

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TERAMO

Fisica

Medicina Veterinaria — Semestre Aperto
2026

Prof. Francesco de Pasquale

Lezioni 52 e 53

Outline

Lezione 52

- Carica elettrica e interazioni: proprietà fondamentali della carica elettrica, unità di misura, conservazione della carica
- Interazione tra cariche puntiformi e legge di Coulomb.
- Esercizi

Lezione 53

- Definizione di campo elettrico e rappresentazione tramite linee di forza.
- Campo generato da una carica puntiforme o da una distribuzione di più cariche puntiformi.

Correzione esercizio proposto da studenti:

In un tratto orizzontale di arteria il sangue scorre lentamente con velocità media di 16 cm/s e un tratto di lunghezza interna di 4 mm. Nel punto più stretto della stenosi il raggio effettivo si riduce a 1 mm. Assumendo che la densità del sangue sia 1,06 g/cm³, qual è la caduta di pressione tra il tratto normale e quello stenotico?

- A. 256 mmHg
- B. 1,5 mmHg
- C. 6,1 mmHg
- D. 61,7 mmHg
- E. 25,9 mmHg

$$v_1 = 16 \text{ cm/s} = 16 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$$

$$z_{\text{int}} = 4 \text{ mm} = (4 \cdot 10^{-3}) \text{ m}$$

$$z_{\text{eff}} = 1 \text{ mm} = 10^{-3} \text{ m}$$

$$\rho = 1,06 \text{ g/cm}^3$$

$$= 1,06 \cdot 10^3 \text{ kg} / (10^{-6} \text{ m}^3)$$

$$\rho = 1,06 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$$

A) 256 mmHg

B) 1,5 mmHg

C) 6,1 ..

D) 61,4 mmHg

E) 25,8 mmHg

1) $Av = \text{const}$

2) $P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \cancel{\rho g h_1} =$

$= P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \cancel{\rho g h_2}$



$$h_1 = h_2$$

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

$$v_2 = \frac{A_1}{A_2} v_1$$

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

$$(P_1 - P_2) = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) = \frac{1}{2} \rho \left(\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 v_1^2 - v_1^2 \right)$$

$$= \frac{1}{2} \rho v_1^2 \left[\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1 \right]$$

$$= \frac{1}{2} (1,06 \cdot 10^3) (16^2 \cdot 10^{-4}) \left[\left(\frac{\pi (4 \cdot 10^{-3})^2}{\pi (10^{-3})^2} \right)^2 - 1 \right]$$

$$= \frac{1}{2} 1,06 \cdot 10^{-1} (256) \left[\frac{16 \cdot 10^{-6}}{10^{-6}} - 1 \right]$$

$$= \frac{1}{2} (1,06) (256) 10^{-1} [256 - 1]$$

$$= 128 \cdot 255 \cdot 10^{-1} = 32640 \cdot 10^{-1} = 3264 \text{ Pa}$$

$$\Delta P = 3264 \text{ Pa} = \frac{3264}{133} \text{ mmHg}$$

$$\approx 24,5 \text{ mmHg}$$

Cos'è la Carica Elettrica?

Definizione

La carica elettrica **Q** è una grandezza scalare che misura lo squilibrio tra particelle cariche positive e negative in un corpo. La sua unità di misura nel Sistema Internazionale è il **Coulomb (C)**.

Proprietà fondamentali

- È una proprietà intrinseca della materia
- Può essere positiva (eccesso di protoni) o negativa (eccesso di elettroni)
- È una grandezza scalare: $Q \neq 0$ se il corpo è carico
- Si misura in Coulomb: $[Q] = C$

Quantizzazione della Carica

La carica elettrica non può assumere valori arbitrari: è **quantizzata**, ovvero è sempre un multiplo intero di una carica elementare minima.

Carica elementare

La carica minima osservabile in natura:

$$|e| = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Carica totale

La carica totale di un corpo è sempre un multiplo intero di $|e|$:

$$Q_{\text{tot}} = N \cdot |e|$$

Esempio animale

Un gatto che striscia su una coperta accumula un numero intero di cariche elementari — non frazioni di elettrone!



Accumulo di Carica: i Capelli che si Rizzano

Quando un corpo accumula carica elettrica dello stesso segno, le parti cariche si respingono per effetto della **forza di Coulomb**.



Prima: capelli lisci e ordinati — carica neutra



Dopo: capelli in aria — carica accumulata

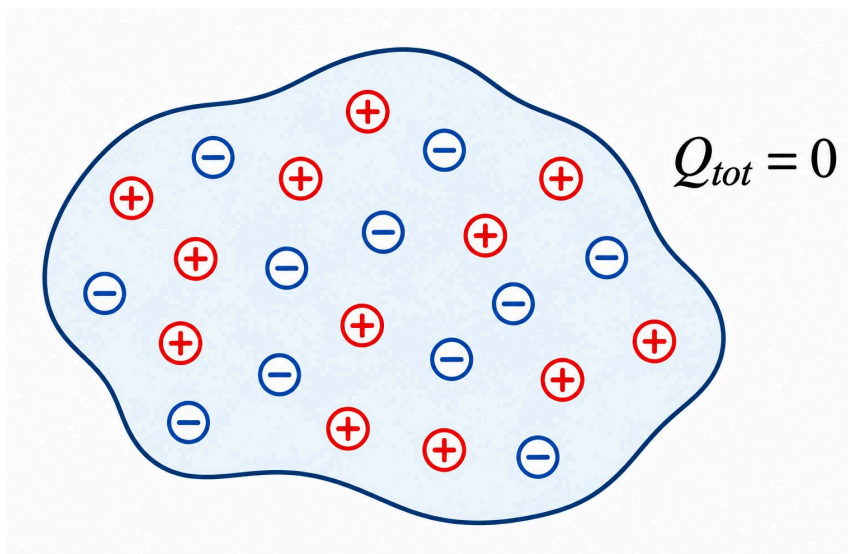
1 Accumulo di carica

La ragazza entra in contatto con un ambiente ricco di carica elettrica e i capelli accumulano carica dello stesso segno.

2 Repulsione di Coulomb

Ogni capello respinge gli altri con una forza repulsiva

Carica Totale di un Sistema



Somma algebrica delle cariche

La carica totale di un sistema è la **somma algebrica** di tutte le cariche presenti al suo interno:

$$Q_{\text{tot}} = q_1 \pm q_2 \pm q_3 \pm \cdots \pm q_n$$

- La carica può essere positiva ($q > 0$) o negativa ($q < 0$)
- In generale, un corpo neutro ha $Q_{\text{tot}} = 0$
- La condizione $\vec{F} = \vec{0}$ descrive l'equilibrio elettrostatico

Classificazione dei Materiali Elettrici

I materiali si classificano in base al loro comportamento nei confronti del movimento della carica elettrica: alcuni la trattengono, altri la lasciano fluire liberamente.

1

Isolanti

Oppongono grande resistenza al movimento di cariche. La carica si **accumula**.

Esempi: plastiche, ceramici, gomma, aria.

2

Conduttori

Oppongono scarsa resistenza: la carica **fluisce** facilmente.

Esempi: metalli, rame, oro, acqua.

3

Semiconduttori

Comportamento intermedio dipendente dalla temperatura T .

Esempio: silicio (usato nei circuiti elettronici).

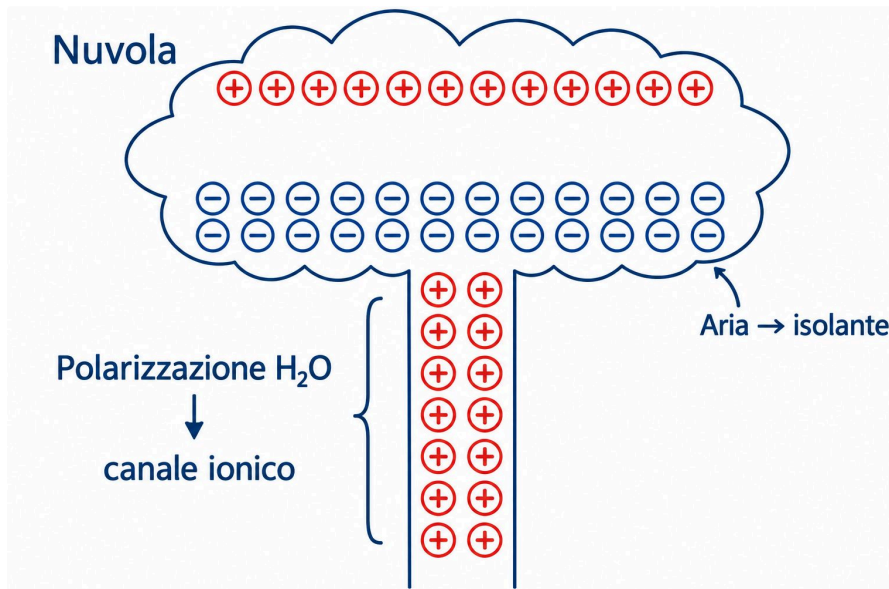
4

Superconduttori

Resistenza nulla al passaggio di carica. Si manifestano a temperature vicine allo zero assoluto ($T \approx 0\text{ K}$).

Il Fulmine

Un esempio straordinario di transizione isolante→conduttore è il **fulmine**. L'aria normalmente è un ottimo isolante, ma in presenza di un campo elettrico molto intenso diventa conduttrice.

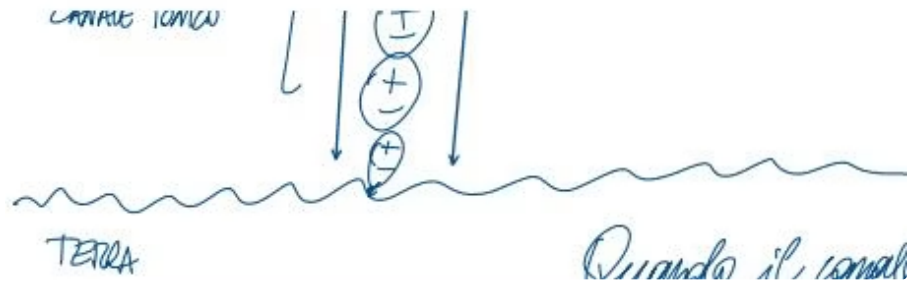


Separazione di cariche nella nuvola

- La parte superiore della nuvola si carica positivamente
- La parte inferiore si carica negativamente
- L'aria tra nuvola e terra si polarizza grazie all'acqua (H₂O)
- Si forma un **canale ionico** che diventa conduttore

❏ Negli animali al pascolo durante i temporali, il rischio di fulminazione è reale: le zampe a terra creano un circuito preferenziale.

Il Canale Ionico



Quando il canale raggiunge terra

Il canale di ionizzazione diventa un **filo conduttore** che collega nuvola e terra, scaricando tutta la carica accumulata. Questo produce due fenomeni osservabili:

Luce

Emissione visibile (colore violetto). Si propaga alla velocità della luce:

$$v_{\text{luce}} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Suono

Onde di pressione sonore (tuono). Si propagano a:

$$v_{\text{suono}} = 343 \text{ m/s}$$

La differenza è di **6 ordini di grandezza**: per questo vediamo prima il lampo e sentiamo poi il tuono.

Luce vs. Suono: 6 Ordini di Grandezza

$$3 \times 10^8$$

m/s — Luce

Velocità di propagazione della luce nel
vuoto

$$3 \times 10^2$$

m/s — Suono

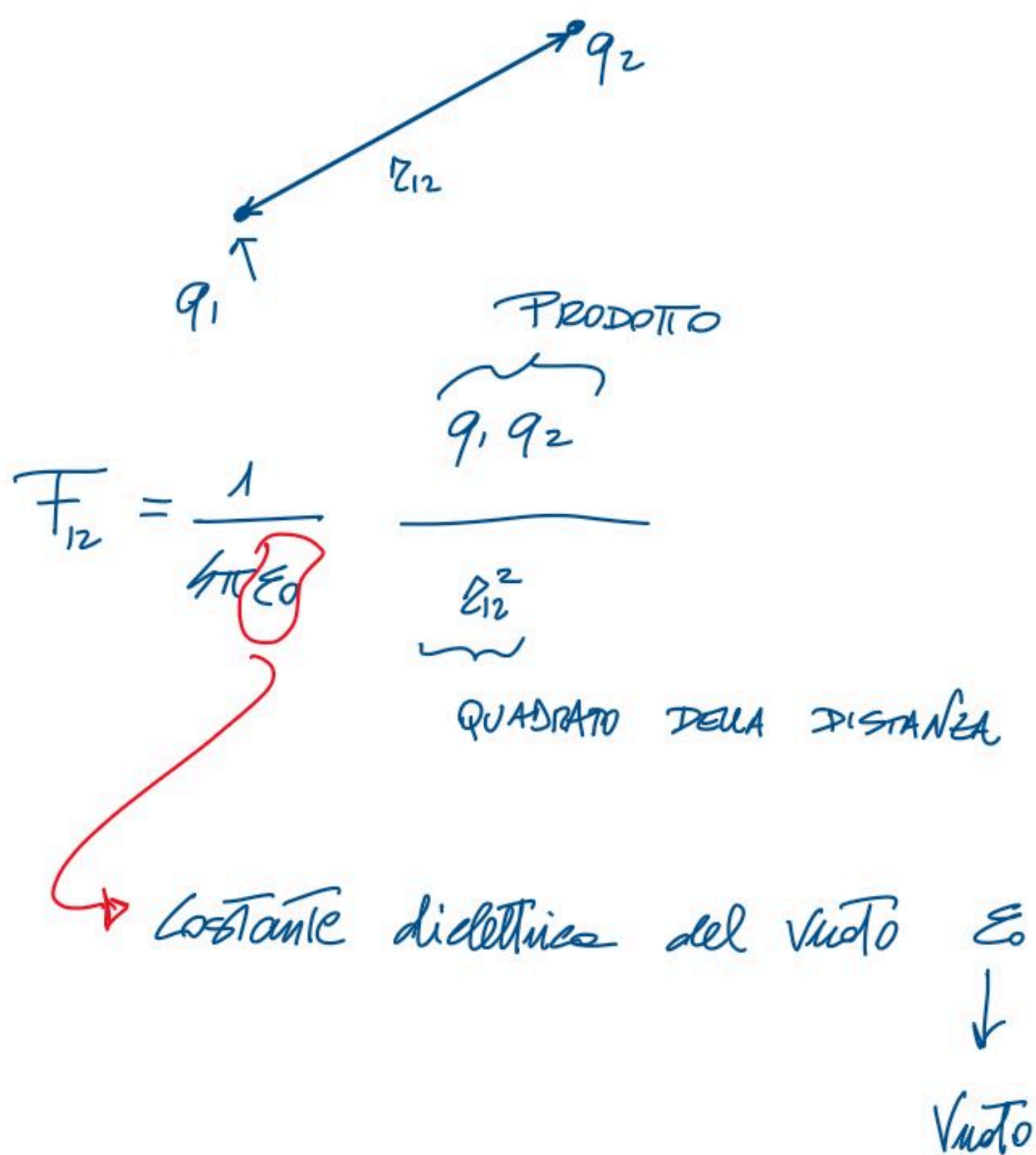
Velocità del suono nell'aria a temperatura
ambiente

Contando i secondi tra lampo e tuono (circa 3 s = 1 km), i veterinari sul campo possono stimare la distanza di un temporale per valutare il rischio per gli animali al pascolo.



Forza di Coulomb

Carica puntiforme: $V=S=0$ • $q \neq 0$



$$F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2}$$

PRODOTTO $q_1 q_2$

QUADRATO DELLA DISTANZA r_{12}^2

Costante dielettrica del vuoto ϵ_0
 $\downarrow$
 Vuoto

Se il mezzo $\neq$ vuoto

$$\epsilon_0 \rightarrow \epsilon_0 \epsilon_r$$

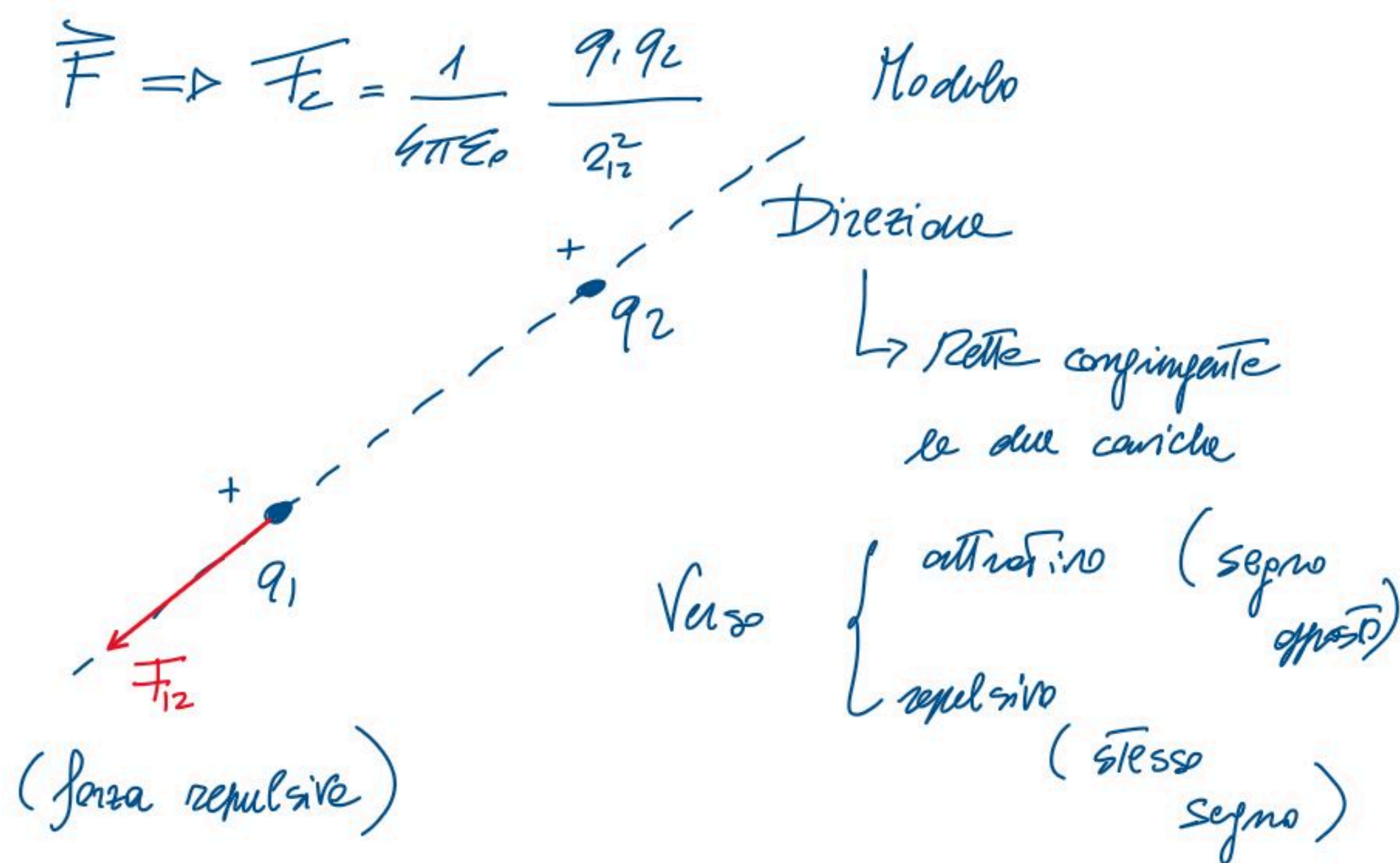
$\uparrow$
 costante dielettrica
 relativa

$\vec{F} \Rightarrow F_c = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2}$

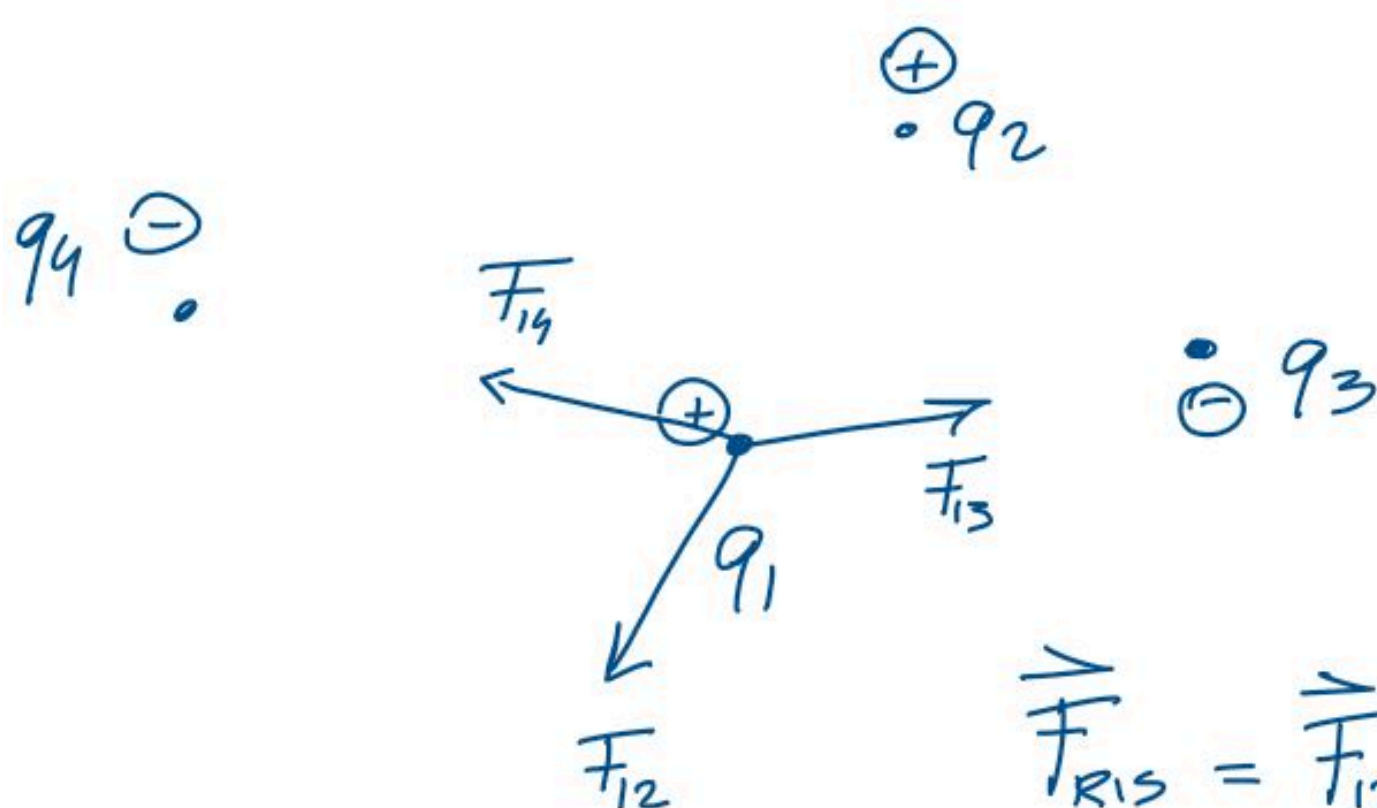
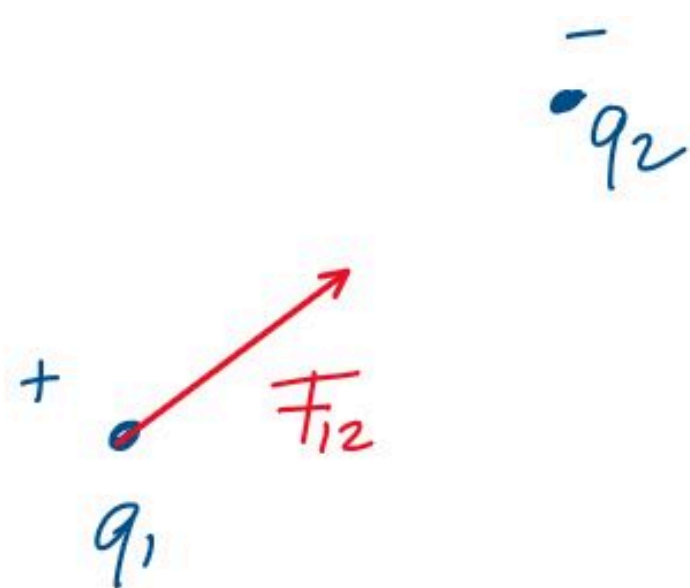
Modulo

Direzione $\rightarrow$ Retta congiungente le due cariche

Verso $\left\{ \begin{array}{l} \text{attrattivo (segno opposto)} \\ \text{repulsivo (stesso segno)} \end{array} \right.$



(forza repulsiva)



$$\vec{F}_{R15} = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \vec{F}_{14}$$

$$F_{R15} = \begin{cases} F_{R15,x} = F_{12,x} + F_{13,x} + F_{14,x} \\ F_{R15,y} = F_{12,y} + F_{13,y} + F_{14,y} \end{cases}$$

La Forza di Coulomb

Il modulo della forza che due cariche puntiformi esercitano l'una sull'altra è:

$$F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2}$$

- $F_{12} \propto q_1 q_2$ — proporzionale al prodotto delle cariche
- $F_{12} \propto \frac{1}{r^2}$ — inversamente proporzionale al quadrato della distanza
- $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ — costante dielettrica del vuoto

La Costante Dielettrica e il Mezzo

La forza di Coulomb dipende dal mezzo nel quale avviene l'interazione tra le cariche. Nel vuoto si usa ϵ_0 , in un altro materiale si introduce la **costante dielettrica relativa** ϵ_r .

Nel vuoto

$$F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2}$$

In un mezzo

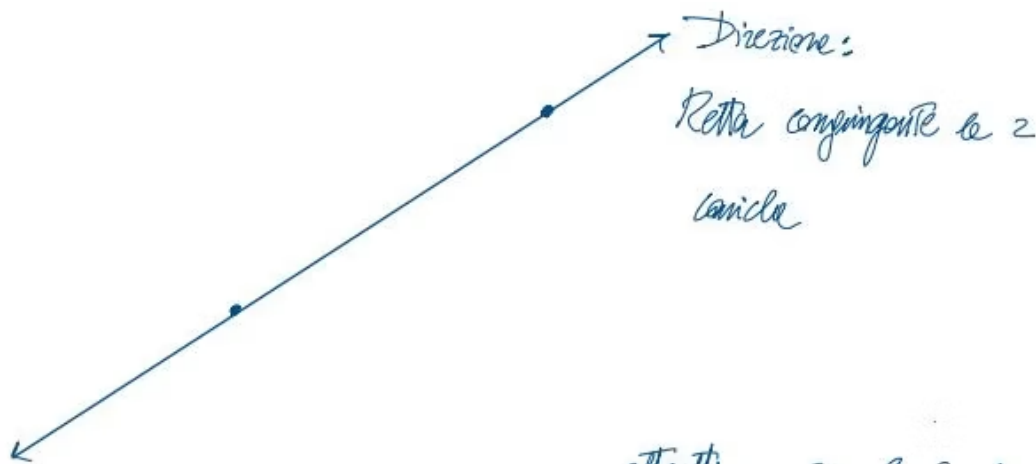
$$F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2}$$

Effetto del mezzo

Un mezzo con $\epsilon_r > 1$ **riduce** la forza elettrostatica. L'acqua ha $\epsilon_r \approx 80$: importantissimo in biologia!

📌 In fisiologia, le interazioni elettrostatiche tra ioni avvengono in soluzione acquosa: la costante dielettrica dell'acqua riduce drasticamente la forza di Coulomb rispetto al vuoto.

Direzione e Verso della Forza di Coulomb



La forza è vettoriale

La forza di Coulomb ha tre caratteristiche vettoriali:

- **Modulo:** calcolato con la legge di Coulomb $\checkmark$
- **Direzione:** lungo la retta congiungente le due cariche
- **Verso:** dipende dal segno delle cariche

↔ Repulsiva

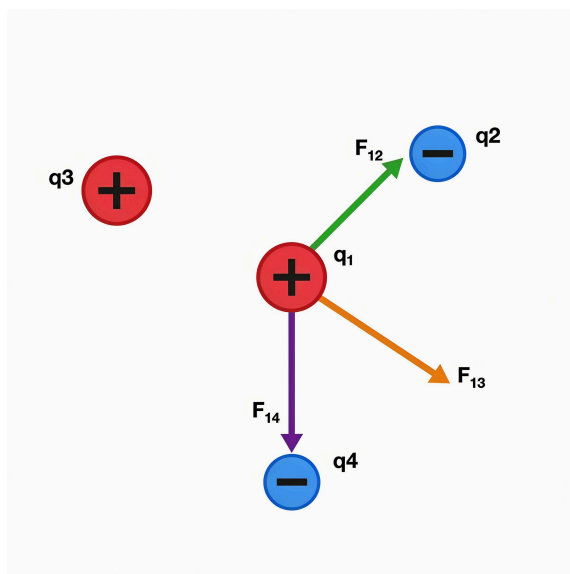
Cariche dello **stesso segno**
si respingono

↔ Attrattiva

Cariche di **segno opposto** si
attraggono

Principio di Sovrapposizione

Quando una carica q_1 è soggetta all'azione di più cariche contemporaneamente, la forza risultante è la **somma vettoriale** di tutte le forze individuali. Questo è il principio di sovrapposizione.

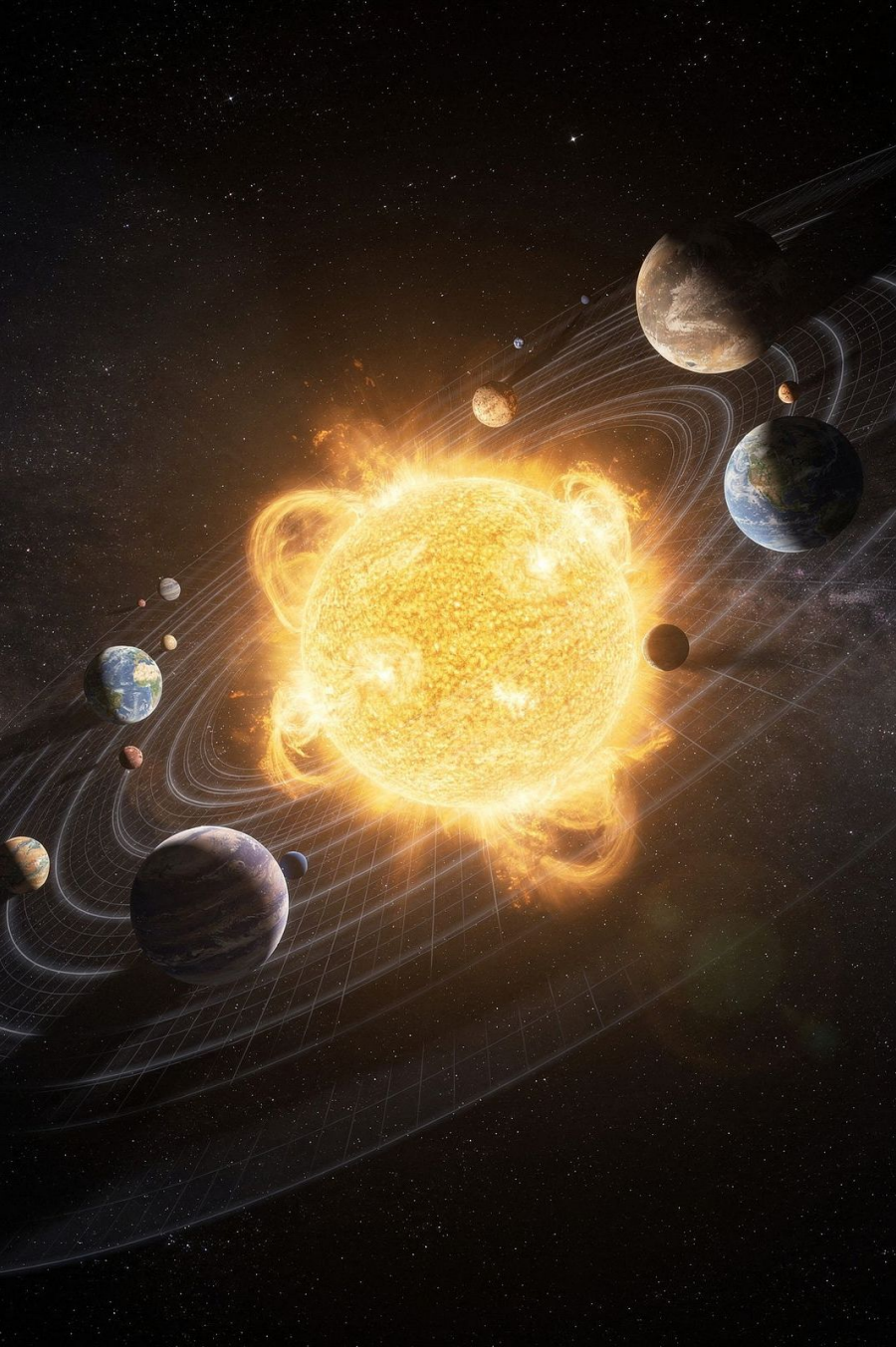


$$\vec{F}_{\text{RIS}} = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \vec{F}_{14}$$

Per calcolare la forza risultante, si scompone ogni forza nelle sue componenti cartesiane:

$$\begin{cases} F_{\text{RIS},x} = F_{12x} + F_{13x} + F_{14x} \\ F_{\text{RIS},y} = F_{12y} + F_{13y} + F_{14y} \end{cases}$$

Come in meccanica classica, si lavora componente per componente e poi si ricostruisce il vettore risultante.



Forza Elettrostatica vs. Forza Gravitazionale

Analogie e Differenze

Forza Gravitazionale

$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{r_{12}^2}$$

- Le masse sono sempre $m > 0$
- È **sempre attrattiva**
- È conservativa → energia potenziale ΔU_g

Forza Elettrostatica

$$F_e = K \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2}$$

- Le cariche possono essere $q > 0$ o $q < 0$
- Può essere **attrattiva o repulsiva**
- È conservativa → energia potenziale ΔU_e

Entrambe le forze sono **conservative**: il lavoro dipende solo dalla posizione iniziale e finale, non dal percorso seguito.

Forze Conservative ed Energia Potenziale

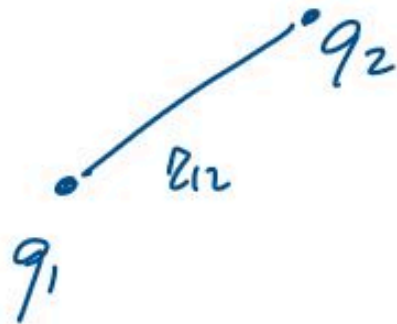
Come la forza gravitazionale è associata a un'energia potenziale gravitazionale, così la forza elettrostatica è associata a un'**energia potenziale elettrica** ΔU_e . Questo concetto è fondamentale per comprendere il potenziale elettrico nelle membrane cellulari degli animali.

Esercizi (Tommasi)

Esercizio # 1458

q_1 q_2

F



$$F' = 2F$$

A) $q_1/2$ q_2

B) $2q_1$ q_2 ←

C) $q_1/2$ $q_2/2$

D) $2q_1$ $q_2/2$

E) $2q_1$ $2q_2$

$$F' = 2F = 2 \cdot \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r_{12}^2} 2q_1 q_2$$

B) ✓

Esercizio # 1469

$$F = 1280 \text{ N}$$

vuoto

$$(\epsilon_2 = 80)$$

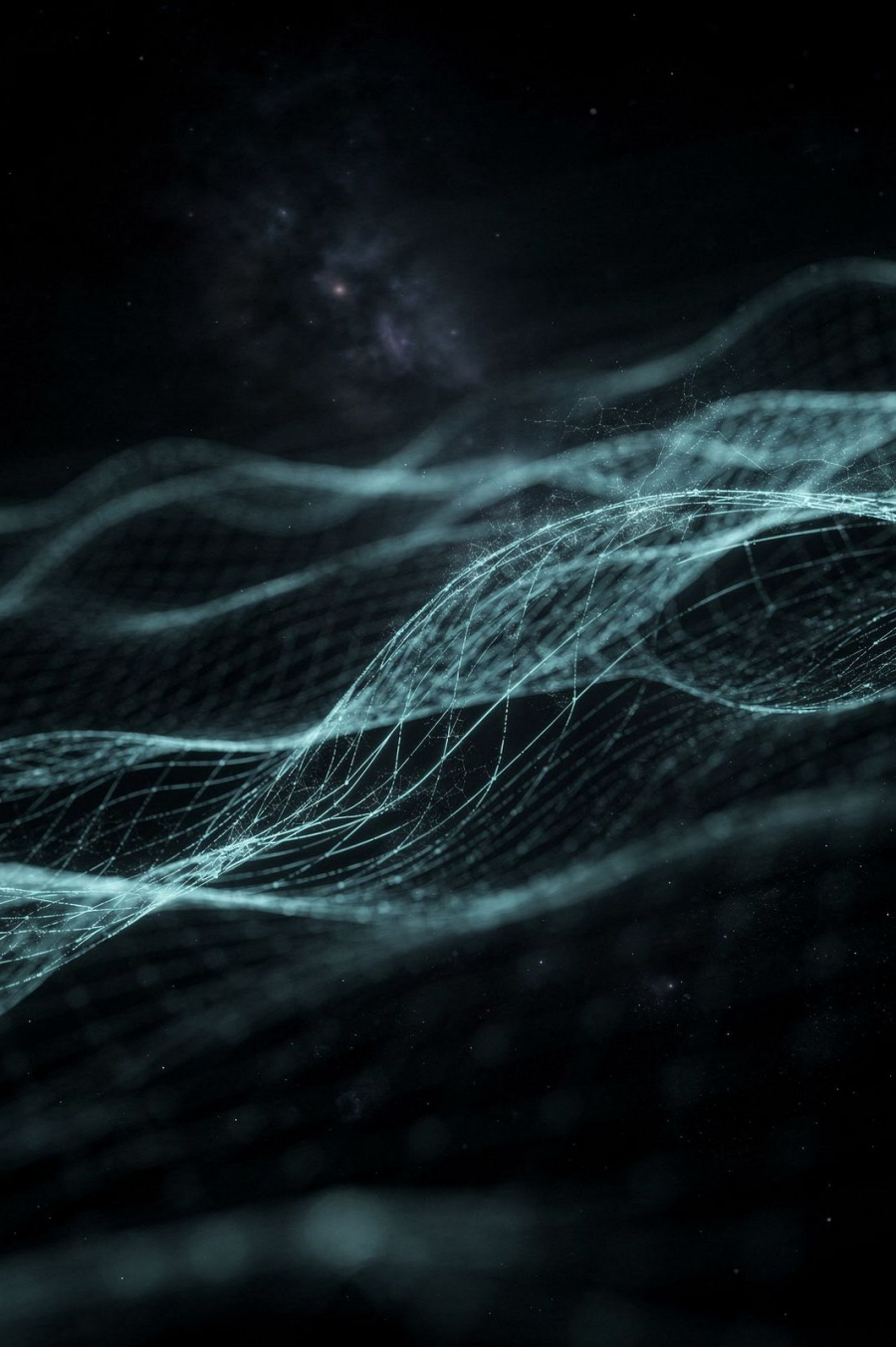
- A) 640 N
- B) 320 N
- C) 160 N
- D) 64 N
- E) 16 N ✓

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

nel vuoto

$$F_{H_2O} = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_2} \frac{q_1 q_2}{r^2} \right) = \frac{F}{\epsilon_2} = \frac{1280}{80}$$

$$F_{H_2O} = 16 \text{ N} \quad \text{E) } \checkmark$$



Il Campo Elettrico

Il concetto di **campo elettrico** descrive la *deformazione dello spazio* causata dalla presenza di una carica elettrica. Analogamente al campo gravitazionale, anche il campo elettrico $\vec{E}$ permea lo spazio attorno a ogni carica e agisce su qualsiasi altra carica venga introdotta in quella regione.

Definizione di Campo Elettrico

Definizione formale

Il campo elettrico è la **forza elettrostatica per unità di carica**:

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

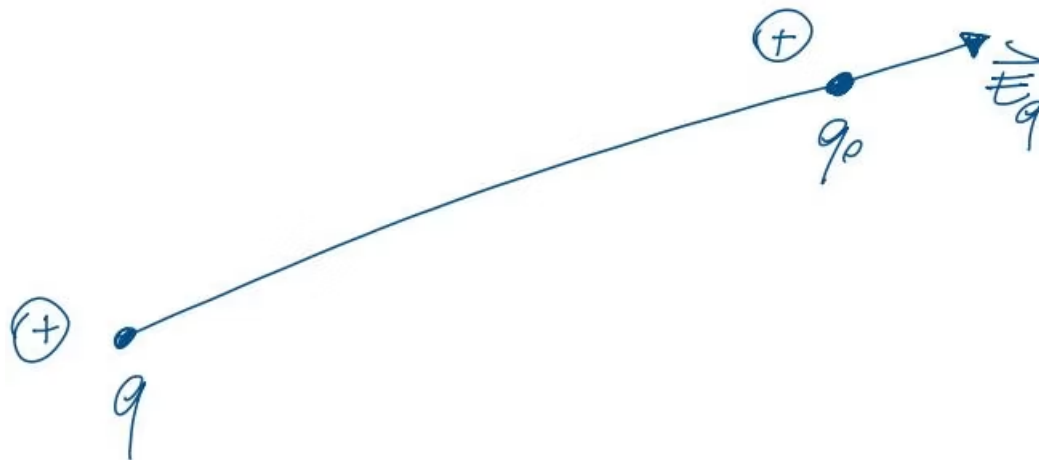
La sua unità di misura è:

$$[\vec{E}] = \frac{N}{C} = \frac{V}{m}$$

$\vec{E}$ è una grandezza **vettoriale**: ha modulo, direzione e verso. È definito in ogni punto dello spazio attorno a una carica.

Campo Elettrico di una Carica Puntiforme

Per determinare il campo elettrico generato da una carica q , si introduce una piccola **carica di prova** $q_0 \ll q$ che non perturba il campo originale.



Derivazione

$$E_q = \frac{F}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q \cdot q_0}{r^2} \cdot \frac{1}{q_0}$$

La q_0 si cancella, e il risultato è:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$$

Il modulo del campo dipende solo dalla carica sorgente q e dalla distanza r , non dalla carica di prova.

La Carica di Prova



Perché serve $q_0 \ll q$?

Se q_0 fosse grande, genererebbe un campo proprio significativo che altererebbe il campo che vogliamo misurare. La carica di prova deve essere abbastanza piccola da non influenzare la sorgente.



Campo totale

Se $q_0 \ll q$, allora $\vec{E}_{q_0} \ll \vec{E}_q$ e il contributo di q_0 al campo totale è trascurabile: $\vec{E}_{\text{tot}} \approx \vec{E}_q$.



In biologia

Gli ioni che attraversano i canali ionici nelle membrane cellulari sperimentano il campo elettrico generato dalle cariche sulla membrana stessa — lo stesso principio.

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.

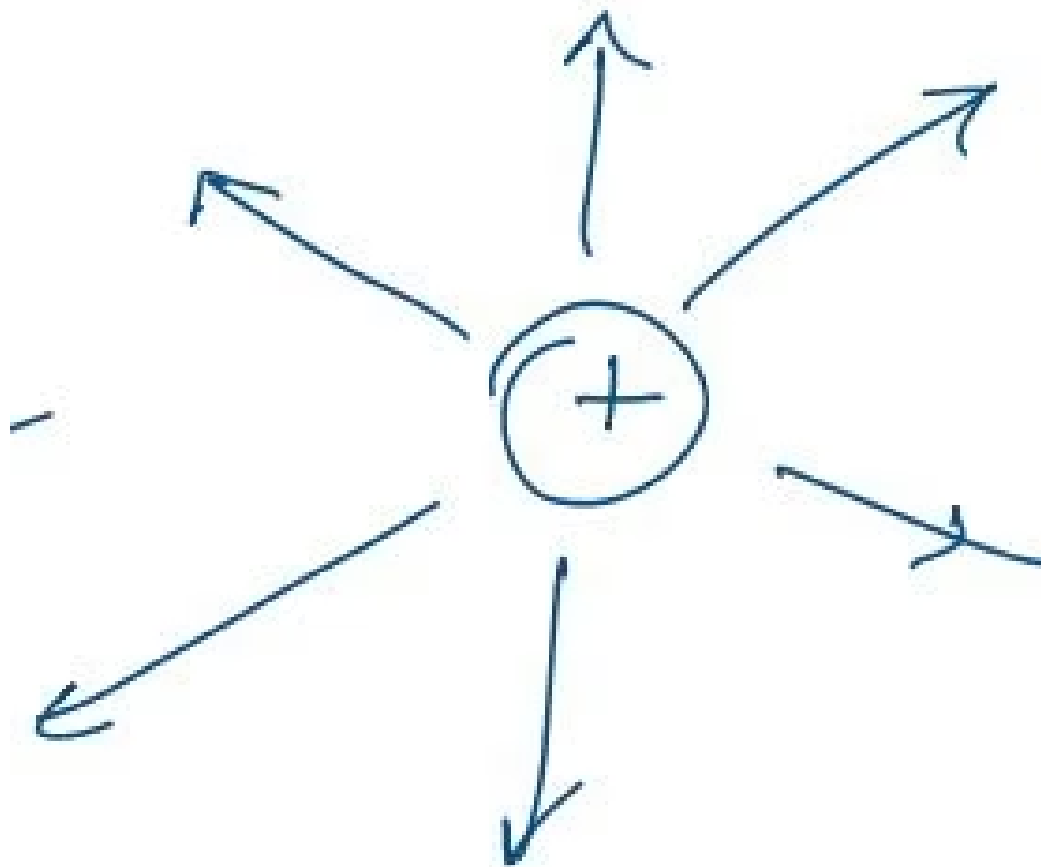
Regola 2 — Tangente

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

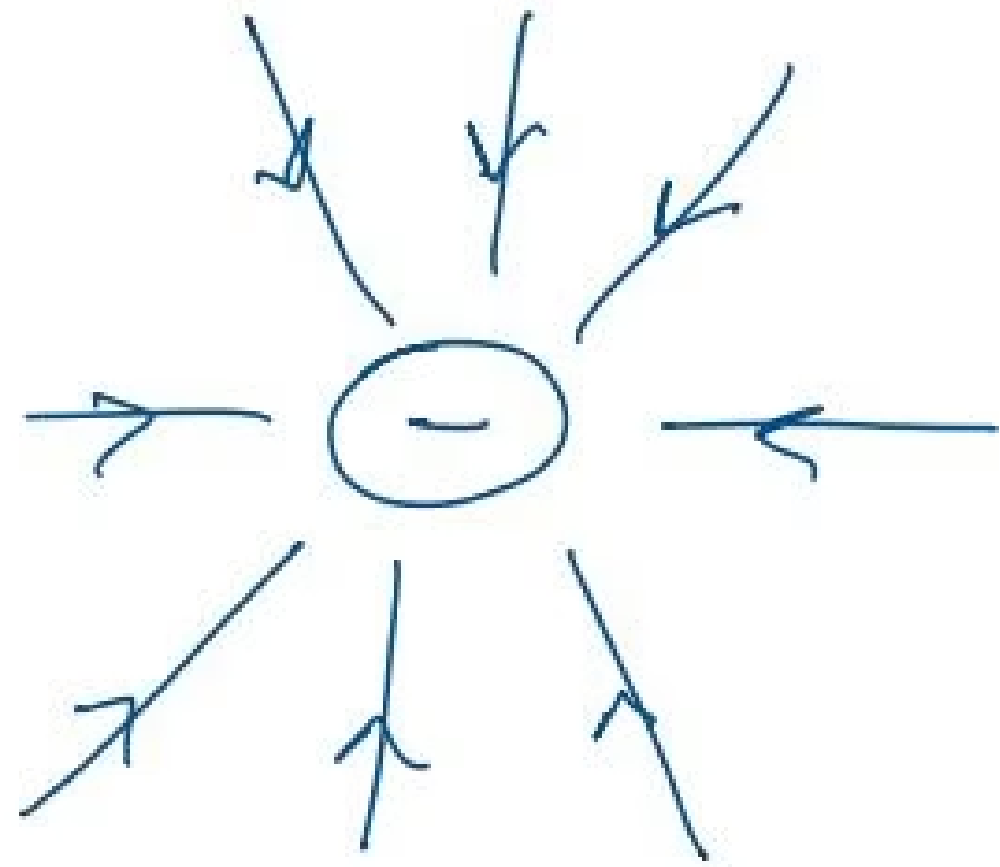
Due linee di forza **non possono mai incrociarsi**: in ogni punto dello spazio il campo ha una direzione univoca. Se si incrociassero, ci sarebbero due direzioni nel medesimo punto — impossibile.

Linee di Forza: Carica Positiva e Negativa



Carica positiva (+)

Le linee escono radialmente verso l'esterno.

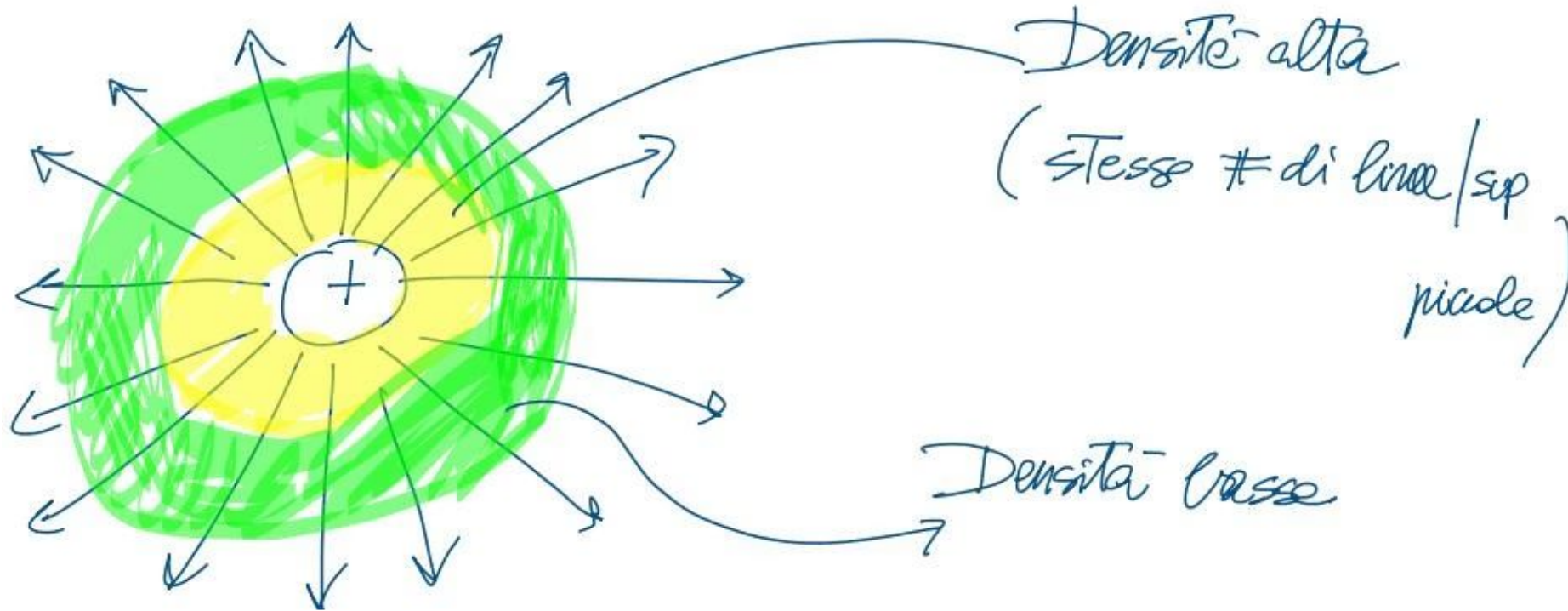


Carica negativa (-)

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.

Riepilogo: Proprietà della Carica Elettrica



Origine

La carica è legata alla presenza di elettroni (e^-) e protoni (p^+) — particelle elementari cariche presenti in ogni atomo.



Unità

Si misura in Coulomb (C). La carica elementare è $|e| = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.



Quantizzazione

La carica è sempre un multiplo intero di $|e|$: non esistono frazioni di carica elementare in natura.



Conservazione

In un sistema isolato, la carica totale si conserva: non può essere creata né distrutta, solo trasferita tra corpi.

Riepilogo: Legge di Coulomb

Formula completa

$$F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2}$$

Con $\epsilon_r = 1$ nel vuoto.

Interpretazione vettoriale

- **Modulo:** proporzionale al prodotto delle cariche, inversamente proporzionale a r^2
- **Direzione:** retta congiungente le due cariche
- **Verso:** attrattivo (segni opposti) o repulsivo (stesso segno)
- **Mezzo:** la forza si riduce di un fattore ϵ_r in un dielettrico

Elettricità nei Sistemi Biologici Animal



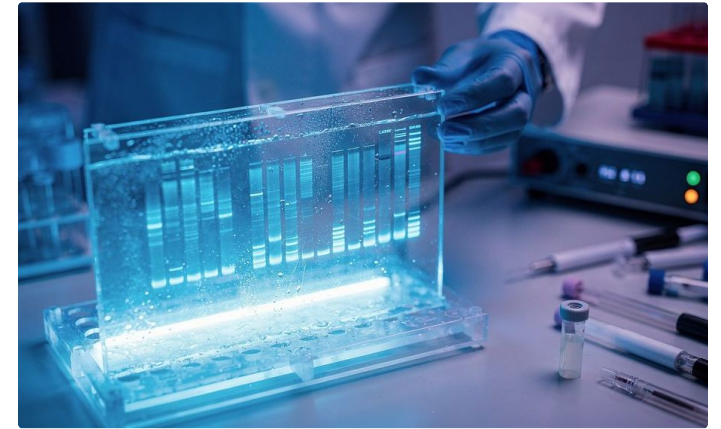
Elettrocardiogramma (ECG)

Misura le differenze di potenziale elettrico generate dalla carica ionica nel cuore. Utilizzato in veterinaria per diagnosticare aritmie nei cani, gatti e cavalli.



Potenziali d'Azione

I neuroni trasmettono segnali attraverso variazioni di campo elettrico generate da ioni Na^+ e K^+ attraverso le membrane — forza di Coulomb in azione biologica.



Elettroforesi

Le molecole cariche (proteine, DNA) migrano in un campo elettrico esterno con velocità proporzionale alla carica. Tecnica fondamentale in diagnostica veterinaria molecolare.

L'Acqua come Dielettrico Biologico



Perché $\epsilon_r = 80$ è cruciale?

L'acqua ha una costante dielettrica molto elevata ($\epsilon_r \approx 80$) perché è una molecola **dipolo**: i legami O–H sono polari e si orientano nel campo elettrico.

Effetti biologici:

- Gli ioni in soluzione acquosa interagiscono molto meno rispetto al vuoto
- Le proteine possono mantenere strutture cariche stabili in soluzione
- Le membrane cellulari sfruttano questo effetto per controllare i flussi ionici

Perché l'acqua ha una costante dielettrica così elevata?

La costante dielettrica relativa dell'acqua è $\epsilon_r \approx 80$ a temperatura ambiente.

- **Polarità molecolare:** le molecole d'acqua sono dipoli elettrici, con una parziale carica negativa sull'ossigeno e una parziale carica positiva sugli idrogeni.
- **Polarizzazione:** in presenza di un campo elettrico, le molecole si orientano e generano un campo che si oppone parzialmente a quello applicato.
- **Riduzione della forza elettrica:** a parità di cariche e distanza, nel modello di un mezzo dielettrico uniforme, la forza di Coulomb è circa **80 volte più debole** rispetto al vuoto.

Conseguenza: l'acqua favorisce la separazione degli ioni e la dissoluzione di molti sali, svolgendo un ruolo fondamentale nei processi chimici e biologici.

Il Fulmine e la Sicurezza degli Animali

⚡ Rischio per animali al pascolo

Il canale ionico del fulmine percorre il suolo (*tensione di passo*): animali con quattro zampe distanziate sono più a rischio perché la differenza di potenziale tra zampe anteriori e posteriori può causare correnti letali nel corpo.

Stima della distanza

Usando la differenza di velocità tra luce e suono:

$$d \approx \frac{v_{\text{suono}} \cdot \Delta t}{1000} \text{ km}$$

Ogni 3 secondi di ritardo tra lampo e tuono corrispondono a circa 1 km di distanza dal fulmine.

Riepilogo della Lezione

1. Carica elettrica

- Grandezza scalare, unità: C
- Quantizzata e conservata
- Isolanti e conduttori

2. Legge di Coulomb

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

- Forza vettoriale, attrattiva o repulsiva
- Principio di sovrapposizione
- Analoga alla gravitazionale, ma con cariche di segno opposto

3. Campo elettrico

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

- Unità: N/C = V/m
- Misurato con una carica di prova
- Campo di una carica puntiforme

4. Linee di forza

- Escono dalle cariche positive, entrano in quelle negative
- Densità proporzionale all'intensità del campo
- Dipolo elettrico

5. Applicazioni biologiche

- Costante dielettrica dell'acqua: $\epsilon_r \approx 80$
- Fulmine e tensione di passo
- Rischio per animali al pascolo

Domande di Autovalutazione

1. Cos'è la carica elettrica e quali sono le sue unità di misura? Spiega i concetti di quantizzazione e conservazione della carica.
2. Qual è la principale differenza tra un materiale isolante e un conduttore in termini di movimento delle cariche elettriche?
3. Enuncia la Legge di Coulomb e scrivi la sua formula. Qual è il ruolo della costante dielettrica relativa ϵ_r in questa legge?
4. Indica le principali analogie e differenze tra la forza elettrostatica e la forza gravitazionale.
5. Definisci il campo elettrico e indica la sua unità di misura nel Sistema Internazionale.
6. Come si interpretano le linee di forza per un dipolo elettrico e per due cariche dello stesso segno? Quali informazioni ci forniscono sulla direzione e intensità del campo?
7. Perché l'acqua ha una costante dielettrica relativa (ϵ_r) così elevata e quali sono le implicazioni biologiche di questa proprietà?
8. Descrivi il metodo per stimare la distanza di un fulmine basandosi sul ritardo tra il lampo e il tuono.