Complementi di Fisica - I Lezione

Introduzione e informazioni sul corso
Forza tra cariche elettriche: legge di Coulomb
Campo elettrico generato da cariche puntiformi

Andrea Bettucci

3 marzo 2023

Dipartimento di Scienze di Base e Applicate per l'Ingegneria
Sapienza Università di Roma

Introduzione e informazioni sul corso

Complementi di Algebra Lineare, Analisi Matematica e Fisica

- Geometria differenziale: 2 CFU - Prof. Andrea Vietri
- Analisi matematica III: 3 CFU - Prof. Virginia De Cicco
- Complementi di Fisica Generale: 3 CFU - Prof. Andrea Bettucci

Complementi di Algebra Lineare, Analisi Matematica e Fisica

- Geometria differenziale: 2 CFU - Prof. Andrea Vietri
- Analisi matematica III: 3 CFU - Prof. Virginia De Cicco
- Complementi di Fisica Generale: 3 CFU - Prof. Andrea Bettucci

Tutte le informazioni sul corso, comprese le slides delle lezione e le prove di autovalutazione, sono presenti alla pagina: https://www.sbai.uniroma1.it/bettucci-andrea/complementi-di-fisica-generale/2022-2023

- Venerdì 08:00 - 10:00: lezione.
- Lunedì 10:00 - 11:00: esercitazioni.
- Ricevimento su appuntamento (sempre) andrea.bettucci@uniroma1.it

Argomento del corso

Studio di alcuni fenomeni fisici legati alla presenza di cariche elettriche nello spazio.

- Cariche $\Rightarrow$ Campo elettrico.
- Cariche in movimento (corrente) $\Rightarrow$ Campo magnetico.

Campo di forze

Nelle interazioni a distanza è la regione dello spazio in ogni punto della quale si risente di una forza.

Forza tra cariche elettriche: legge di Coulomb

La carica elettrica q

- La carica elettrica è una proprietà intrinseca della materia (come la massa).
- La carica elettrica esiste in due diverse forme: positiva e negativa.
- L'unità di misura della carica elettrica è il coulomb (C).
- 1 C è una carica enorme; ad esempio la carica di un elettrone è:

$$\mathrm{e} \simeq 1{,}6 \times 10^{-19}\,\mathrm{C}.$$

- Per questo motivo vengono comunemente usati sottomultipli del coulomb:

$$1\,\mathrm{mC} = 10^{-3}\,\mathrm{C}$$
$$1\,\mu\mathrm{C} = 10^{-6}\,\mathrm{C}$$
$$1\,\mathrm{nC} = 10^{-9}\,\mathrm{C}$$
$$1\,\mathrm{pC} = 10^{-12}\,\mathrm{C}$$

La carica elettrica q

- **La carica elettrica si conserva** - Se in processo viene prodotta una certa quantità di carica di un tipo, necessariamente deve essere prodotta anche una medesima quantità di carica dell'altro tipo in moto che la carica *netta* prodotta sia nulla.
- **La carica elettrica è quantizzata** - La carica totale di un corpo è nulla oppure un multiplo intero di $+e$ o $-e$: la carica elettrica può variare solo per quantità finite.

La carica elettrica q

- **La carica elettrica si conserva** - Se in processo viene prodotta una certa quantità di carica di un tipo, necessariamente deve essere prodotta anche una medesima quantità di carica dell'altro tipo in moto che la carica *netta* prodotta sia nulla.
- **La carica elettrica è quantizzata** - La carica totale di un corpo è nulla oppure un multiplo intero di $+e$ o $-e$: la carica elettrica può variare solo per quantità finite.

Conduttori e isolanti

- **Isolanti** - Sono caratterizzati dal fatto che la cariche create in un punto vi restano localizzate.
- **Conduttori** - In essi le cariche elettriche hanno la possibilità di muoversi; ad esempio, cariche dello stesso tipo create in un punto tendono ad allontanarsi reciprocamente il più possibile per effetto delle mutue azioni repulsive. I metalli sono tipici conduttori.

La corrente i

- Una corrente è costituita da un flusso di cariche .
- L'unità di misura dell'intensità corrente è l'**ampère (A)**.
- Vi è una relazione tra l'intensità della corrente costante i in un conduttore filiforme e la quantità di carica q che passa attraverso una sezione del conduttore in un tempo t:

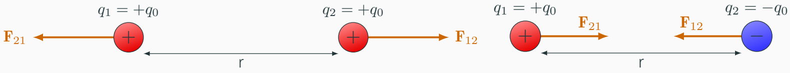
$$i = \frac{q}{t}.$$

  Una qualsiasi sezione di un conduttore filiforme percorso da una corrente di $1\,\mathrm{A}$ è attraversata da $1\,\mathrm{C}$ al secondo.

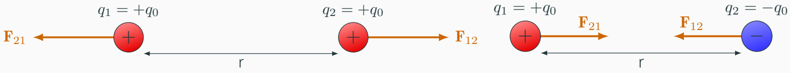
- Esempi di effetti sul corpo umano di correnti con diverse intensità:

$3\,\mathrm{mA}$	soglia della percezione
$10\,\mathrm{mA}$	soglia del dolore
$30\,\mathrm{mA}$	blocco respiratorio
$10\,\mathrm{A}$	rete a 220 V

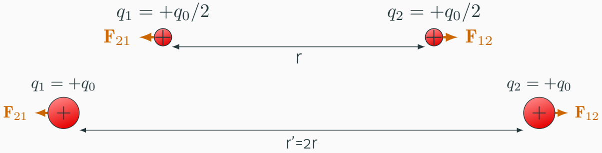
- Due cariche puntiformi si scambiano forze dirette lungo la loro congiungente: cariche dello stesso segno si respingono, cariche di segno opposto si attraggono.



- Due cariche puntiformi si scambiano forze dirette lungo la loro congiungente: cariche dello stesso segno si respingono, cariche di segno opposto si attraggono.



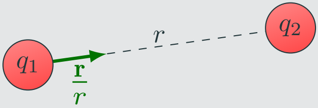
- La forza è proporzionale al prodotto delle cariche ed è inversamente proporzionale al quadrato della distanza.



Legge di Coulomb nel vuoto

La forza che si esercita tra due cariche puntiformi è diretta lungo la congiungente le due cariche. La forza è direttamente proporzionale al prodotto delle cariche e inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza. Cariche dello stesso segno si respingono, si attraggono se di segno opposto

$$\mathbf{F} = K\frac{q_1 q_2}{r^2}\frac{\mathbf{r}}{r}$$



Sperimentalmente si trova

$$K \simeq 9 \times 10^{9}\,\mathrm{Nm^2C^{-2}}.$$

Si è soliti scrivere la costante K nella forma

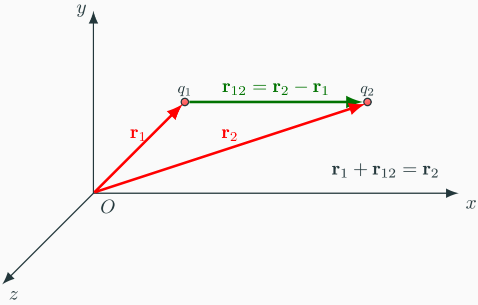
$$K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

dove ϵ_0 è detta costante dielettrica del vuoto

$$\epsilon_0 = 8{,}85 \times 10^{-12}\,\mathrm{C^2N^{-1}m^{-2}}.$$

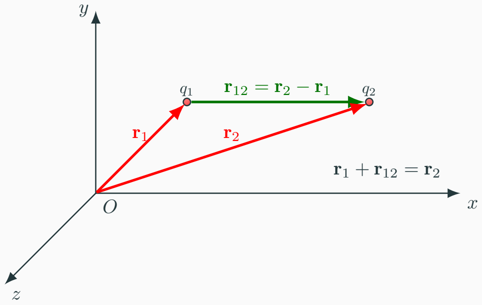
Legge di Coulomb nel vuoto

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



La forza che q_1 esercita su q_2 è:

$$\mathbf{F}_{12} = K\frac{q_1 q_2}{r_{12}^2}\frac{\mathbf{r}_{12}}{r_{12}} \quad \Rightarrow \quad F_{12} = K\frac{|q_1 q_2|}{r_{12}^2}$$



La forza che q_1 esercita su q_2 è:

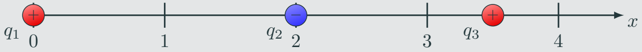
$$\mathbf{F}_{12} = K \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \frac{\mathbf{r}_{12}}{r_{12}} \quad \Rightarrow \quad F_{12} = K \frac{|q_1 q_2|}{r_{12}^2}$$

Principio di sovrapposizione delle forze

Se si hanno più cariche puntiformi, la forza su una di esse è la risultante di quelle che ciascuna delle altre eserciterebbe qualora agisse da sola.

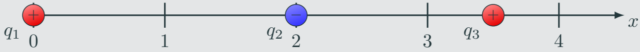
Esercizio

Tre cariche puntiformi sono disposte lungo l'asse x: q_1 è posta nell'origine dell'asse; q_2 si trova in $x = 2{,}0\,\text{m}$ e q_3 in $x = 3{,}5\,\text{m}$. Si determini la forza totale su q_3. ($q_1 = 25\,\text{nC}$; $q_2 = -10\,\text{nC}$; $q_3 = 20\,\text{nC}$.)



Esercizio

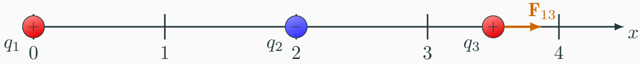
Tre cariche puntiformi sono disposte lungo l'asse x: q_1 è posta nell'origine dell'asse; q_2 si trova in $x = 2{,}0\,\mathrm{m}$ e q_3 in $x = 3{,}5\,\mathrm{m}$. Si determini la forza totale su q_3. ($q_1 = 25\,\mathrm{nC}$; $q_2 = -10\,\mathrm{nC}$; $q_3 = 20\,\mathrm{nC}$.)



La forza che q_1 esercita su q_3 è:

$$\mathbf{F}_{13} = K\frac{q_1 q_3}{r_{13}^2}\mathbf{i} = \frac{(9\times 10^9\,\mathrm{Nm^2C^{-2}})(25\times 10^{-9}\,\mathrm{C})(20\times 10^{-9}\,\mathrm{C})}{(3{,}5\,\mathrm{m})^2}\mathbf{i} =$$

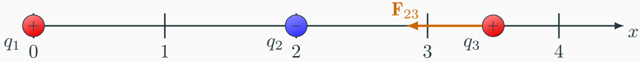
$$= (0{,}37\times 10^{-6}\,\mathrm{N})\mathbf{i}.$$



La forza che q_2 esercita su q_3 è:

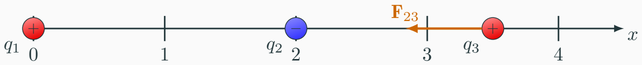
$$\mathbf{F}_{23} = K\frac{q_2 q_3}{r_{23}^2}\mathbf{i} = \frac{(9 \times 10^9\,\mathrm{Nm^2C^{-2}})(-10 \times 10^{-9}\,\mathrm{C})(20 \times 10^{-9}\,\mathrm{C})}{(1{,}5\,\mathrm{m})^2}\mathbf{i} =$$

$$= -(0{,}80 \times 10^{-6}\,\mathrm{N})\mathbf{i}.$$



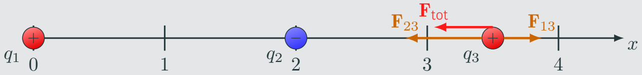
La forza che q_2 esercita su q_3 è:

$$\mathbf{F}_{23} = K\frac{q_2 q_3}{r_{23}^2}\mathbf{i} = \frac{(9\times 10^{9}\,\mathrm{Nm^2C^{-2}})(-10\times 10^{-9}\,\mathrm{C})(20\times 10^{-9}\,\mathrm{C})}{(1{,}5\,\mathrm{m})^2}\mathbf{i} =$$
$$= -(0{,}80\times 10^{-6}\,\mathrm{N})\mathbf{i}.$$



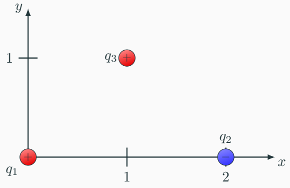
In conclusione, la forza totale che si esercita su q_3 è determinata

$$\mathbf{F}_{\mathrm{tot}} = \mathbf{F}_{13}+\mathbf{F}_{23} = (0{,}37\times 10^{-6}\,\mathrm{N})\mathbf{i} - (0{,}80\times 10^{-6}\,\mathrm{N})\mathbf{i} = -(0{,}43\times 10^{-6}\,\mathrm{N})\mathbf{i}$$



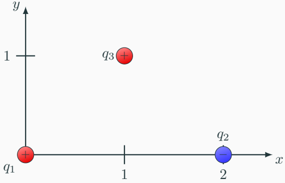
Esercizio

Rispetto a un sistema di riferimento O, x, y, le coordinate di tre cariche puntiformi q_1, q_2 e q_3 sono $(0, 0)$, $(2, 0)$ e $(1, 1)$, rispettivamente. Si determini modulo e direzione della forza sulla carica q_3. ($q_1 = 2\,$nC; $q_2 = -10\,$nC; $q_3 = 10\,$nC)



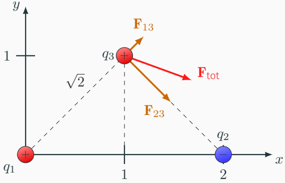
Esercizio

Rispetto a un sistema di riferimento O, x, y, le coordinate di tre cariche puntiformi q_1, q_2 e q_3 sono $(0, 0)$, $(2, 0)$ e $(1, 1)$, rispettivamente. Si determini modulo e direzione della forza sulla carica q_3. ($q_1 = 2\,\text{nC}$; $q_2 = -10\,\text{nC}$; $q_3 = 10\,\text{nC}$)



$$\mathbf{F}_{13} = K \frac{q_1 q_3}{r_{13}^2} \frac{\mathbf{r}_{13}}{r_{13}} \qquad \mathbf{F}_{23} = K \frac{q_2 q_3}{r_{23}^2} \frac{\mathbf{r}_{23}}{r_{23}}$$

$$F_{13} = 9 \times 10^{-8}\,\text{N} \qquad F_{23} = 4{,}5 \times 10^{-7}\,\text{N}$$



$$\mathbf{F}_{\text{tot}} = \mathbf{F}_{13} + \mathbf{F}_{23}$$

Quali sono il modulo e la direzione di $\mathbf{F}_{\text{tot}}$?

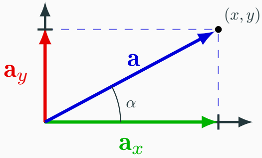
Quali sono il modulo e la direzione di $\mathbf{F}_{\text{tot}}$?

Decomposizione di un vettore

Un vettore applicato $\mathbf{a}$ è determinato dalla conoscenza delle sue componenti rispetto a un sistema di riferimento.

$$a_x = a\cos\alpha \qquad a_y = a\sin\alpha$$

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} \qquad \tan\alpha = \frac{a_y}{a_x}$$



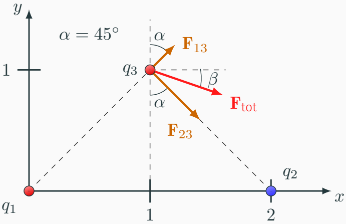
I moduli delle componenti di $\mathbf{F}_{13}$ e $\mathbf{F}_{23}$ lungo gli asssi x ed y sono:

$$F_{13x} = F_{13} \sin\alpha \simeq 6{,}4 \times 10^{-8}\,\mathsf{N}$$

$$F_{13y} = F_{13} \cos\alpha \simeq 6{,}4 \times 10^{-8}\,\mathsf{N}$$

$$F_{23x} = F_{23} \sin\alpha \simeq 3{,}2 \times 10^{-7}\,\mathsf{N}$$

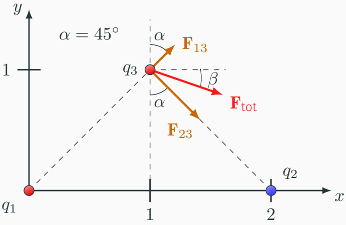
$$F_{23y} = F_{23} \cos\alpha \simeq 3{,}2 \times 10^{-7}\,\mathsf{N}$$



I moduli delle componenti di $\mathbf{F}_{13}$ e $\mathbf{F}_{23}$ lungo gli asssi x ed y sono:

$$F_{13x} = F_{13} \sin\alpha \simeq 6{,}4 \times 10^{-8}\,\mathrm{N}$$
$$F_{13y} = F_{13} \cos\alpha \simeq 6{,}4 \times 10^{-8}\,\mathrm{N}$$

$$F_{23x} = F_{23} \sin\alpha \simeq 3{,}2 \times 10^{-7}\,\mathrm{N}$$
$$F_{23y} = F_{23} \cos\alpha \simeq 3{,}2 \times 10^{-7}\,\mathrm{N}$$



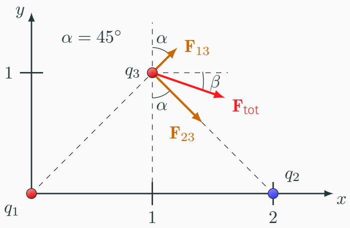
Le componenti di $\mathbf{F}_{\mathrm{tot}}$ sono:

$$\mathbf{F}_{\mathrm{tot}\,x} = (F_{13x} + F_{23x})\mathbf{i} \simeq (+3{,}8 \times 10^{-7}\,\mathrm{N})\mathbf{i} \quad \Rightarrow \quad F_{\mathrm{tot}\,x} =\simeq 3{,}8 \times 10^{-7}\,\mathrm{N}$$
$$\mathbf{F}_{\mathrm{tot}\,y} = (F_{13y} - F_{23y})\mathbf{j} \simeq (-2{,}6 \times 10^{-7}\,\mathrm{N})\mathbf{j} \quad \Rightarrow \quad F_{\mathrm{tot}\,y} =\simeq 2{,}6 \times 10^{-7}\,\mathrm{N}$$

I moduli delle componenti di $\mathbf{F}_{13}$ e $\mathbf{F}_{23}$ lungo gli asssi x ed y sono:

$$F_{13x} = F_{13} \sin\alpha \simeq 6{,}4 \times 10^{-8}\,\mathrm{N}$$
$$F_{13y} = F_{13} \cos\alpha \simeq 6{,}4 \times 10^{-8}\,\mathrm{N}$$

$$F_{23x} = F_{23} \sin\alpha \simeq 3{,}2 \times 10^{-7}\,\mathrm{N}$$
$$F_{23y} = F_{23} \cos\alpha \simeq 3{,}2 \times 10^{-7}\,\mathrm{N}$$



Le componenti di $\mathbf{F}_{\text{tot}}$ sono:

$$\mathbf{F}_{\text{tot}\,x} = (F_{13x} + F_{23x})\mathbf{i} \simeq (+3{,}8 \times 10^{-7}\,\mathrm{N})\mathbf{i} \quad \Rightarrow \quad F_{\text{tot}\,x} =\simeq 3{,}8 \times 10^{-7}\,\mathrm{N}$$
$$\mathbf{F}_{\text{tot}\,y} = (F_{13y} - F_{23y})\mathbf{j} \simeq (-2{,}6 \times 10^{-7}\,\mathrm{N})\mathbf{j} \quad \Rightarrow \quad F_{\text{tot}\,y} =\simeq 2{,}6 \times 10^{-7}\,\mathrm{N}$$

In conclusione, modulo e direzione di $\mathbf{F}_{\text{tot}}$ sono determinati

$$F_{\text{tot}} = \sqrt{F_{\text{tot}\,x}^2 + F_{\text{tot}\,y}^2} = 4{,}6 \times 10^{-7}\,\mathrm{N} \qquad \tan\beta = \frac{F_{\text{tot}\,y}}{F_{\text{tot}\,x}} \simeq 0,68 \to \beta \simeq 34^\circ$$

Campo elettrico
creato da cariche puntiformi

- La forza di Coulomb è una forza che agisce a distanza.
- Ogni carica Q produce un campo elettrico che pervade l'intero spazio: se una carica q viene posta in un punto P dello spazio, risente di una forza su di essa esercitata dal campo elettrico esistente in quel punto creato da Q.

- La forza di Coulomb è una forza che agisce a distanza.
- Ogni carica Q produce un campo elettrico che pervade l'intero spazio: se una carica q viene posta in un punto P dello spazio, risente di una forza su di essa esercitata dal campo elettrico esistente in quel punto creato da Q.

Il campo elettrico

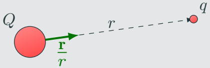
Il campo elettrico $\mathbf{E}$ creato da una o più cariche in un punto dello spazio è uguale alla forza $\mathbf{F}$ agente su una piccola carica di prova positiva q posta in quel punto divisa per q:

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q}.$$

La carica q deve essere così piccola ($q \to 0$) da non esercitare alcuna forza sulle cariche che generano il campo, cosicché $\mathbf{E}$ in un punto dello spazio descrive solo l'effetto in quel punto delle cariche che creano il campo.

Campo elettrico creato da una singola carica puntiforme Q

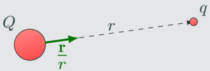
Data una carica puntiforme Q, posta una carica q ($q \to 0$) a distanza r da Q si ha:



$$\mathbf{F} = K\frac{Qq}{r^2}\frac{\mathbf{r}}{r} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{E} = K\frac{Q}{r^2}\frac{\mathbf{r}}{r} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}\frac{\mathbf{r}}{r}$$

Campo elettrico creato da una singola carica puntiforme Q

Data una carica puntiforme Q, posta una carica q $(q \to 0)$ a distanza r da Q si ha:



$$\mathbf{F} = K\frac{Qq}{r^2}\frac{\mathbf{r}}{r} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{E} = K\frac{Q}{r^2}\frac{\mathbf{r}}{r} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}\frac{\mathbf{r}}{r}$$

- Il campo elettrico è proporzionale alla carica Q che lo genera.
- Il vettore campo elettrico è diretto radialmente: ha il verso di $\mathbf{r}$ per $Q > 0$ e verso opposto a quello di $\mathbf{r}$ per $Q < 0$.
- L'intensità del campo elettrico decresce in maniera inversamente proporzionale al quadrato della distanza:

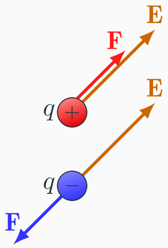
$$E = K\frac{Q}{r^2}.$$

- Noto il campo elettrico $\mathbf{E}$ in un punto dello spazio, la forza agente su una generica carica q posta in quel punto è:

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

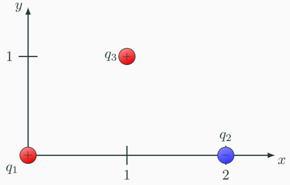
L'espressione è valida anche se q non è piccola purché la sua presenza non modifichi la posizione delle cariche che generano il campo elettrico.

- Se $q > 0$ la forza $\mathbf{F}$ e il campo $\mathbf{E}$ sono concordi.
- Se $q < 0$ la forza $\mathbf{F}$ e il campo $\mathbf{E}$ sono discordi.



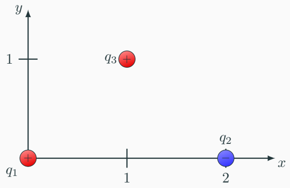
Esercizio

Rispetto a un sistema di riferimento O, x, y, le coordinate di tre cariche puntiformi q_1, q_2 e q_3 sono $(0, 0)$, $(2, 0)$ e $(1, 1)$, rispettivamente. Si determini modulo e direzione della forza sulla carica q_3 **utilizzando il campo elettrico**. ($q_1 = 2\,$nC; $q_2 = -10\,$nC; $q_3 = 10\,$nC)



Esercizio

Rispetto a un sistema di riferimento O, x, y, le coordinate di tre cariche puntiformi q_1, q_2 e q_3 sono $(0,0)$, $(2,0)$ e $(1,1)$, rispettivamente. Si determini modulo e direzione della forza sulla carica q_3 **utilizzando il campo elettrico**. ($q_1 = 2\,\text{nC}$; $q_2 = -10\,\text{nC}$; $q_3 = 10\,\text{nC}$)



Soluzione

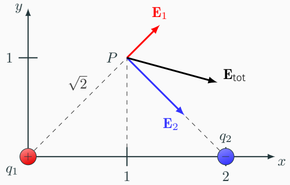
1. Determinare il campi elettrici $\mathbf{E}_1$ ed $\mathbf{E}_2$ creati separatamente da q_1 e da q_2 nel punto dove si trova la carica q_3.
2. $\mathbf{E}_{\text{tot}} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2$.
   Vale il principio di sovrapposizione dei campi elettrici!
3. $\mathbf{F} = q_3 \mathbf{E}_{\text{tot}}$.

Campo elettrico creato da una carica Q in un punto P dello spazio individuato dal vettore $\mathbf{r}$ che va da Q a P:

$$\mathbf{E} = K\frac{Q}{r^2}\frac{\mathbf{r}}{r}.$$

$$\mathbf{E}_1(P) = K\frac{q_1}{r_{13}^2}\frac{\mathbf{r}_{13}}{r_{13}} \qquad \mathbf{E}_2(P) = K\frac{q_2}{r_{23}^2}\frac{\mathbf{r}_{23}}{r_{23}}$$

$$E_1(P) = 9\,\mathrm{N/C} \qquad E_2(P) = 45\,\mathrm{N/C}$$



$$\mathbf{E}_{\text{tot}} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2.$$

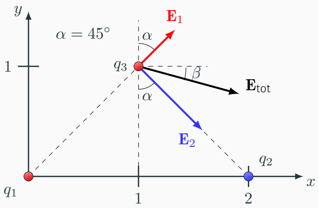
La determinazione di $\mathbf{E}_{\text{tot}}$ richiede la conoscenza delle componenti di $\mathbf{E}_1$ ed $\mathbf{E}_2$ lungo gli assi x ed y.

$$E_{1x} = E_1 \sin\alpha \simeq 6{,}4\,\mathsf{N/C}$$

$$E_{1y} = E_1 \cos\alpha \simeq 6{,}4\,\mathsf{N/C}$$

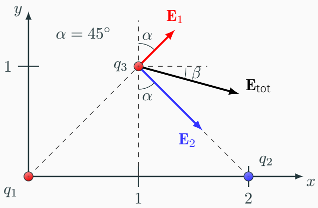
$$E_{2x} = E_2 \sin\alpha \simeq 31{,}8\,\mathsf{N/C}$$

$$E_{2y} = E_2 \cos\alpha \simeq 31{,}8\,\mathsf{N/C}$$



$$E_{1x} = E_1 \sin\alpha \simeq 6{,}4\,\mathrm{N/C}$$

$$E_{1y} = E_1 \cos\alpha \simeq 6{,}4\,\mathrm{N/C}$$



$$E_{2x} = E_2 \sin\alpha \simeq 31{,}8\,\mathrm{N/C}$$

$$E_{2y} = E_2 \cos\alpha \simeq 31{,}8\,\mathrm{N/C}$$

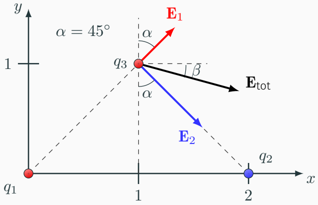
Le componenti di $\mathbf{E}_{\text{tot}}$ sono:

$$\mathbf{E}_{\text{tot}\,x} = (E_{1x} + E_{2x})\mathbf{i} \simeq (+38{,}2\,\mathrm{N/C})\mathbf{i} \quad \Rightarrow \quad E_{\text{tot}\,x} =\simeq 38{,}2\,\mathrm{N/C}$$

$$\mathbf{E}_{\text{tot}\,y} = (E_{1y} - E_{2y})\mathbf{j} \simeq (-25{,}4\,\mathrm{N/C})\mathbf{j} \quad \Rightarrow \quad E_{\text{tot}\,y} =\simeq 25{,}4\,\mathrm{N/C}$$

$$E_{1x} = E_1 \sin\alpha \simeq 6{,}4\,\mathrm{N/C}$$
$$E_{1y} = E_1 \cos\alpha \simeq 6{,}4\,\mathrm{N/C}$$

$$E_{2x} = E_2 \sin\alpha \simeq 31{,}8\,\mathrm{N/C}$$
$$E_{2y} = E_2 \cos\alpha \simeq 31{,}8\,\mathrm{N/C}$$



Le componenti di $\mathbf{E}_{\mathrm{tot}}$ sono:

$$\mathbf{E}_{\mathrm{tot}\,x} = (E_{1x} + E_{2x})\mathbf{i} \simeq (+38{,}2\,\mathrm{N/C})\mathbf{i} \quad \Rightarrow \quad E_{\mathrm{tot}\,x} =\simeq 38{,}2\,\mathrm{N/C}$$
$$\mathbf{E}_{\mathrm{tot}\,y} = (E_{1y} - E_{2y})\mathbf{j} \simeq (-25{,}4\,\mathrm{N/C})\mathbf{j} \quad \Rightarrow \quad E_{\mathrm{tot}\,y} =\simeq 25{,}4\,\mathrm{N/C}$$

In conclusione, modulo e direzione di $\mathbf{E}_{\mathrm{tot}}$ e $\mathbf{F}_{\mathrm{tot}}$ sono determinati

$$E_{\mathrm{tot}} = \sqrt{E_{\mathrm{tot}\,x}^2 + E_{\mathrm{tot}\,y}^2} = 45{,}8\,\mathrm{N/C} \qquad \tan\beta = \frac{E_{\mathrm{tot}\,y}}{E_{\mathrm{tot}\,x}} \simeq 0,68 \to \beta \simeq 34°$$

$F_{\mathrm{tot}} = q_3 E_{\mathrm{tot}} = 4{,}6 \times 10^{-7}$ N diretta come $\mathbf{E}_{\mathrm{tot}}$.