

Fenomeni elettrici

parte A

Corso di Fisica
A.A. 2024-2025



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

1

Sommario

- Introduzione storica ai fenomeni elettrici
- Forze presenti in natura
- Struttura della materia
- Fenomeni di elettrizzazione
 - strofinio
 - induzione
 - contatto
- Carica elettrica e Forza elettrostatica
- Legge di Coulomb
- Rappresentazione attraverso linee di forza



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

2

Sommario

- Campo elettrostatico
- Rappresentazione tramite linee di campo
- Distribuzione continua di carica elettrostatica
- Conservatività del campo elettrostatico
- Energia potenziale elettrostatica
- Potenziale elettrostatico
- Relazione tra campo e potenziale elettrostatico



Introduzione



Introduzione

- Gli organismi viventi, tramite l'utilizzo di fenomeni elettrici, svolgono molteplici attività:
 - esecuzione di azioni meccaniche (contrazione muscolare)
 - la trasmissione di stimoli e di comandi di varia natura (organi di senso, attività cerebrale).
- Analizziamo i principi base di tali attività, in relazione ai sistemi biologici, in termini di
 - *cariche elettriche ferme* (elettrostatica)
 - *cariche in moto stazionario* (correnti elettriche continue)



Fenomeni elettrici



Fenomeni elettrici

- Si presentano in natura con una straordinaria varietà e complessità di manifestazioni.

Prime osservazioni fenomenologiche	(Talete, VI secolo a.C.)
Formalizzazione teorica	(Maxwell & Faraday 1865)
Estensione relativistica	(Einstein, 1905)
Estensione quantistica	(Dirac)

in totale circa 25 secoli

- L'elettromagnetismo rappresenta nel suo insieme, uno dei massimi raggiungimenti della mente umana:
 - teoria di meravigliosa eleganza,
 - caratterizzata da grande forza di sintesi e
 - caratterizzata da grande capacità di predizione



Approccio didattico

- Approccio caratteristico del metodo scientifico, ripercorre i passi storici procedendo attraverso schematizzazioni:
 - partenza dalla situazione di massima semplicità (oggetti fermi e puntiformi nel vuoto)
 - introduzione graduale di successive complicazioni (*dimensioni finite, moto, materia*)
- La descrizione che verrà fatta è quella “*classica*”; essa precede storicamente le evoluzioni del 1900 riguardanti la meccanica quantistica e la teoria della relatività.
- Vale la pena di notare che
 - la *teoria della relatività ristretta* risulta perfettamente compatibile con l'elettromagnetismo classico,
 - la *meccanica quantistica* comincia ad imporre ad esso delle modifiche significative solo a distanze inferiori alle dimensioni atomiche.



Forze in natura



Forze in natura

- **Forze di contatto** (attrito, forze elastiche, pressione)
- **Azione a distanza**
 - **Interazione gravitazionale**
 - responsabile di gran parte dei fenomeni che si osservano su scala macroscopica
 - Legge di Newton (*sempre attrattiva*)

$$\left| \vec{F}_g \right| = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad \gamma = 6.67 \times 10^{-11} \left[\frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2} \right]$$

- **Azione elettrica**
 - può essere sia *attrattiva* che *repulsiva*



Particelle elementari

Diagram illustrating the hierarchy of matter and the Standard Model of particle physics.

The hierarchy shows the progression from a hand holding a marble (Materia) to a crystal lattice (Materia), an atom (Materia), a nucleus (Materia), and a molecule (Materia).

The Standard Model is divided into three main sections:

- INTERAZIONI:** Includes gravitazionale, elettromagnetica, gluoni, and gravitazionale.
- MATERIA:** Divided into **QUARK** (up, down, charm, strange, top, bottom) and **LEPTONI** (neutrino ν_e , neutrino ν_μ , neutrino ν_τ , elettrone e^- , muone μ^- , tau τ^-).
- più le rispettive antiparticelle**

Arrows indicate the formation of composite particles from quarks and leptons:

- neutrone** (composed of two down quarks and one up quark)
- protone** (composed of two up quarks and one down quark)
- mesone π^+** (composed of an up quark and an anti-down quark)
- mesone π^-** (composed of a down quark and an anti-up quark)

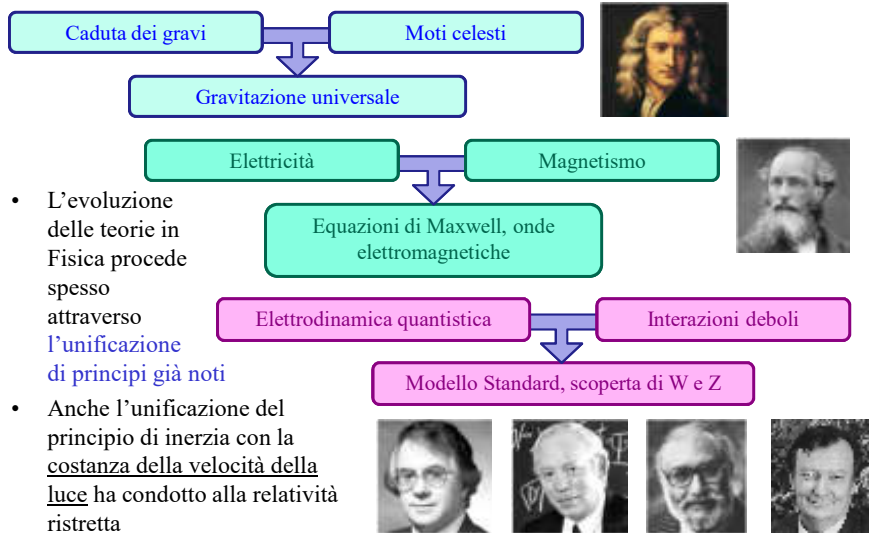
Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

Forme di interazioni a distanza

	Raggio di azione	Agisce su ...	Portatore
Gravitazionale	∞	Sulla materia	?
Elettromagnetica responsabile della coesione tra gli elettroni e il nucleo negli atomi	∞	su $\left\{ \begin{array}{l} \text{cariche} \\ \text{correnti} \end{array} \right.$	fotone
Nucleare forte impedisce al nucleo di disintegrarsi	10^{-15} m (raggio del protone) (10^{-23} sec)	adroni $\left\{ \begin{array}{l} \text{barioni} \\ \text{mesoni} \end{array} \right.$	gluoni
Nucleare debole responsabile della trasformazione della materia (es. radioattività) (decadimento di quark e leptoni) $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$	$< 10^{-15} \text{ m}$	leptoni	W^+, W^-, Z^0

Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

Unificazione di alcune forze



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

18

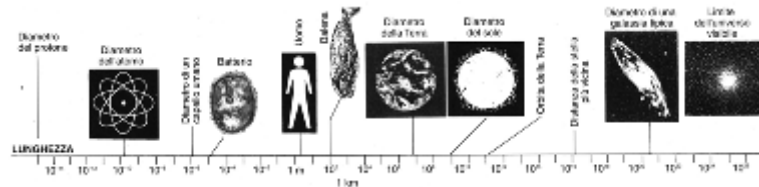
Struttura della materia



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

19

Struttura elettrica della materia (1)



Materia $\left\{ \begin{array}{l} \text{Universo} \\ \text{Parte più piccola che potete pensare} \end{array} \right.$

$$m_p = 1.6725 \times 10^{-27} \text{ kg} \quad [\varphi \approx 10^{-15} \text{ m}]$$

$$m_n = 1.6748 \times 10^{-27} \text{ kg} \quad [\varphi \approx 10^{-15} \text{ m}] \quad (\text{femtometri})$$

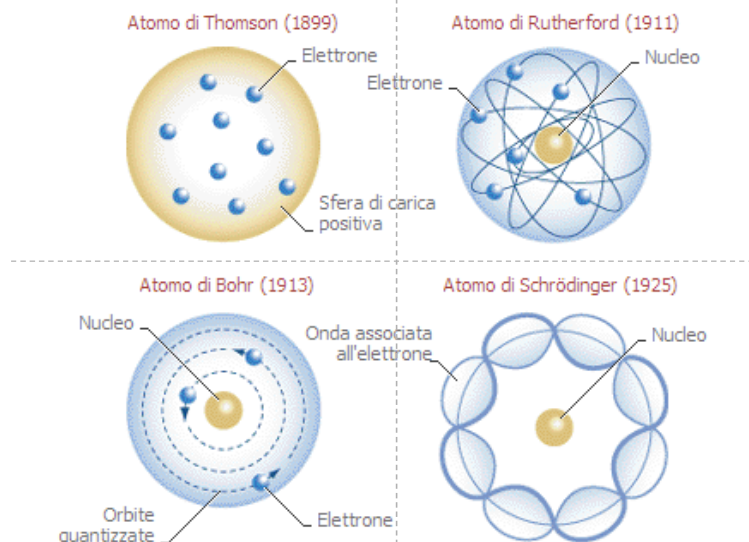
$$m_e = \frac{m_p}{1840} = 9.1091 \times 10^{-31} \text{ kg} [\text{puntiforme}]$$



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

20

Evoluzione del modello atomico



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

22

Struttura elettrica della materia (3)

Composizione dell'atomo

- Protoni e neutroni formano il NUCLEO
 - N = numero di massa (numero dei nucleoni)
 - Z = numero atomico (numero protoni o elettroni)

Specie atomiche: Z varia

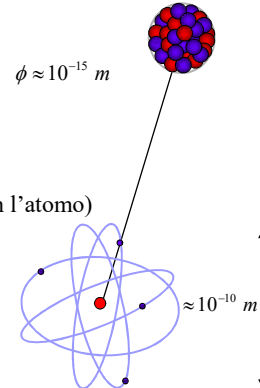
- Z condiziona le proprietà chimiche della materia
- Altre proprietà (dipendenti dal legame dell'elettrone con l'atomo)
 - Isolanti
 - Conduttori

Isotopi:

- Z =cost, N varia

Proprietà dell'atomo

- L'atomo è normalmente “**elettricamente neutro**”
- Vale il **Principio di conservazione della carica**
 - “*In un sistema elettricamente isolato, la somma algebrica di tutte le cariche resta costante nel tempo ovvero si conserva*”



Fenomeni di elettrizzazione

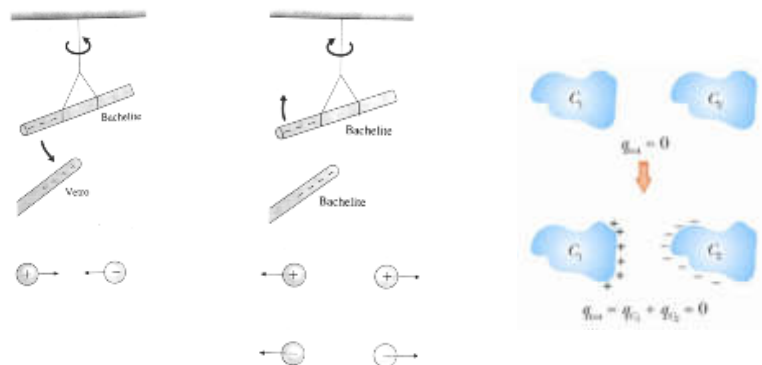


Fenomeni di elettrizzazione

- Osserviamo in natura tre fenomeni di elettrizzazione:
 - per *strofinio*
 - per *induzione*
 - per *contatto*



Carica elettrica



- Per interpretare questo fenomeno è necessario attribuire alla materia una proprietà fondamentale, *in analogia a quanto è stato fatto per la massa*, chiamata **carica elettrica**, la quale può presentarsi sotto due aspetti distinti definiti positivo o negativo per convenzione.



Elettrizzazione per strofinio (1)

- I corpi che si caricano per strofinio sono detti **isolanti**, in quanto capaci di trattenere la carica elettrica mentre altri, come ad esempio i metalli ed il corpo umano stesso, non trattengono la carica e sono detti **conduttori**.
- Il metodo dell'elettrizzazione per strofinio può essere applicato sistematicamente a un gran numero di materiali isolanti, tra cui i materiali sintetici attualmente disponibili (*bakelite*, *plexiglass*, *materie plastiche* in genere); con i seguenti risultati che rivestono carattere generale:



Elettrizzazione per strofinio (2)

- esistono due specie di materiali isolanti,
 - quelli che si comportano come il **vetro** e
 - quelli che si comportano come la **bakelite**;
- tra due bacchette elettrizzate della medesima specie (entrambe tipo “*vetro*” o tipo “*bakelite*”) si manifesta sempre una forza **repulsiva**;
- tra due bacchette elettrizzate di specie diversa (una tipo “*vetro*” e l'altra tipo “*bakelite*”) si manifesta sempre una forza **attrattiva**;
- una forza attrattiva si manifesta in ogni caso tra la bacchetta di isolante e il materiale con cui è stata elettrizzata per strofinio.



Elettrizzazione per strofinio (3)

- Possiamo allora sintetizzare i risultati precedenti:
 - *due corpi isolanti carichi entrambi positivamente o entrambi negativamente si respingono;*
 - *un corpo isolante carico positivamente e uno carico negativamente si attraggono;*
 - *nel processo di carica per strofinio i due corpi, la bacchetta di isolante e il panno, acquistano sempre una carica di segno opposto.*



Elettrizzazione per strofinio (4)

- La carica che si accumula per strofinio sugli isolanti si mantiene per **tempi considerevoli**, specialmente se l'aria nell'ambiente in cui opera è secca.
- **Non è possibile, invece, caricare per strofinio una bacchetta di metallo** tenendola in mano. Gli effetti di elettrizzazione si osservano però se la bacchetta di metallo è sostenuta da un supporto di materiale isolante e in tal caso il comportamento dei metalli è simile a quello degli isolanti.
- L'assenza di elettrizzazione se non si adotta la suddetta precauzione si spiega col fatto che **i metalli e il corpo umano sono conduttori**, cioè permettono il movimento della carica elettrica accumulatasi durante lo strofinio, a differenza di quanto avviene negli isolanti.
- Dal punto di vista di questi esperimenti hanno caratteristiche di conduttori anche il **suolo, svariati liquidi** tra cui **l'acqua** e anche **l'aria umida**.
- Allora dalla bacchetta di metallo tenuta in mano e strofinata la carica si disperde (molto rapidamente) nel corpo umano e, se possibile, nel suolo; analogamente, in una giornata umida un corpo isolante carico mantiene meno facilmente la carica, che tende a disperdersi (lentamente) nell'aria conduttrice verso i corpi circostanti.



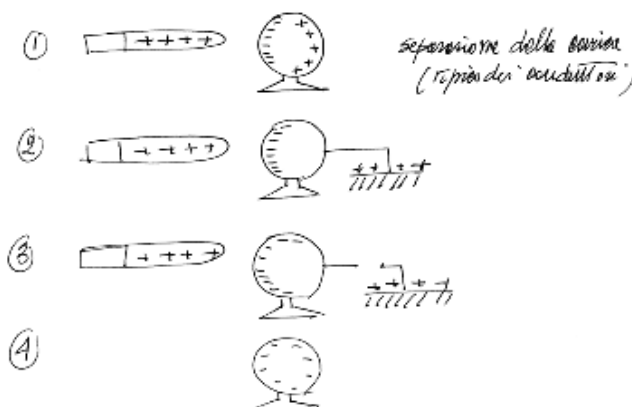
Modello descrittivo

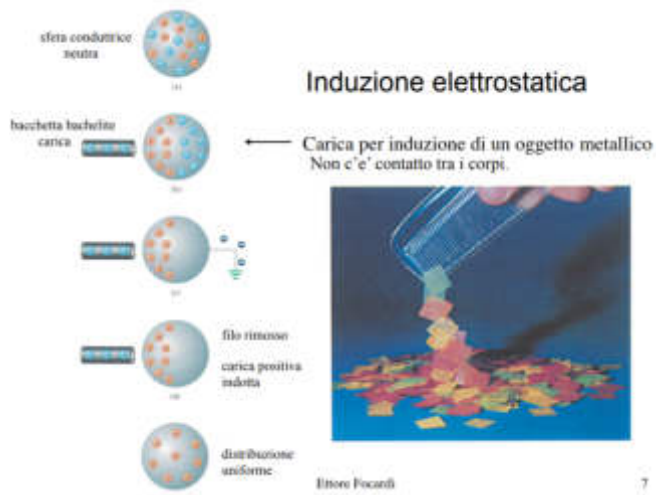
- Il modello che "spiega" i fenomeni elettrici finora mostrati è il seguente:
- La materia contiene due tipi di carica elettrica (meglio dire comportamenti), la carica detta positiva e quella detta negativa.
 - nei corpi scarichi, o elettricamente neutri, ci sono quantità uguali di ciascun tipo di carica,
 - quando i corpi vengono caricati per strofinio, la carica elettrica si trasferisce dall'uno all'altro.
 - dopo che il processo di carica si è concluso, uno dei corpi presenta un eccesso di carica positiva e l'altro un eccesso di carica negativa.
- Corpi che hanno cariche in eccesso dello stesso segno si respingono.
- Corpi che hanno cariche in eccesso di segno opposto si attraggono.



Elettrizzazione per induzione

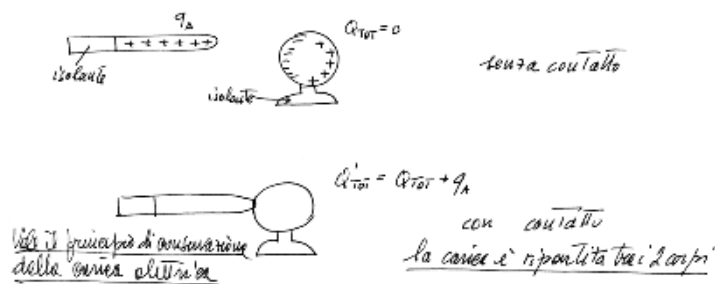
- Un fenomeno di grande interesse teorico e pratico che si ingenera nei conduttori quando questi siano posti in vicinanza di corpi carichi è il fenomeno della **induzione elettrostatica**





Elettrizzazione per contatto

- L'elettrizzazione può anche trasmettersi da un corpo carico ed uno neutro mediante semplice contatto meccanico



- Lo stesso meccanismo consente di "ripartire" per contatto la carica elettrica, inizialmente presente su un conduttore, fra il conduttore stesso e un altro inizialmente scarico.



In sintesi...

- In tutti i casi trattati, non c'è alcuna “*creazione*” di cariche elettriche.
- L'apparizione di una carica in eccesso (pos. o neg. che sia) è sempre dovuta
 - al **trasferimento** di cariche elettriche da un corpo all'altro (elettrizzazione per strofinio o contatto) o
 - alla **ridistribuzione** entro il corpo delle cariche positive e negative.



Forza di Coulomb



Misura della carica elettrica

- Poiché l'atomo è neutro, di conseguenza per un corpo qualsiasi (composto da atomi) la carica totale (*pari alla somma algebrica di tutte le cariche elementari, presenti nel corpo*) risulta normalmente nulla.
- Con metodi opportuni è possibile effettuare trasferimenti di carica tra i corpi:
 - la carica totale può essere positiva
 - la carica totale può essere negativa



Misura operativa (1)

- **Misura operativa**
 - per misurare la carica elettrica dei corpi carichi si stabilisce di:
 - considerare **eguali in grandezza e segno** due cariche se queste, poste alla stessa distanza da una terza, agiscono su di essa con una forza eguale e dello stesso verso;
 - considerare **eguali in grandezza** ma di **segno opposto** due cariche se, nelle stesse condizioni, le forze risultino eguali in modulo ma di verso opposto.
- **Confronto qualitativo tra cariche**
 - può essere effettuato semplicemente con l'*elettroscopio a foglie* (impiegando il principio di conservazione della carica).
- **Confronto quantitativo (in modulo) tra cariche**
 - può diventare quantitativo solo se si conosce l'espressione della forza con cui interagiscono le cariche elettriche.



Legge di Coulomb

- Sperimentalmente due cariche elettriche puntiformi, in quiete poste a distanza una dall'altra, interagiscono con una forza diretta lungo la congiungente, proporzionale al prodotto delle cariche e inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza

$$\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \left(\frac{\vec{r}}{r} \right)$$

- La formulazione precisa della legge della forza elettrica è dovuta a **Charles Augustin de Coulomb** (1785) che eseguì una serie di misure sistematiche per stabilire la dipendenza della forza tra due cariche dei valori q_1 e q_2 di queste e dalla loro distanza r .



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

47

Legge di Coulomb

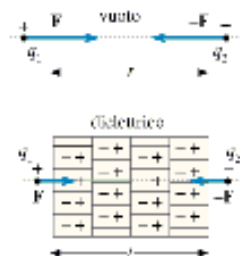
- La costante di proporzionalità k dipende dalla natura del mezzo nel quale si trovano le cariche

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon}$$

- ϵ_0 è chiamata costante dielettrica del vuoto
- ϵ è chiamata costante dielettrica del mezzo ($\epsilon = \epsilon_r\epsilon_0$)
- ϵ_r è chiamata costante dielettrica relativa

- Nel vuoto $\epsilon_r = 1$

- Nella materia $\epsilon_r > 1$
 - (l'interazione coulombiana nella materia è meno intensa che nel vuoto a causa della *polarizzazione del dielettrico che scherma parzialmente entrambe le cariche q_1 e q_2 , diminuendone la forza*).



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

48

Costante dielettrica

- nel Sistema Internazionale è:

$$\varepsilon_0 = 8,86 \times 10^{-12} \left[\frac{C^2}{N \cdot m^2} \right]$$

$$k_0 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 8.99 \times 10^9 \left[\frac{N \cdot m^2}{C^2} \right]$$

TABELLA 12.1 Costante dielettrica relativa per alcune sostanze

SOSTANZE	ε_r	SOSTANZE	ε_r
aria	1.000590	dimetilammina	3.26
acqua distillata	81.07	acetone	20.7
alcol etilico	25.8	cloroformio	4.8
vetro	7.0	membrana di ossone	9.0



Esempio

- Qual è la forza repulsiva esercitata reciprocamente da due elettroni posti a 1.0 cm di distanza nel vuoto?

$$r = 1.0 \text{ cm} = 1.0 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$Q_1 = Q_2 = -e = -1.6022 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$F_0 = k_0 \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

$$F_0 = 8.99 \times 10^9 \left[\frac{N \cdot m^2}{C^2} \right] \frac{(-1.6022 \times 10^{-19} \text{ C}) \times (-1.6022 \times 10^{-19} \text{ C})}{(1.0 \times 10^{-2} \text{ m})^2}$$

$$F_0 = 2.3 \times 10^{-24} \text{ N}$$



Conservazione della carica elettrica

- Nel strofinare una bacchetta di vetro con un panno di seta, una carica positiva si accumula sulla bacchetta e la stessa quantità di carica negativa appare sul panno.
- Ciò significa che una parte della carica iniziale si è trasferita da un corpo all'altro alterando la neutralità iniziale di entrambe i corpi.

- **Principio di Conservazione della carica elettrica**

- concepito da *Benjamin Franklin*, non è stato mai sconfessato sperimentalmente:

“In un sistema isolato la somma algebrica delle cariche elettriche si mantiene costante nel tempo”

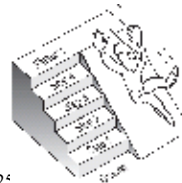


Quantizzazione della carica

- Abbiamo visto che una rappresentazione della carica come un fluido continuo non è realistica sebbene, spesso, è impiegata per modellare la realtà
- la materia, infatti, non è continua!!
- Sperimentalmente si osserva che la carica è quantizzata:

$$q = ne, \quad n = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots \quad e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

- La carica elementare (“ e ”) è una delle costanti fondamentali della natura.



Evidenza della carica



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

68

Evidenza della carica

- La granulosità dell'elettricità è responsabile del lampo blu che viene emesso da un mentino quando è schiacciato. Quando lo zucchero (saccarosio) si cristallizza durante la rottura della caramella, una parte di ogni cristallo ha un eccesso di elettroni, mentre l'altra parte ha un eccesso di ioni positivi. Gli elettroni e gli ioni positivi ci spostano rapidissimi attraverso il salto provocato dalla rottura per neutralizzare le due parti.
- Durante lo spostamento gli elettroni e gli ioni positivi si scontrano con le molecole di azoto dell'aria (75% in peso) che passa attraverso questo spazio.
- Le collisioni fanno sì che l'azoto emetta una luce ultravioletta invisibile e una luce blu troppo fioca per essere vista. L'olio dei cristalli del mentino assorbe la luce ultravioletta ed emette quella luce blu che appare in bocca o sotto le tenaglie.
- Se la caramella è bagnata con la saliva, l'esperimento non riesce perché la saliva è conduttrice e neutralizza le due parti di un cristallo fratturato prima che scocchi la scintilla.



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

69

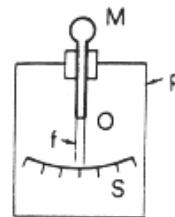
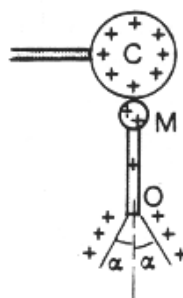
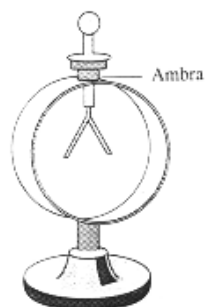
Nota sul concetto di “carica”

- Spesso ci esprimiamo con frasi del tipo "*la carica distribuita su un sfera*", "*la quantità di carica trasferita*", "*la carica trasportata da un elettrone*", che potrebbero indurre a credere che la carica sia una sostanza o un qualcosa che possa essere “spalmata”. (Anche noi abbiamo già usato queste espressioni.)
- Non bisogna tuttavia dimenticare cosa in realtà si intende:
 - le particelle sono sostanza *mentre ...*
 - la carica non è che una loro proprietà, come la massa.



Elettroscopio a foglie

- Strumento realizzato per rivelare e riconoscere lo stato (carica) di carica.



- Impiegato per fornire una descrizione operativa della grandezza fisica **carica elettrica**



Elettroscopio a foglie

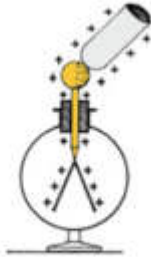


Fig. 13 - Elettroscopio a foglie elettrizzato per contatto con un corpo carico positivamente.

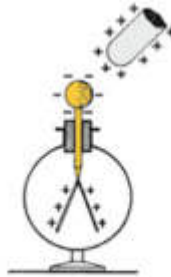
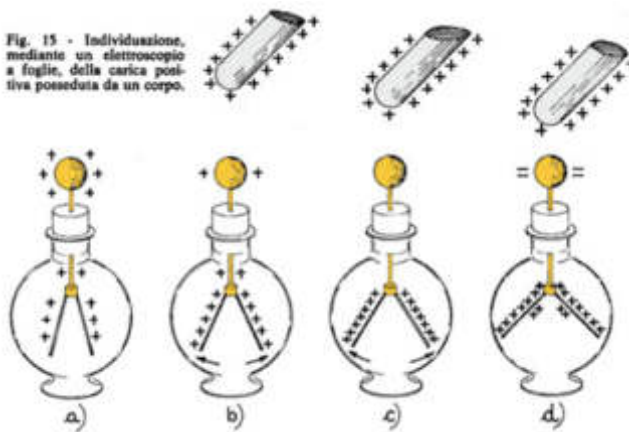


Fig. 14 - Elettroscopio a foglie elettrizzato per induzione con un corpo carico positivamente.



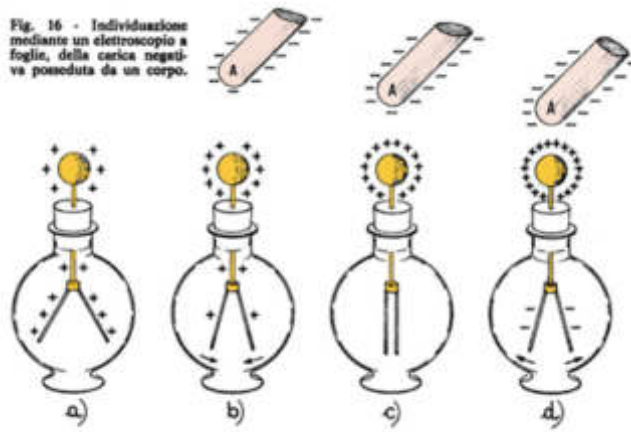
Elettroscopio a foglie

Fig. 15 - Individuazione, mediante un elettroscopio a foglie, della carica positiva posseduta da un corpo.



Elettroscopio a foglie

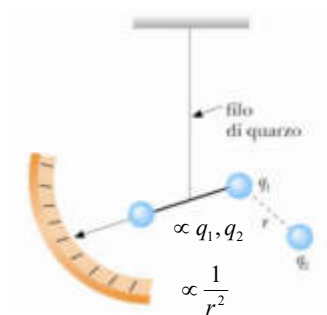
Fig. 16 - Individuazione mediante un elettroscopio a foglie, della carica negativa posseduta da un corpo.



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

78

Bilancia di torsione di Cavendish



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

Coulomb
1785



k

$$|\vec{F}_g| = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Cavendish
1798



γ



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

82

Rappresentazione attraverso linee di forza

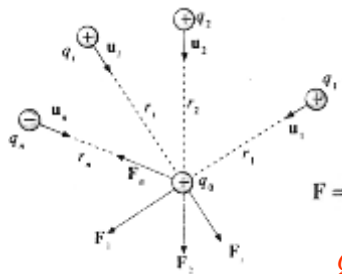
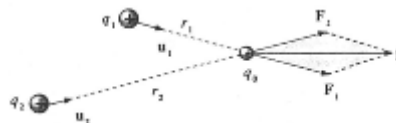


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

83

Principio di sovrapposizione

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 = \frac{1}{4 \pi \epsilon_0} \frac{q_1 q_0}{r_1^2} \mathbf{u}_1 + \frac{1}{4 \pi \epsilon_0} \frac{q_2 q_0}{r_2^2} \mathbf{u}_2$$



$$\mathbf{F} = \sum_i \mathbf{F}_i = \sum_i \frac{1}{4 \pi \epsilon_0} \frac{q_i q_0}{r_i^2} \mathbf{u}_i = q_0 \sum_i \frac{1}{4 \pi \epsilon_0} \frac{q_i}{r_i^2} \mathbf{u}_i$$

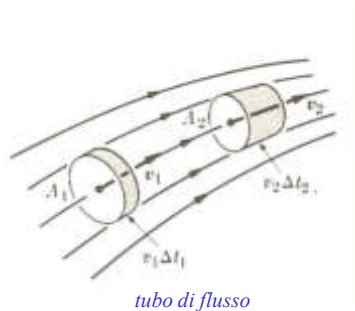
Questi sono risultati sperimentali !!!



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

84

Linee e tubo di flusso (fluidodinamica)



Linee di forza

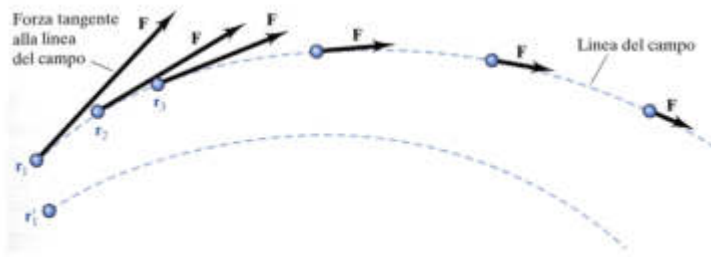
- *L'introduzione del concetto di campo evidenzia la modifica, da parte della sorgente, dello spazio circostante*

Proprietà delle linee di forza:

- una linea di forza in ogni punto è tangente e concorde all'interazione in quel punto;
- le linee di forza si addensano dove l'intensità dell'interazione è maggiore;
- le linee di forza non si incrociano mai, in quanto in ogni punto l'interazione elettrica è definito univocamente e non può avere due direzioni distinte;
- le linee di forza hanno origine dalle cariche positive e terminano sulle cariche negative; qualora ci siano solo cariche di uno stesso segno le linee di forza si chiudono all'infinito;
- nel caso di cariche di segno opposto, ma eguali in modulo, tutte le linee che partono dalle cariche positive si chiudono su quelle negative, alcune passando eventualmente per l'infinito; se invece le cariche non sono eguali in modulo, alcune linee terminano o provengono dall'infinito.



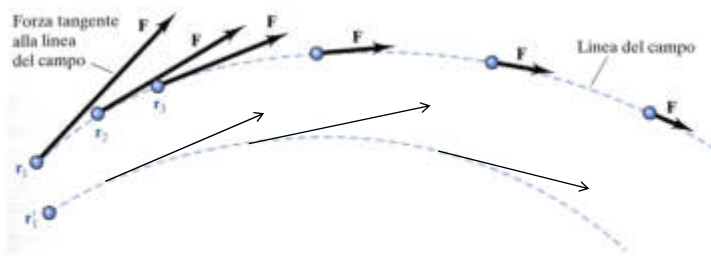
Costruzione delle linee di forza



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

87

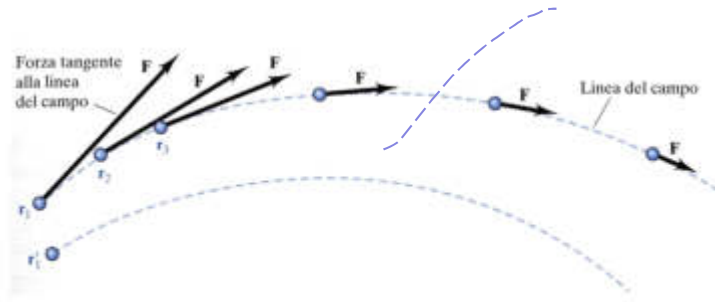
Costruzione delle linee di forza



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

88

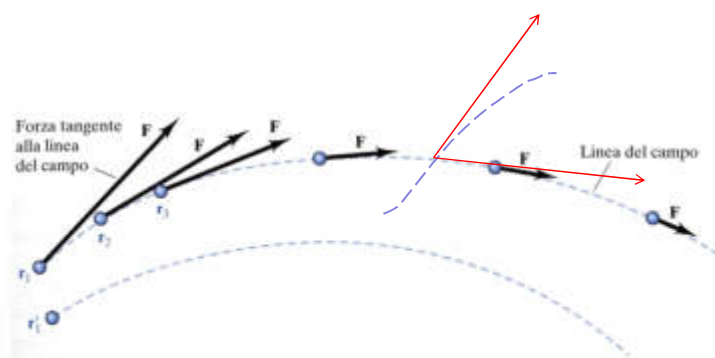
Costruzione delle linee di forza



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

89

Costruzione delle linee di forza



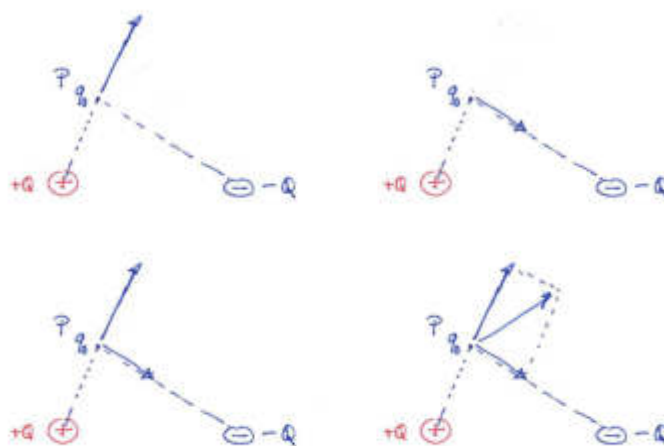
Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

90

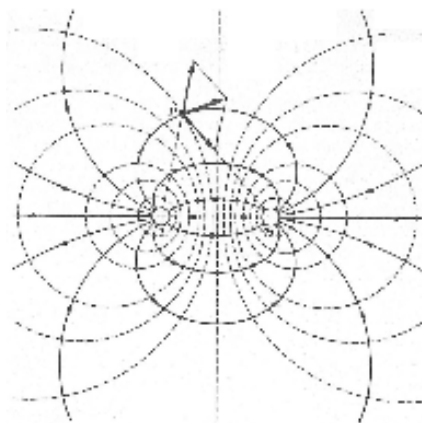
Costruzione delle linee di forza



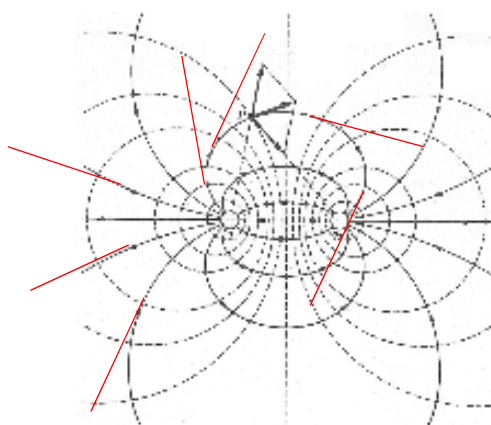
Costruzione delle linee di forza



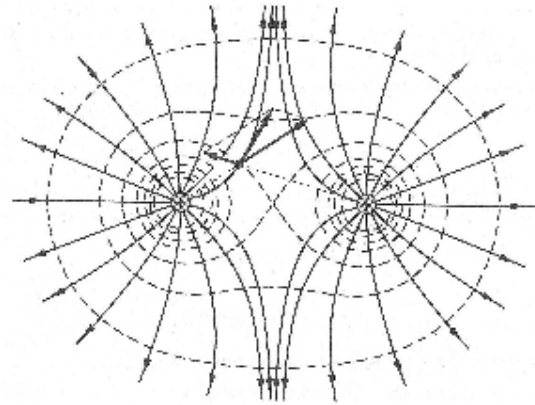
Linee di forza (1)



Linee di forza (1)

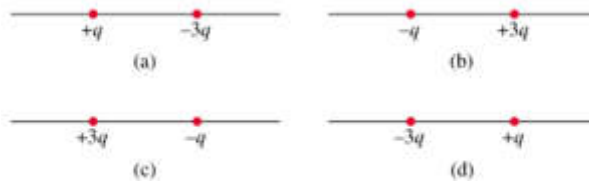


Linee di forza (2)



Esempio

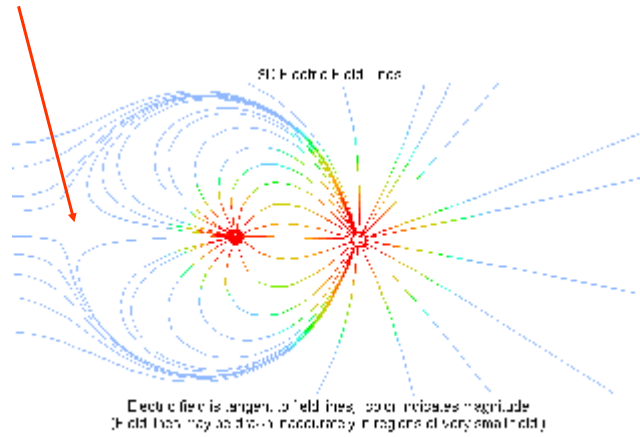
- In quale dei quattro casi mostrati un **elettrone** potrebbe stare in equilibrio in un certo punto sull'asse a sinistra delle cariche?



Vedi la soluzione ➡



Caso a (OK)



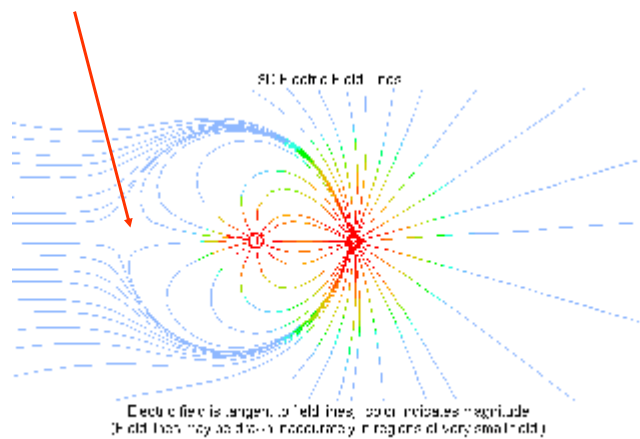
Localizzazione di un punto di equilibrio per un elettrone



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

97

Caso b (OK)



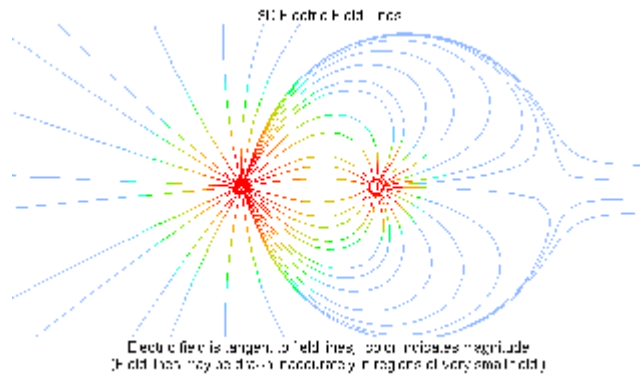
Localizzazione di un punto di equilibrio per un elettrone



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

98

Caso c (NO)



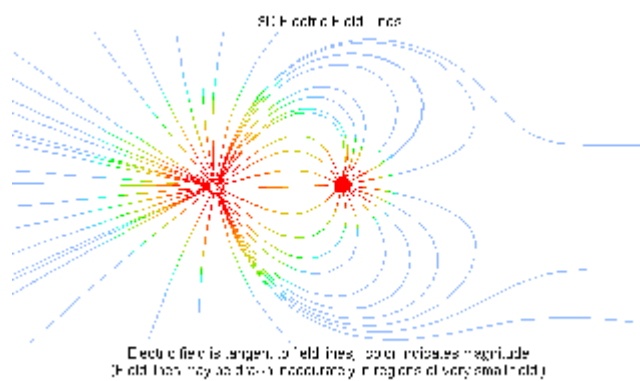
Localizzazione di un punto di equilibrio per un elettrone



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

99

Caso d (NO)



Localizzazione di un punto di equilibrio per un elettrone



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

100

Campo elettrostatico



Concetto di campo elettrostatico (1)

- Conviene, per discutere questa *azione a “distanza”*, introdurre il concetto di **campo**.
- L'azione sentita da un oggetto in qualche regione dello spazio é dovuta all'esistenza di un campo appropriato in quella regione.
- Il campo é visto come una specie di tensione o stress nello spazio vuoto che si rivela producendo una forza sull'oggetto.

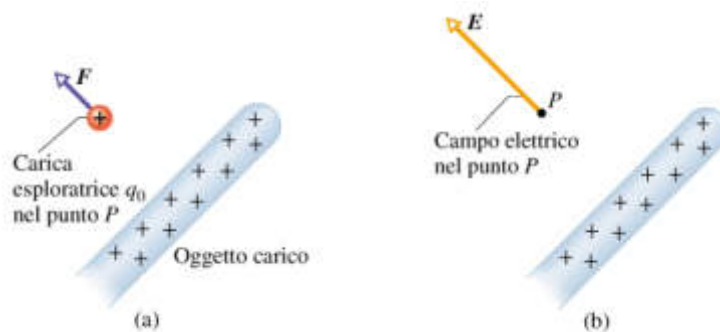


Concetto di campo elettrostatico (2)

- È in generale difficile nel caso di un campo identificare le sorgenti; in genere è possibile sperimentalmente catalogare le proprietà di un campo in un punto muovendo una piccola particella di test q_0 e misurando la forza che “sente” in funzione della posizione e del tempo.
- I campi sono collegati alle distribuzioni continue sullo spazio.



Concetto di campo elettrostatico (3)



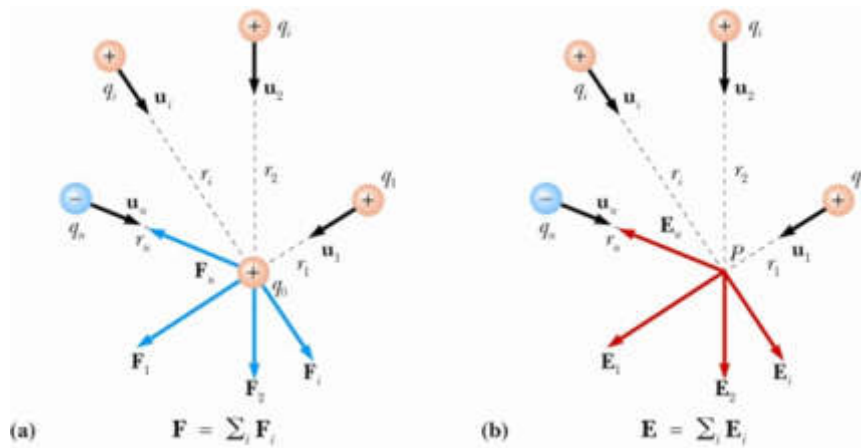
$$\vec{E}(x, y, z) = \frac{\vec{F}(x, y, z)}{q_0}$$

$$\vec{E}(x, y, z) = \lim_{q_0 \rightarrow 0} \frac{\vec{F}(x, y, z)}{q_0}$$

$$E = \frac{F}{q} \left[\frac{N}{C} \right] = \left[\frac{V}{m} \right]$$



Concetto di campo elettrostatico (4)



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

106

Concetto di campo elettrostatico (5)

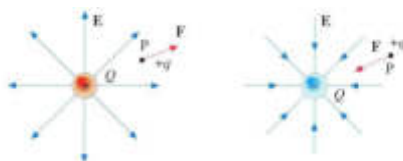
- Le sue dimensioni sono

$$\left[\frac{M \cdot L}{T^2 \cdot Q} \right]$$

- la sua unità di misura nel *Sistema Internazionale* è

$$\left[\frac{\text{Newton}}{\text{Coulomb}} \right]$$

- La direzione di $\mathbf{E}(x,y,z)$ in un punto $P(x,y,z)$ coincide con la direzione della forza e il verso è quello della forza solo se la carica q posta in $P(x,y,z)$ è positiva



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

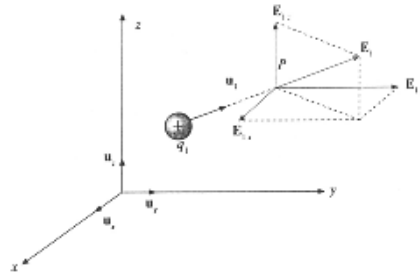
107

Forma vettoriale del Campo Elettrico

$$\vec{E}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r^2} \hat{u}$$

*Singola
carica*

$$r = \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2}$$



$$\vec{E}(x, y, z) = \sum_i \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i}{r_i^2} \hat{u}_i$$

*Distribuzione
discreta*



Sorgenti del campo elettrostatico



Sorgente del campo elettrostatico

- Tali formule mettono bene in evidenza come, fissato un sistema di cariche, si possa associare ad ogni punto nello spazio $P(x, y, z)$ un valore del campo elettrostatico $\vec{E}(x, y, z)$, indipendentemente dalla presenza di una carica di prova q_0 .

- Quando una carica q viene posta nel punto $P(x,y,z)$ essa risente della forza:

$$\vec{F}(x, y, z) = q\vec{E}(x, y, z)$$

- tale relazione che afferma che: “Il sistema di cariche è la sorgente del campo elettrostatico $\vec{E}$ ”



Rappresentazione di $\vec{E}$ tramite linee di campo



Linee di forza del campo elettrostatico

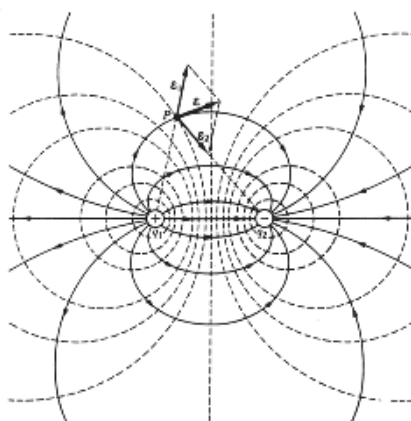
- *L'introduzione del concetto di campo evidenzia la modifica, da parte della sorgente, dello spazio circostante*

Proprietà delle linee di campo:

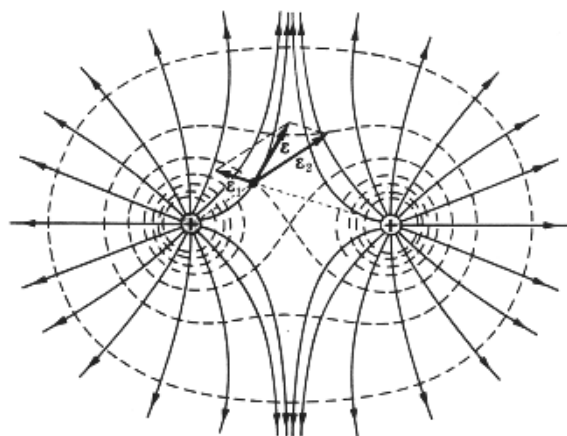
- una linea di *campo* in ogni punto è tangente e concorde al campo in quel punto;
- le linee di *campo* si addensano dove l'intensità del campo è maggiore;
- le linee di *campo* non si incrociano mai, in quanto in ogni punto il campo elettrico è definito univocamente e non può avere due direzioni distinte;
- le linee di *campo* hanno origine dalle cariche positive e terminano sulle cariche negative; qualora ci siano solo cariche di uno stesso segno le linee di forza si chiudono all'infinito;
- nel caso di cariche di segno opposto, ma eguali in modulo, tutte le linee che partono dalle cariche positive si chiudono su quelle negative, alcune passando eventualmente per l'infinito; se invece le cariche non sono eguali in modulo, alcune linee terminano o provengono dall'infinito.



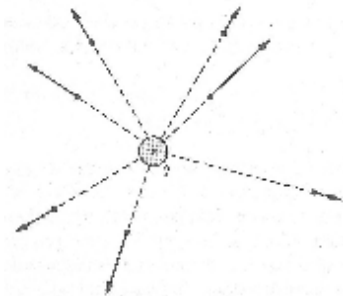
Linee di campo (1)



Linee di campo (2)



Campo E generato da una carica singola



- Per la legge di Coulomb, il campo elettrico prodotto da una sorgente Q praticamente puntiforme è dato da:

$$\vec{E}(r) = \frac{\vec{F}(r)}{q} = \frac{1}{q} \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{Qq}{r^2} \left(\frac{\vec{r}}{r} \right) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{Q}{r^2} \left(\frac{\vec{r}}{r} \right)$$



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

120

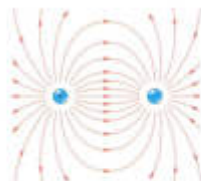
Campo E generato da più cariche sorgenti



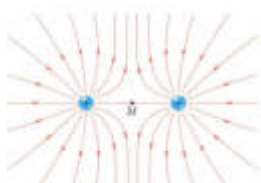
Le linee del campo elettrico generate da una carica positiva. Le linee di campo sono sempre orientate "uscendo" dalla carica verso l'esterno.



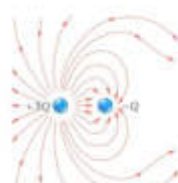
Le linee del campo elettrico generate da una carica negativa. Le linee di campo sono sempre orientate "entrando" nella carica verso la carica.



Le linee del campo elettrico generate da due cariche di segno opposto ma uguale valore. Una carica di segno opposto. Le linee di campo si attraggono e risultano dalla carica positiva e attratta da quella negativa.



Le linee del campo elettrico generate da due cariche di uguale valore e segno. Una carica di segno opposto nel punto medio del segmento che congiunge le due cariche, le forze si annullano.



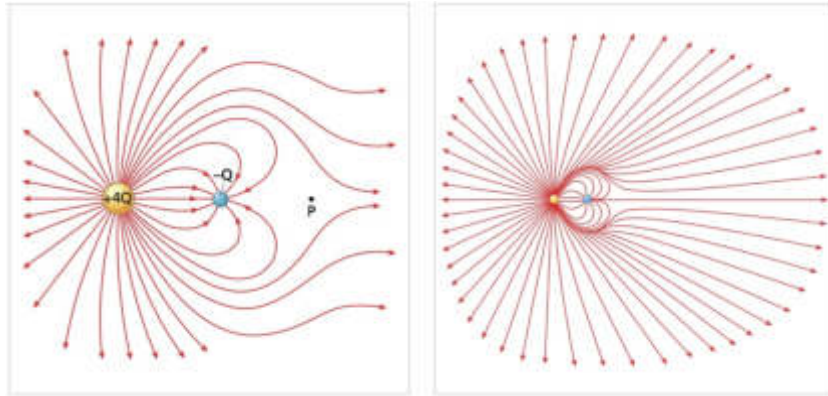
Le linee del campo elettrico generate da due cariche di diverso valore e segno. La carica positiva è attratta più della carica negativa e risulta dalla carica positiva e attratta da quella negativa.



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

121

Campo E generato da più cariche sorgenti

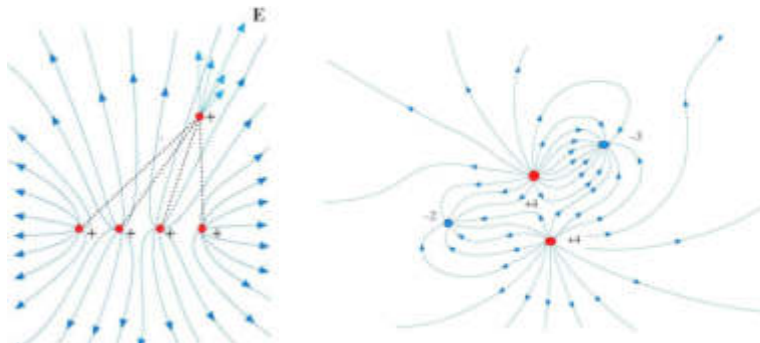


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

122

Campo E generato da una distribuzione di cariche

- Se il campo elettrico è generato da una distribuzione di cariche, il vettore $E(x,y,z)$ è dato dalla somma vettoriale dei vettori intensità di campo elettrico generati da ciascuna carica,



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

123

Forza elettrica in Biologia Molecolare



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

124

Esempio: forza elettrica in Biologia Molecolare

- La **Biologia molecolare** studia a livello molecolare la struttura ed il funzionamento di una cellula vivente.
- L'interno di una cellula è principalmente composto da molecole d'**acqua**, continuamente in movimento ed interagenti fra loro in diversi modi:
 - attraverso reazioni chimiche (formazione e scioglimento di legami fra atomi),
 - interazioni più deboli a causa dell'attrazione elettrostatica.
- Possiamo pensare, quindi, a molti processi nella cellula risultato del
 - moto molecolare casuale (termico)
 - unito all'effetto ordinante della forza elettrostatica.



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

125

Modello delle macromolecole biologiche

- **Definizioni:**

- **Cromosomi**

- L'informazione genetica che viene trasmessa di generazione in generazione in tutti gli esseri viventi è contenuta nei cromosomi, che sono fatti di geni.

- **Geni**

- Ogni gene contiene l'informazione necessaria a codificare una particolare proteina.

- **DNA**

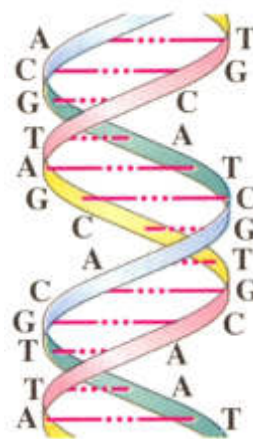
- L'informazione genetica contenuta in un gene è assemblata nella molecola principale costituente il cromosoma, il DNA (*acido desossiribonucleico*).

- Una molecola di DNA consiste di una lunga catena di molte piccole molecole, note come basi nucleotidiche. Solo quattro tipi di basi sono presenti nella macromolecola: **adenina** (A), **citosina** (C), **guanina** (G), **timina** (T).



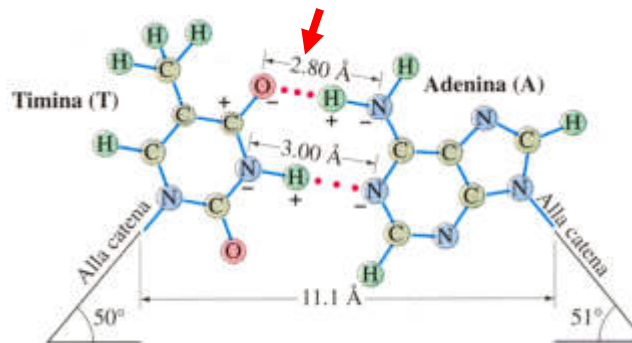
Struttura del DNA

- Il DNA di un cromosoma consiste di due lunghe catene («*doppia elica*»), tenute assieme da forze elettrostatiche.
- L'Adenina su una catena è sempre opposta a una Timina sull'altra catena; così come una Guanina è sempre opposta a una Citosina.
- La vicinanza fra le parti cariche è necessaria per rendere la forza elettrostatica sufficiente a tenere unite le basi anche per un breve periodo formando quelli che sono conosciuti come «*legami deboli*».



Origine delle forze elettrostatiche

- L'elettrone dell'atomo di H dell'adenina passa parte del suo tempo orbitando attorno all'adiacente atomo di N, creando di fatto un dipolo elettrostatico. L'H dell'adenina è quindi attratto dall'atomo di O⁻ della timina.

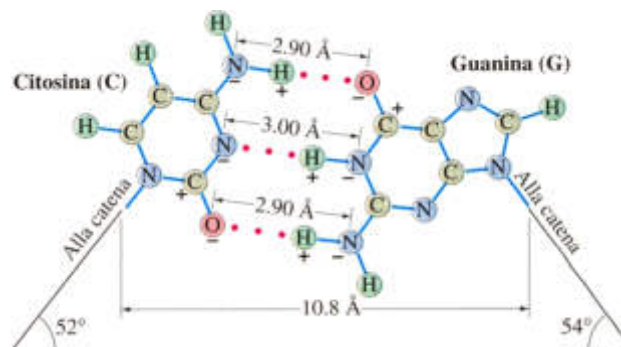


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

129

Origine delle forze elettrostatiche

- Analogamente per il legame Citosina-Guanina

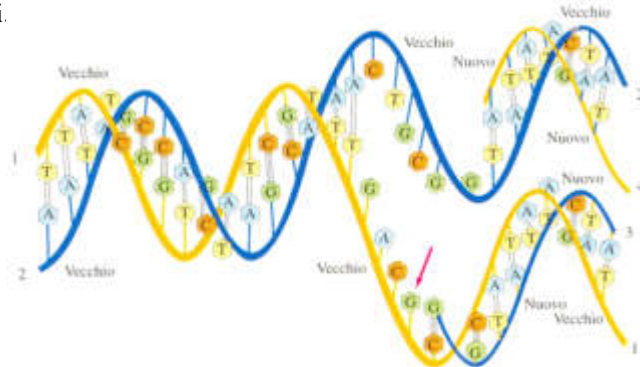


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

133

Come avviene la replicazione

- Durante la replicazione cellulare la disposizione di A opposto a T e G opposto a C assicura che l'informazione genetica sia trasmessa accuratamente alla generazione successiva. Le due metà della doppia elica di DNA si separano (con l'aiuto di enzimi, anch'essi operanti per mezzo di forze elettrostatiche) lasciando esposte le parti cariche delle basi.

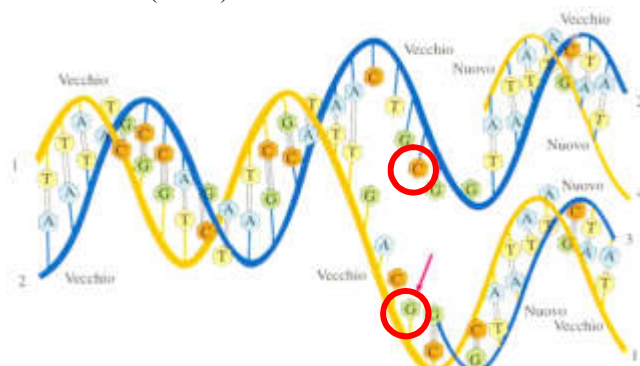


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

134

Come avviene la replicazione

- Molte basi nucleotidiche (A,C,G,T) sono libere. L'unica delle quattro basi che avvertirà una forza attrattiva verso la nostra G, una volta giuntavi in contatto, sarà una C. Le cariche sulle altre tre basi non sono disposte in maniera tale da potersi avvicinare a quelle sulla G, e quindi la forza attrattiva ($\sim 1/R^2$) è insufficiente.



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

135

Importanza della forza elettrostatica

- La forza elettrostatica, quindi,
 - *tiene unite le due catene,*
 - *seleziona le basi nel giusto ordine durante la replicazione*
- In tal modo l'informazione genetica può essere trasmessa alla generazione successiva in modo corretto.
- Il concetto importante è che la cellula contiene sì molte molecole, tutte in agitazione ed interagenti l'una con l'altra, ma solo la molecola con la forma appropriata sarà attratta sufficientemente in modo da rimanere vicino abbastanza a lungo per essere attaccata alla catena in formazione. Perciò, a causa del moto casuale delle molecole, la forza elettrostatica agisce per creare ordine dal caos.



Distribuzione continua di carica



Generalizzazione per distribuzioni continue

- Il concetto di campo elettrico può essere generalizzato ai casi in cui la sorgente non sia rappresentata da una singola carica puntiforme Q , ma da un insieme discreto o da una distribuzione continua di cariche.

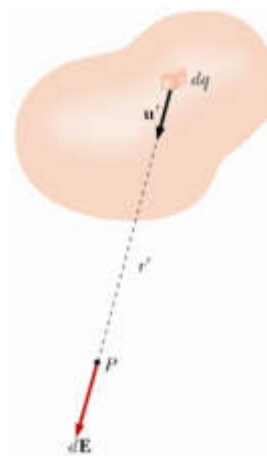
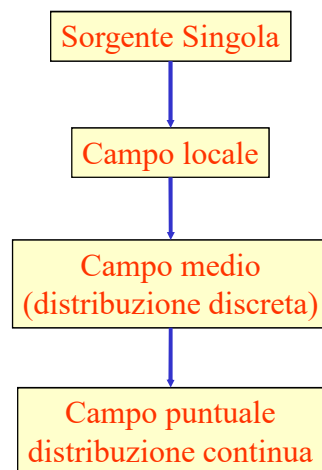
Si consideri un insieme (discreto o continuo) di cariche sorgenti.

Posta una carica q_0 di prova, questa risulta soggetta ad una forza F .

- In generale, la forza F non è proporzionale alla carica di prova q_0 .
- Nel caso di cariche disposte su corpi estesi, la presenza di q_0 potrebbe modificare la distribuzione della cariche microscopiche presenti su tali corpi:
 - sui conduttori possono aversi spostamenti macroscopici di cariche (*induzione*),
 - negli isolanti, pur essendo impossibili migrazioni macroscopiche di cariche, possono aversi fenomeni di modificazioni localizzate nelle distribuzioni di cariche (*polarizzazione*).



Campo prodotto da distr.continua di carica (1)



Campo prodotto da distr.continua di carica (2)

$$dq = \rho(x', y', z') d\tau$$

$$d\tau = dx' dy' dz'$$

$$q = \int_V \rho(x', y', z') d\tau$$



$$\vec{E}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_V \frac{\rho d\tau}{r^2} \hat{u}_r$$

$$dq = \sigma(x', y', z') d\Sigma$$

$$d\Sigma = dx' dy'$$

$$q = \int_S \sigma(x', y', z') d\Sigma$$



$$\vec{E}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_S \frac{\sigma d\Sigma}{r^2} \hat{u}_r$$

$$dq = \lambda(x', y', z') dl$$

$$dl = dx'$$

$$q = \int_L \lambda(x', y', z') dl$$



$$\vec{E}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_L \frac{\lambda dl}{r^2} \hat{u}_r$$

$$d\vec{E}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \hat{u}_r =$$

$$= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda(x', y', z') dl}{r^2} \hat{u}_r$$



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

140

Campo prodotto da distr.continua di carica (3)

- ρ , σ , λ sono, in generale, funzioni del punto

$$\text{per distribuzioni uniformi} \begin{cases} q = \rho\tau & \rho = \rho \left[\frac{C}{m^3} \right] \\ q = \sigma\Sigma & \sigma = \sigma \left[\frac{C}{m^2} \right] \\ q = \lambda l & \lambda = \lambda \left[\frac{C}{m} \right] \end{cases}$$



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

141

$\vec{E}$ è conservativo?

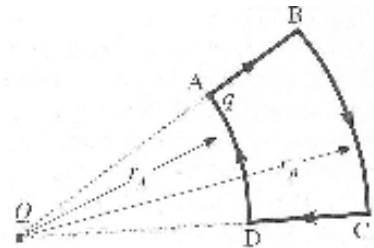


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

142

Il campo elettrostatico è conservativo ?

- Calcoliamo il lavoro L compiuto dalla forza coulombiana del campo elettrostatico:



$$L = \sum_{ABCD} \vec{F}(x, y, z) \cdot \Delta \vec{l}(x, y, z) = \int_{ABCD} \vec{F}(x, y, z) \cdot d\vec{l}(x, y, z)$$

$$L = \int_{AB} \vec{F} \cdot d\vec{l} + \int_{BC} \vec{F} \cdot d\vec{l} + \int_{CD} \vec{F} \cdot d\vec{l} + \int_{DA} \vec{F} \cdot d\vec{l}$$



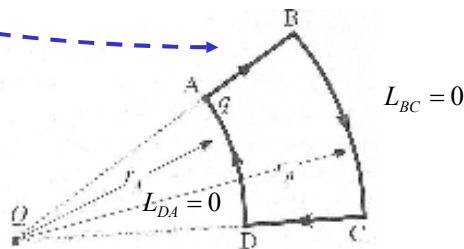
Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

145

Il campo elettrostatico è conservativo ?

$$L_{AB} = \int_{AB} \vec{F} \cdot d\vec{l} = \int_{AB} F dl = \int_{r_A}^{r_B} \left[\frac{1}{4\pi\epsilon_r\epsilon_o} \frac{Qq}{r^2} \right] dr = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_r\epsilon_o} \int_{r_A}^{r_B} \frac{dr}{r^2} =$$

$$\frac{Qq}{4\pi\epsilon_r\epsilon_o} \left[-\frac{1}{r} \right]_{r_A}^{r_B} = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_r\epsilon_o} \left[\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right]$$

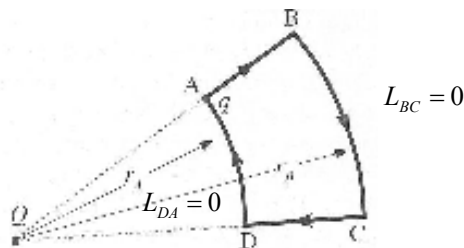


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

146

Il campo elettrostatico è conservativo ?

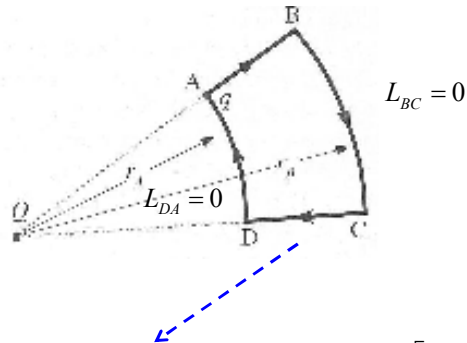
- Il lavoro L_{BC} è nullo poiché la forza $\mathbf{F}$ è radiale e, quindi, sempre perpendicolare allo spostamento che, essendo lungo l'arco, è ad essa perpendicolare.
- Lo sarà anche L_{DA} .



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

147

Il campo elettrostatico è conservativo ?



$$L_{CD} = \int_{CD} \vec{F} \cdot d\vec{l} = \int_{CD} F dl = \int_{r_C}^{r_D} \left[\frac{1}{4\pi\epsilon_r\epsilon_o} \frac{Qq}{r^2} \right] dr = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_r\epsilon_o} \int_{r_C}^{r_D} \frac{dr}{r^2} =$$

$$\frac{Qq}{4\pi\epsilon_r\epsilon_o} \left[-\frac{1}{r} \right]_{r_C}^{r_D} = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_r\epsilon_o} \left[\frac{1}{r_C} - \frac{1}{r_D} \right] = -\frac{Qq}{4\pi\epsilon_r\epsilon_o} \left[\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right] = -\int_{AB} F dl$$



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

148

Il campo elettrostatico è conservativo ?

- In definitiva:



$$L_{ABCD} = L_{AB} + L_{BC} + L_{CD} + L_{DA} =$$

$$= \frac{Qq}{4\pi\epsilon_r\epsilon_o} \left[\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right] + 0 - \frac{Qq}{4\pi\epsilon_r\epsilon_o} \left[\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right] + 0 = 0$$

- Il lavoro compiuto dalla forza coulombiana (dal campo elettrostatico) è nullo su un percorso chiuso.



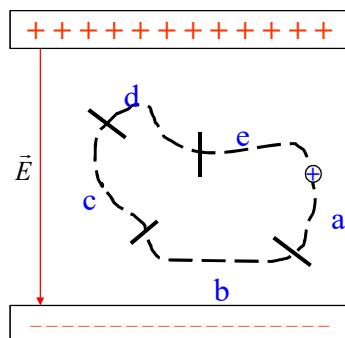
Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

149

Quesito 1

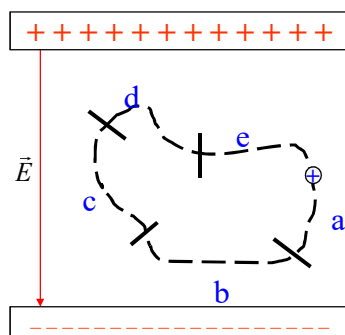
- Nel campo elettrico uniforme, qui rappresentato, è tracciato un ipotetico percorso chiuso con un verso di percorrenza orario da far compiere ad una carica positiva. Il percorso è stato diviso in diverse parti (a, b, c, d, e). Quali sono i tratti in cui il campo (la forza elettrica) fa lavoro motore (positivo)?

- A. Il lavoro è positivo nei tratti a, d
- B. Il lavoro è positivo nei tratti a, c
- C. Il lavoro è positivo nei tratti b, e
- D. Il lavoro è negativo ovunque



Quesito 1

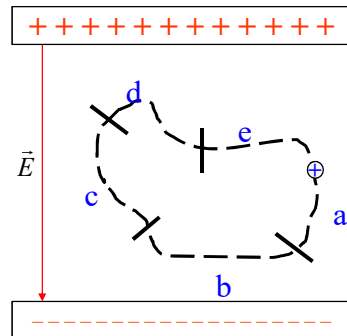
- Nei tratti in cui la forza elettrica ha una componente nel verso dello spostamento il lavoro è *motore* (positivo). a,d
- Nei tratti in cui la forza elettrica ha una componente opposta allo spostamento il lavoro è *resistente* (negativo). b,c,e
- Alla fine di un percorso chiuso il bilancio deve essere *nullo*.
- Se la carica elettrica fosse stata *negativa*, la forza elettrica avrebbe avuto un verso *opposto a quello del campo* e quindi anche un lavoro di segno opposto, ma sempre con un bilancio nullo nel percorso chiuso.



Quesito 1

- Per il Teorema dell'energia cinetica,
 - quando il lavoro è *motore* l'energia cinetica della carica elettrica *aumenta*,
 - quando il lavoro è *resistente* l'energia cinetica della carica *diminuisce*.
- Alla forza elettrica (come ad ogni altra forza conservativa) è associata una *energia potenziale* U .
- In assenza di forze dissipative, alla variazione di energia cinetica K corrisponde una variazione opposta di energia potenziale elettrica U .

$$L_{\text{campo elettrostatico}} = \Delta K = -\Delta U$$
- In un campo conservativo si può stabilire, fra due punti qualsiasi del percorso, *una variazione ΔU di energia potenziale elettrica* legata al lavoro fatto dalle forze del campo su una carica.



Energia potenziale elettrostatica



Il teorema dell'Energia cinetica

- Forze *conservative* e
$$\begin{cases} L_{ab,1} = L_{ab,2} \\ L = 0 \end{cases} \quad \Delta K = 0$$

• Il lavoro effettuato dipende dal percorso!

- Esempi di forze conservative:
 - La forza gravitazionale
 - La forza elastica di una molla



- Forze *non conservative* (dette anche *dissipative*)
$$\begin{cases} L_{ab,1} \neq L_{ab,2} \\ L \neq 0 \end{cases} \quad \Delta K \neq 0$$

• Il lavoro effettuato dipende dal percorso!

- Esempi di forze non conservative:
 - La forza di attrito
 - La forza resistente di un fluido



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

156

Energia potenziale

- Poiché il lavoro L compiuto da una forza conservativa $\mathbf{F}$ per andare dal punto $A(x_A, y_A, z_A)$ al punto $B(x_B, y_B, z_B)$, dipende solo dagli estremi della traiettoria, A e B , possiamo introdurre una funzione $U(x, y, z)$ tale che:

$$L = U(x_A, y_A, z_A) - U(x_B, y_B, z_B)$$

- Ovvero, il lavoro L può essere espresso come differenza di una funzione del punto calcolata in A e B .
- La funzione U è detta **energia potenziale**



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

157

Energia potenziale

$$L_{AB} = \int_A^B \vec{F}(x, y, z) \cdot d\vec{l}(x, y, z) = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_r\epsilon_o} \left[\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right]$$

- Non dipendendo dal percorso seguito (*il campo elettrostatico è conservativo*), l'integrale può essere sempre espresso come differenza dei valori di una funzione delle coordinate $U(x, y, z)$ detta *energia potenziale*:

$$U(x_B, y_B, z_B) - U(x_A, y_A, z_A) = - \int_A^B \vec{F}(x, y, z) \cdot d\vec{l}$$



Energia potenziale elettrica (2)

$$U_B - U_A = - \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{l}$$

- La variazione di energia potenziale U è pari al lavoro compiuto dalla forza conservativa F , cambiato di segno.
- Solo le variazioni di $U(x, y, z)$ hanno significato fisico !!!
- Scegliendo opportunamente una posizione di riferimento si pone
$$U = 0 \quad a \quad r = \infty$$
- Si definisce quindi:

$$U(r) = \frac{q_0 q}{4\pi\epsilon_0 r} \quad e \quad U(\infty) = 0$$



Potenziale elettrostatico



Potenziale elettrostatico

- In analogia a quanto abbiamo fatto con la Forza di Coulomb:

$$\vec{F}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq_0}{r^2} \hat{r}$$



$$\vec{E}(x, y, z) = \lim_{q_0 \rightarrow 0} \frac{\vec{F}(x, y, z)}{q_0}$$

$$U(x, y, z) = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0} \sum \frac{Q_i}{r_i}$$



$$V(x, y, z) = \lim_{q_0 \rightarrow 0} \frac{U(x, y, z)}{q_0}$$

- potenziale elettrostatico scalare
- unione del punto $P(x, y, z)$
- non dipende dalla carica di prova q_0

$$V = \left[\frac{\text{Joule}}{\text{Coulomb}} \right] = [\text{Volt}]$$



Potenziale elettrostatico

- Definiamo la quantità scalare *potenziale elettrostatico* del campo in un punto $P(x,y,z)$ il rapporto tra l'energia potenziale U di una carica q posta nel punto P e la carica q stessa:

$$V(r) = \frac{U(r)}{q} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_r\epsilon_o} \frac{1}{r} + cost$$

- Definiamo *differenza di potenziale elettrostatico (d.d.p.)* tra due punti A e B il lavoro, cambiato di segno, compiuto dal campo elettrico per portare una carica unitaria e positiva da A a B :

$$\Delta V = V_B - V_A = -\frac{L_{AB}}{q}$$



Potenziale elettrostatico

$$\Delta V = V_B - V_A = -\frac{L_{AB}}{q}$$

- Se prendiamo il punto B di riferimento posto all'infinito avremo:

$$-V_A = -\frac{L_{A\infty}}{q} \rightarrow V_A = \frac{L_{A\infty}}{q}$$

- Il potenziale elettrostatico nel punto A è uguale al lavoro che il campo elettrostatico compie per portare l'unità di carica positiva da A all'infinito.
- Nel Sistema Internazionale l'unità di misura della differenza di potenziale elettrico (d.d.p.) è il volt (V).



Definizione di elettronvolt

- La necessità di introdurre un'unità di energia adatta a descrivere i fenomeni su scala atomica ha comportato la definizione dell'unità chiamata elettronvolt (eV), fondata sulla definizione di volt in relazione alla carica elettrica di un elettrone,

$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Coulomb}$$

- pertanto

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Joule}$$

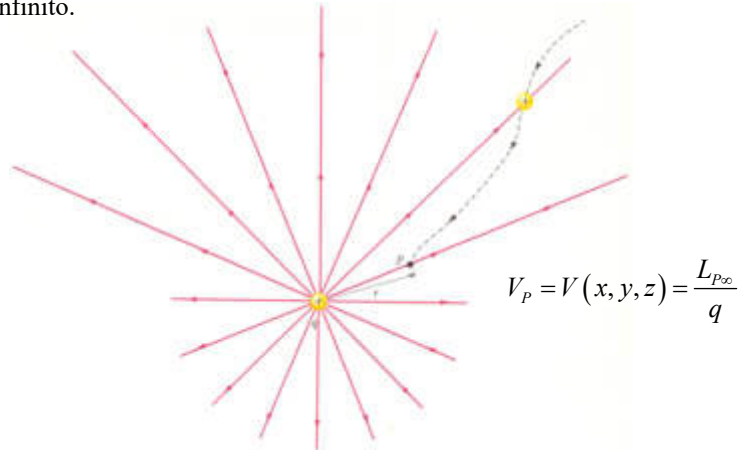


Significato di Potenziale elettrostatico



Interpretazione fisica

- Il potenziale nel punto $P(x,y,z)$ è uguale al lavoro che il campo elettrostatico compie per portare l'unità di carica positiva da P all'infinito.



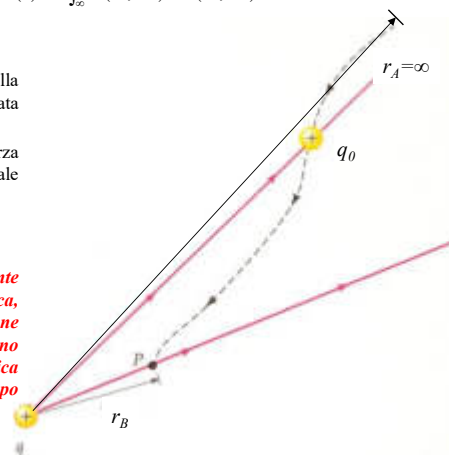
Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

168

Interpretazione fisica

$$\left. \begin{aligned} U(r_B) &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r_B} \\ U(r_A = \infty) &= 0 \end{aligned} \right\} \rightarrow U(r) = - \int_{\infty}^r \vec{F}(x, y, z) \cdot d\vec{l}(x, y, z)$$

- $U(r)$ è l'opposto del lavoro compiuto dalla forza elettrostatica quando q_0 viene portata dal punto A (molto lontano) al punto B.
- L'opposto del lavoro compiuto da una forza coincide con il lavoro compiuto "contro" tale forza.
- Si può, quindi, interpretare $U(r)$ come:
 - il lavoro compiuto (da un agente esterno) contro la forza elettrostatica, quando la particella di prova q_0 viene portata da un punto molto lontano fino ad una distanza r dalla carica puntiforme sorgente del campo elettrostatico



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

170

Gradiente di un vettore

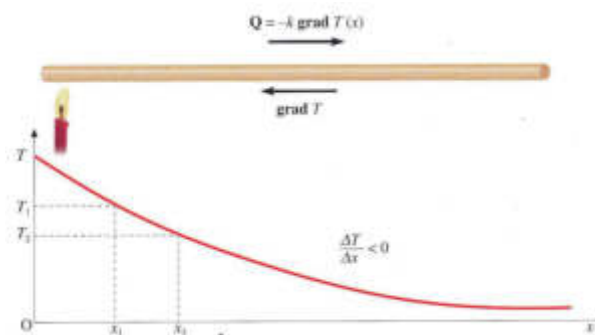


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

174

Gradiente vettoriale

- Consideriamo una funzione $f(x)$.
- Ipotizziamo, giusto per esempio, che $f(x)$ rappresenti l'andamento della temperatura lungo un filo metallico rettilineo: la direzione del filo fornisce l'asse x .



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

175

Gradiente vettoriale

- Se vogliamo descrivere la variazione (aumento o diminuzione) della grandezza $f(x)$ lungo la coordinata x , dobbiamo definire:
 - l'entità della variazione stessa
 - la direzione
 - il verso
- Dobbiamo, quindi, associare un *vettore* la variazione di $f(x)$



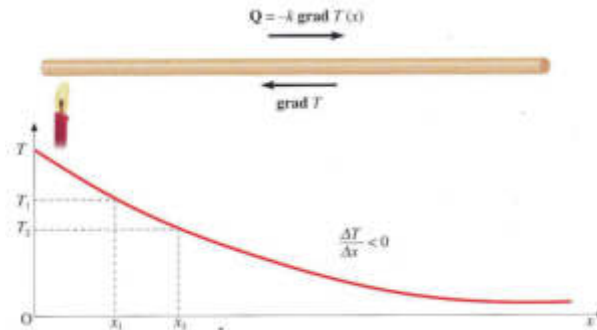
Gradiente vettoriale

- Definiamo *gradiente* della funzione scalare $f(x)$ il vettore $\vec{v}$
 - il cui modulo è dato dalla derivata di $f(x)$ rispetto ad x
 - la direzione è quella dell'asse x e
 - il verso quello per cui il rapporto incrementale risulta positivo:

$$\vec{v} = \overline{\text{grad}} f(x) \left\{ \begin{array}{l} \text{modulo: } \frac{df(x)}{dx} \\ \text{direzione: } \text{asse } x \\ \text{verso: } \frac{\Delta f(x)}{\Delta x} \end{array} \right.$$



Caso del filo di rame



- Il calore Q si diffonde seguendo la legge:

$$Q = k \frac{(T_1 - T_2)}{\Delta x} \rightarrow \vec{Q} = -k \overline{\text{grad } T(x)}$$

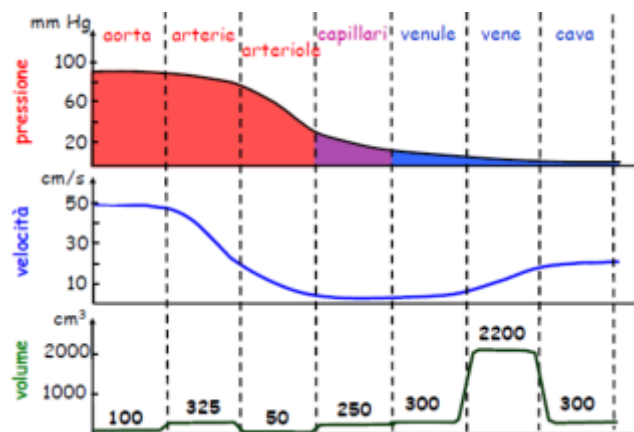


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

178

Gradiente vettoriale

- In modo analogo $f(x)$ può rappresentare i valori della pressione lungo un vaso sanguigno.



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

179

Gradiente vettoriale

- Più in generale una grandezza fisica scalare può variare da punto a punto nello spazio (ad esempio la temperatura in un ambiente) ed essere rappresentata da una funzione $f(x,y,z)$ dipendente da tre variabili indipendenti.
- In questo caso il vettore gradiente è definito tramite le derivate lungo i tre assi x , y e z :

$$\vec{v} = \overline{\text{grad}} f(x,y,z) \quad \left\{ \begin{array}{l} v_x = \frac{\partial f(x,y,z)}{\partial x} \\ v_y = \frac{\partial f(x,y,z)}{\partial y} \\ v_z = \frac{\partial f(x,y,z)}{\partial z} \end{array} \right.$$



Relazione tra $E(x,y,z)$ e $V(x,y,z)$



Relazione tra $E(x,y,z)$ e $V(x,y,z)$

- Il potenziale elettrostatico è ricavato dal lavoro compiuto dal campo elettrostatico per unità di carica è:

$$V(x_B, y_B, z_B) - V(x_A, y_A, z_A) = - \int_A^B \vec{E}(x, y, z) \cdot d\vec{l}(x, y, z)$$

- Oppure:

$$V(x, y, z) = - \int_{\infty}^{P(x,y,z)} \vec{E}(x, y, z) \cdot d\vec{l}(x, y, z)$$

$$\text{se } V(x_A, y_A, z_A) = V_{\infty} = 0$$

- $V(x,y,z)$ può essere calcolato conoscendo $E(x,y,z)$ ed integrando
- $V(x,y,z)$ può essere calcolato partendo direttamente dalla distribuzione delle cariche sorgenti
- Possiamo ricavare $E(x,y,z)$ partendo da $V(x,y,z)$? ←



Relazione tra $E(x,y,z)$ e $V(x,y,z)$

- Il potenziale elettrostatico è ricavato dal lavoro compiuto dal campo elettrostatico per unità di carica

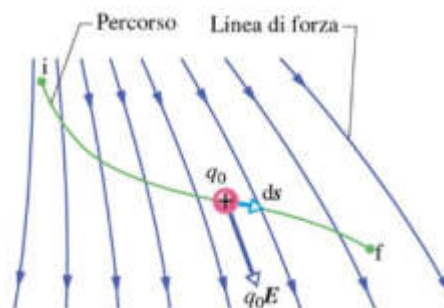
$$V(x_B, y_B, z_B) - V(x_A, y_A, z_A) = - \int_A^B \vec{E}(x, y, z) \cdot d\vec{l}(x, y, z)$$

- Si può dimostrare che ciascuna componente del campo elettrostatico può essere calcolata a partire dal potenziale elettrostatico:

$$E_x(x, y, z) = - \frac{\partial V(x, y, z)}{\partial x}$$

$$E_y(x, y, z) = - \frac{\partial V(x, y, z)}{\partial y}$$

$$E_z(x, y, z) = - \frac{\partial V(x, y, z)}{\partial z}$$



Relazione tra $E(x,y,z)$ e $V(x,y,z)$

$$E_x(x,y,z) = -\frac{\partial V(x,y,z)}{\partial x}$$

$$E_y(x,y,z) = -\frac{\partial V(x,y,z)}{\partial y}$$

$$E_z(x,y,z) = -\frac{\partial V(x,y,z)}{\partial z}$$

- Ricordando la definizione di gradiente, possiamo scrivere:

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V(x,y,z)$$

- Il concetto di potenziale elettrico è importante poiché, oltre a possedere un significato intrinseco legato al lavoro delle forze del campo, permette di evitare la complicazione della trattazione vettoriale.

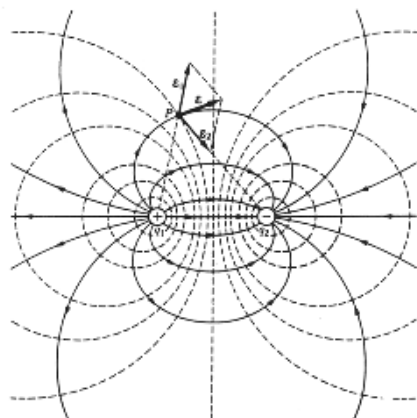


Additività del potenziale elettrostatico

- Il potenziale elettrostatico è additivo.
- Nel caso che il campo elettrostatico sia generato da più cariche, il potenziale in un punto è dato dalla **somma algebrica** dei potenziali dovuti alle singole cariche.



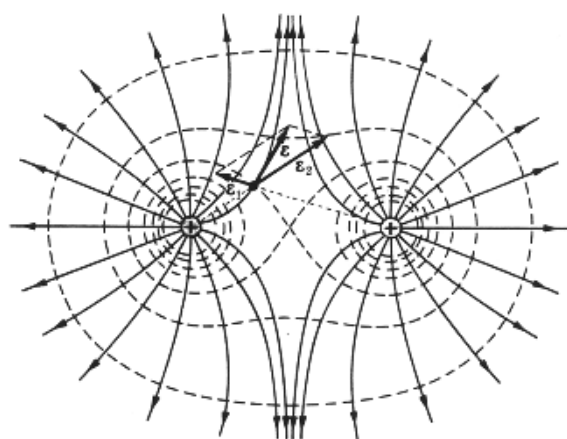
Visualizzazione del potenziale (1)



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

188

Visualizzazione del potenziale (2)



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

189