

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

Il potenziale elettrico si misura nel Sistema Internazionale in volt (V), dove:

$$1 \text{ V} = 1 \frac{\text{J}}{\text{C}}$$

Potenziale generato da una carica puntiforme

Una carica puntiforme Q , posta nel vuoto, genera a distanza r un potenziale elettrico pari a:

$$V = k \frac{Q}{r}$$

dove:

- Q è la carica che genera il potenziale;
- r è la distanza dal punto considerato;
- $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 8,99 \times 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2$.

L'Elettronvolt (eV)

In fisica atomica e nucleare, l'energia si esprime spesso in **elettronvolt (eV)** anziché in Joule, poiché le energie in gioco sono molto piccole. Un elettronvolt è l'energia acquistata da un elettrone accelerato attraverso una differenza di potenziale di 1 V:

$$1 \text{ eV} = |e| \cdot 1V = 1.6 \cdot 10^{-19} J$$

1 eV

Energia di un elettrone in un atomo — scala atomica

keV

Raggi X diagnostici — radiologia medica

MeV

Fisica nucleare — decadimenti radioattivi

Relazione tra Campo e Potenziale

La relazione tra campo elettrico e potenziale è fondamentale: il campo è la **variazione spaziale** del potenziale. Si ricava dalla definizione stessa di ΔV :

$$\Delta V = - \int_{IN}^{FIN} \vec{E} \cdot d\vec{s}$$
$$[E] = \frac{N}{C} = \frac{V}{m}$$

Il campo si misura in **N/C** oppure, equivalentemente, in **V/m**.
Quest'ultima è spesso più pratica: il campo equivale alla caduta di potenziale per unità di lunghezza.

V → campo in C/m

Unità pratiche per circuiti

MV → campo in MV/m

Unità per alta tensione

Potenziale di una Carica Puntiforme

Calcoliamo il potenziale generato da una carica puntiforme q a distanza r , integrando il campo:

$$\Delta V = - \int \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} dr = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r} \Big|_N^{FIN}$$

$$\Delta V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} q \left[\frac{1}{r_{FIN}} - \frac{1}{r_N} \right]$$

In particolare, tra un punto a distanza infinita ($V=0$ per convenzione) e un punto a distanza R dalla carica:

$$\Delta V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R}$$



Il potenziale di una carica puntiforme decresce come $1/r$, non come $1/r^2$ come il campo elettrico.

Conservazione dell'Energia Meccanica

Poiché la forza di Coulomb è conservativa, vale la legge di conservazione dell'energia meccanica. Per una carica in moto:

$$K_{IN} + U_{IN} = K_{FIN} + U_{FIN}$$

$$\frac{1}{2}m(v_F^2 - v_{IN}^2) = q \Delta V$$

$$\Delta V = \frac{1}{2} \frac{m}{q} (v_F^2 - v_{IN}^2)$$

Questa relazione permette di ricavare la **velocità finale** di una particella carica dalla sola differenza di potenziale, senza dover calcolare la forza in ogni punto del percorso. È uno strumento potentissimo in fisica atomica e in acceleratori di particelle.

Esercizi

Esercizio # 1513

$$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} ; m = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\Delta V = 2 \cdot 10^4 \text{ V}$$

$$K = ?$$

- A) 2 KeV
- B) 20 KeV
- C) 200 KeV
- D) 2 MeV
- E) 20 MeV

Conservazione en. meccanica:

$$\Delta K = \Delta U$$

$$\frac{1}{2} m v_f^2 - \frac{1}{2} m v_i^2 = q \Delta V$$

$$\frac{1}{2} m v_f^2 = q \Delta V$$

$$1 \text{ eV} = |e| \cdot 1 \text{ V}$$

$$K = q \Delta V = (1,6 \cdot 10^{-19}) (2 \cdot 10^4)$$

$$K = (10^{-15} \cdot 3,2) \text{ J}$$

$$= (10^{-15} \cdot 3,2) \frac{1}{(1,6 \cdot 10^{-19})} \text{ eV}$$

$$[1 \text{ eV} = |e| \cdot 1 \text{ V}]$$

$$= \frac{3,2}{1,6} \cdot 2 \cdot \frac{10^{-15}}{10^{-19}} \cdot 10^4 \text{ eV}$$

$$= 2 \cdot 10^4 \text{ eV} = 2 \cdot 10^1 \cdot 10^3 \text{ eV}$$

$$K = 20 \text{ KeV}$$

B) ✓

Riepilogo della Lezione

1

Campo elettrico e linee di forza

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$$

Le linee sono tangenti al campo; la loro densità indica l'intensità.

2

Principio di sovrapposizione

$$\vec{E}_{tot} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_N$$

Somma vettoriale per componenti.

3

Carica in un campo uniforme

Forza costante e moto parabolico.

Applicazione: stampante ink-jet.

4

Energia potenziale elettrica

$$L = -\Delta U$$

$$U = k \frac{Qq_0}{r} \text{ (forza di Coulomb conservativa)}$$

5

Potenziale elettrico

$$V = \frac{U}{q}, \quad V = k \frac{Q}{r}$$

1 V = 1 J/C; 1 eV = 1.6×10^{-19} J; superfici equipotenziali.

6

Conservazione dell'energia meccanica

$$K_{IN} + U_{IN} = K_{FIN} + U_{FIN}$$

$$\frac{1}{2} m (v_F^2 - v_{IN}^2) = q \Delta V$$

Domande di Autovalutazione

1. Che cosa rappresentano le linee di forza e cosa indica la loro densità?
2. Come si calcola il campo elettrico totale generato da più cariche puntiformi? Perché occorre scomporre in componenti?
3. Che tipo di moto compie una carica che entra con velocità perpendicolare in un campo uniforme? Perché?
4. Perché il lavoro della forza di Coulomb si può scrivere come $L = -\Delta U$? Che cosa implica che sia una forza conservativa?
5. Che differenza c'è tra energia potenziale U e potenziale elettrico V ? Che cosa significa 1 eV e quanto vale in joule?
6. Una carica q parte da ferma e viene accelerata da una differenza di potenziale ΔV : come ricavi la velocità finale usando la conservazione dell'energia?