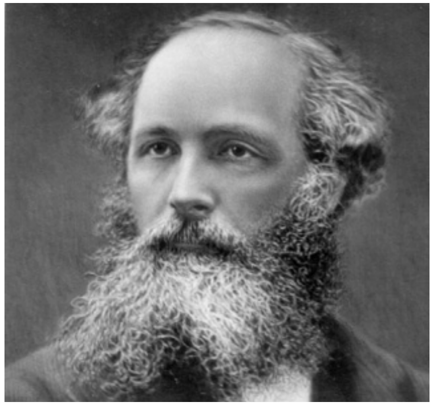
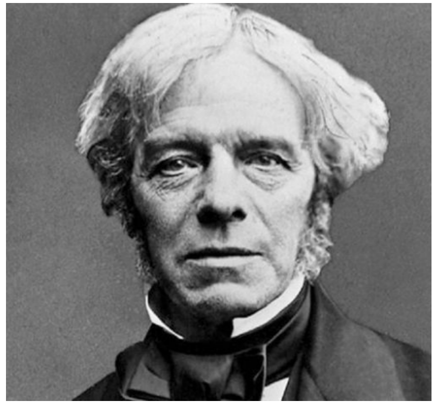
Física 2 para ciencias químicas a distancia
FCEN – UBA - 2 Cuatrimestre 2021

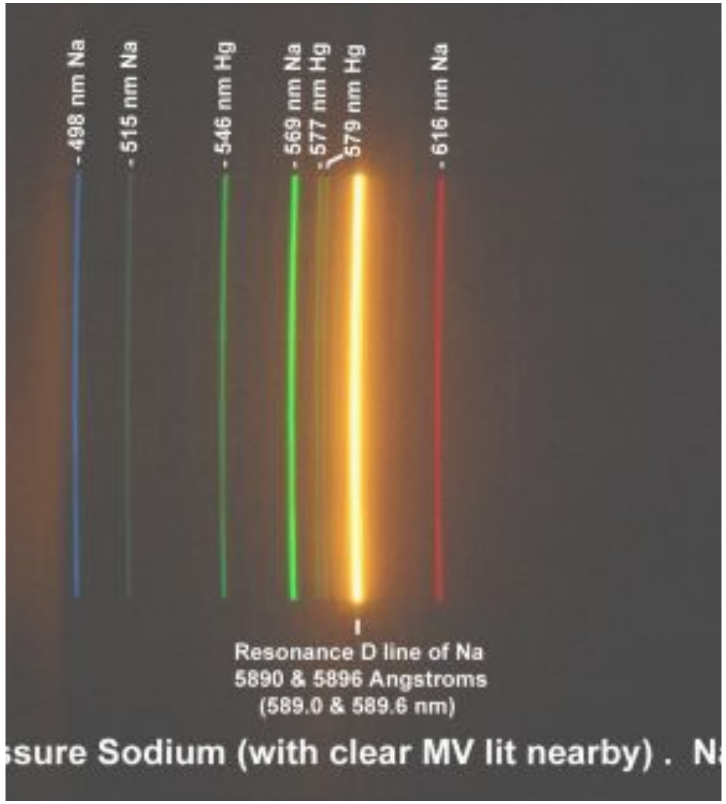
César Bertucci

cbertucci@iafe.uba.ar





EXACTAS UBA



Programa

- Electrostática.
- Conductores, capacidad. Dieléctricos o aislantes.
- Ley de Ohm. Circuitos de corriente continua
- Magnetismo
- Inducción electromagnética
- Circuitos de corriente alterna
- Ondas electromagnéticas
- Interferencia
- Difracción
- Polarización

Links útiles

- Página de la materia
  https://materias.df.uba.ar/f2qa2021c2/

- Campus Virtual:
  https://campus.exactas.uba.ar

- Canal del DF UBA en Youtube:
  https://www.youtube.com/channel/UCQ6bzKVkLIqwYUpzyUDx4qg

Bibliografía

- Purcell, E., *Electricidad y Magnetismo*, Berkeley Physics Course, Vol. 2, Reverté
- Hecht, E., Óptica, Addison-Wesley

- Bibliografía accesoria
  - Rodríguez Trelles, F., *Temas de Electricidad y Magnetismo*, Eudeba
  - Roederer, J., *Electromagnetismo Elemental*, Eudeba
  - Tipler, P. A., Física para la ciencia y la tecnología, Vol. 2, Reverté
  - Alonso, M., Finn, E., *Física*, Vol. 2, Addison-Wesley
  - Jenkins, F. A., White, H. E., *Fundamentals of Optics*, McGraw-Hill
  - Crawford, F., Ondas, Berkeley Physics Course, Vol. 3, Reverté

Breve historia del Electromagnetismo

- 1770-90: Cavendish y Coulomb establecen los fundamentos de la electrostática.
- 1820: Oersted establece conexión entre magnetismo y corriente eléctrica.
- 1820s: Ampère identifica a las corrientes como la fuente de todo magnetismo (incluso imanes).
- 1831: Faraday descubre que campos magnéticos variables en el tiempo son fuente de campos eléctricos.
- 1864: Maxwell junta todo en cuatro ecuaciones
- 1887: Hertz demuestra la existencia de radiación electromagnética.

Electrostática

La carga eléctrica

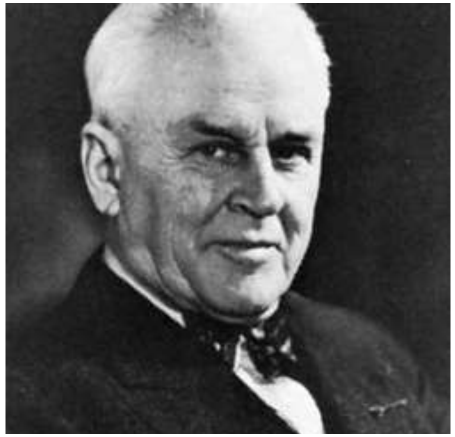
Electrostática

Experimentos fundacionales

- Descubrimiento de los protones (Goldstein,1886; Rutherford 1899).
- Descubrimiento del electrón a partir de rayos catódicos (Thomson, 1896)
- Modelo del átomo como núcleo y electrones (Rutherford, 1911)
- Cuantización de la carga (Milikan & Fletcher 1909).


Joseph Thomson


Ernest Rutherford


Robert Milikan

La carga eléctrica

- Característica fundamental de la materia, junto con la masa. Existe en dos versiones: positiva y negativa
- Los portadores de carga son los **protones (positiva)** y los **electrones (negativa)**. Ambos tienen carga

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

- En átomos y moléculas neutros las cargas positivas y negativas se compensan.
- Un exceso de carga en un cuerpo implica que este está cargado con una carga Q.

Leyes fundamentales de la electrostática

- **Ley de cuantización de la carga :**

Toda carga Q es siempre múltiplo de la carga elemental e.

- **Ley de conservación de la carga**:

La carga eléctrica neta de un sistema aislado es siempre la misma

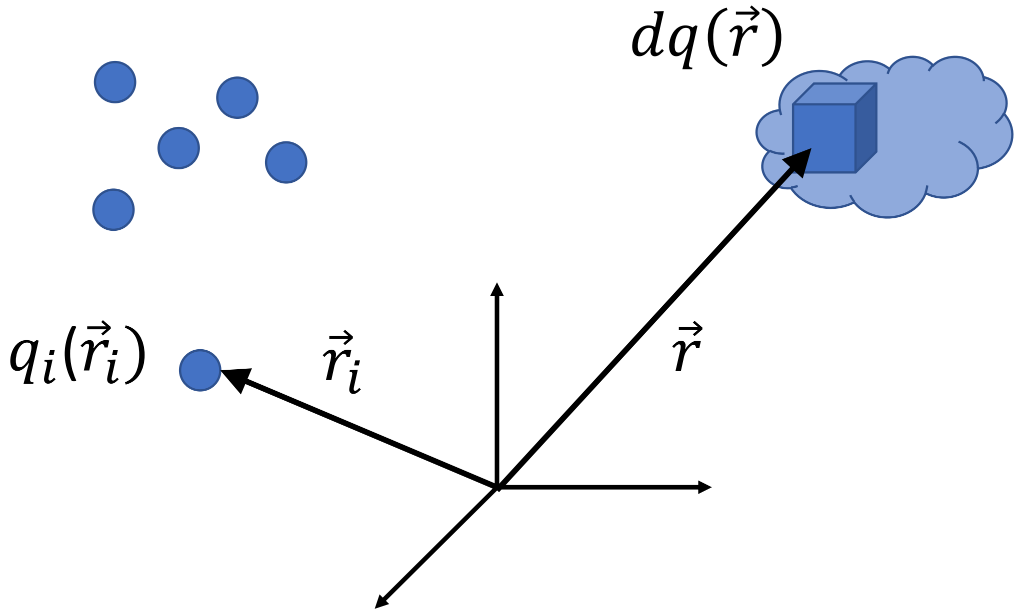
- **Ley de Coulomb**:

Dos cargas eléctricas en reposo se repelen o atraen entre sí con una fuerza proporcional al producto de sus cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa.

Representaciones de la carga

Puntuales
(discretas)

Distribución continua
de cargas

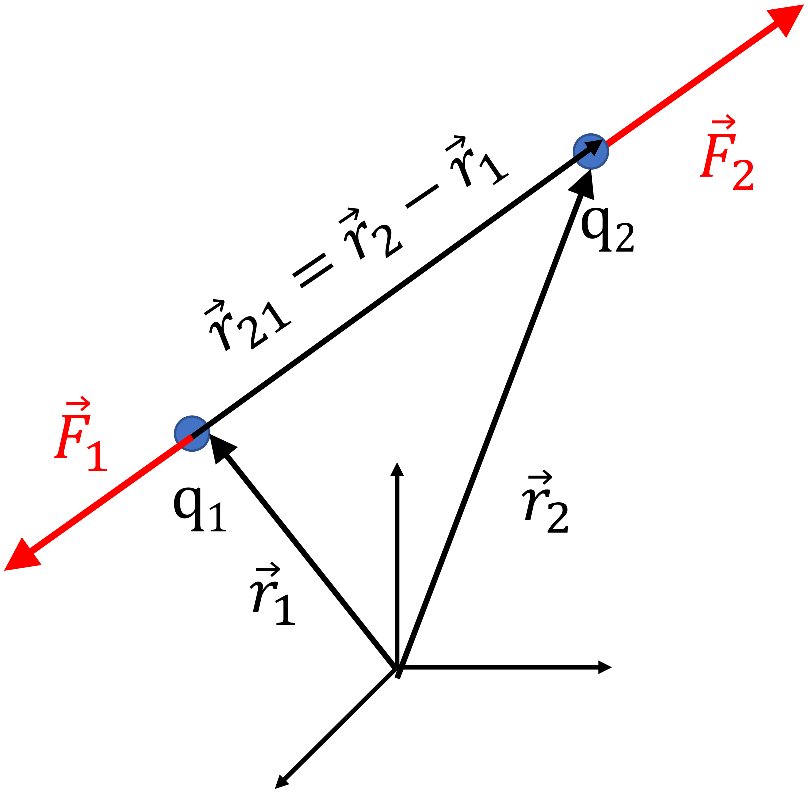


Ley de Coulomb

Charles Augustin de Coulomb
1736-1806

Electrostática

Ley de Coulomb



- La fuerza experimentada por q_2:

$$\vec{F}_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{q_1 q_2 \hat{r}_{21}}{r_{21}^2}$$

$\hat{r}_{21}$ es el vector unitario de q_1 a q_2

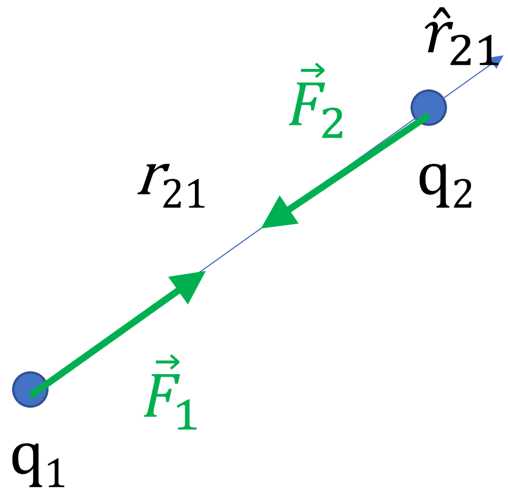
$$\hat{r}_{21} = \frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_1}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|}$$

- La fuerza eléctrica es Newtoniana

$$\vec{F}_2 = -\vec{F}_1$$

- **Cargas de igual signo se repelen**

Ley de Coulomb



- La fuerza experimentada por q_2:

$$\vec{F}_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{q_1 q_2 \hat{r}_{21}}{r_{21}}$$

$\hat{r}_{21}$ es el vector unitario de q_1 a q_2

- La fuerza eléctrica es Newtoniana

$$\vec{F}_2 = -\vec{F}_1$$

- **Cargas de signo opuesto se atraen**

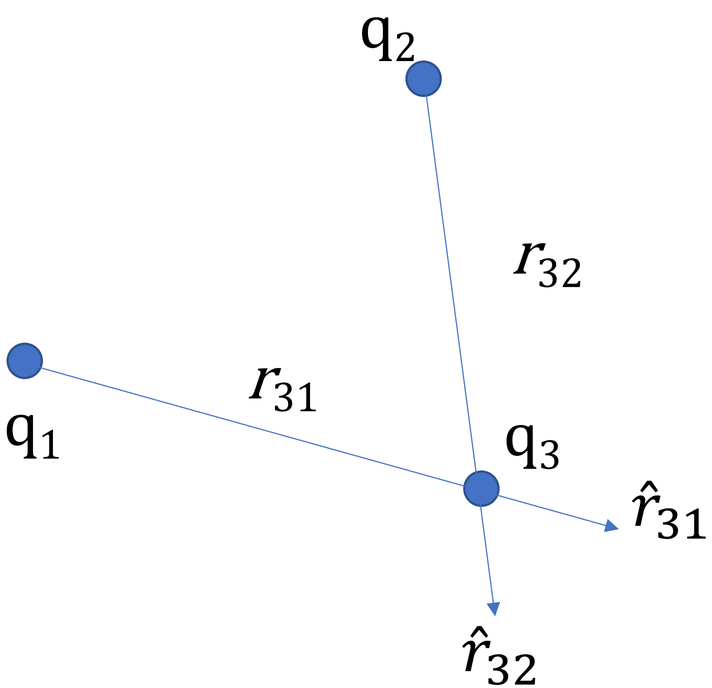
Factor de proporcionalidad

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9\ 10^9 Nm^2C^{-2}$$

ϵ_0 es la permitividad del vacío

Principio de superposición

La fuerza con la que dos cargas interaccionan no se modifica por la presencia de una tercera



- COROLARIO:

La fuerza experimentada por q_3 es la suma vectorial de las fuerzas de interacción entre q_1 y q_3 ,y q_2 y q_3

$$\vec{F}_3 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\left[\frac{q_1 q_3 \hat{r}_{31}}{r_{31}^2} + \frac{q_2 q_3 \hat{r}_{32}}{r_{32}^2}\right]$$

Fuerza del par q_1 q_3

Fuerza del par q_2 q_3

La energía potencial electrostática

Electrostática

Energía potencial electrostática

- **La fuerza de Coulomb es conservativa**.
- El **trabajo que debe darse al sistema para atraer dos cargas q_1 y q_2** inicialmente muy lejanas a una distancia r_{12} es:

$$W = \int_{posición\ inicial}^{posición\ final} \vec{F} \cdot \overrightarrow{ds}$$

Diferencial de camino

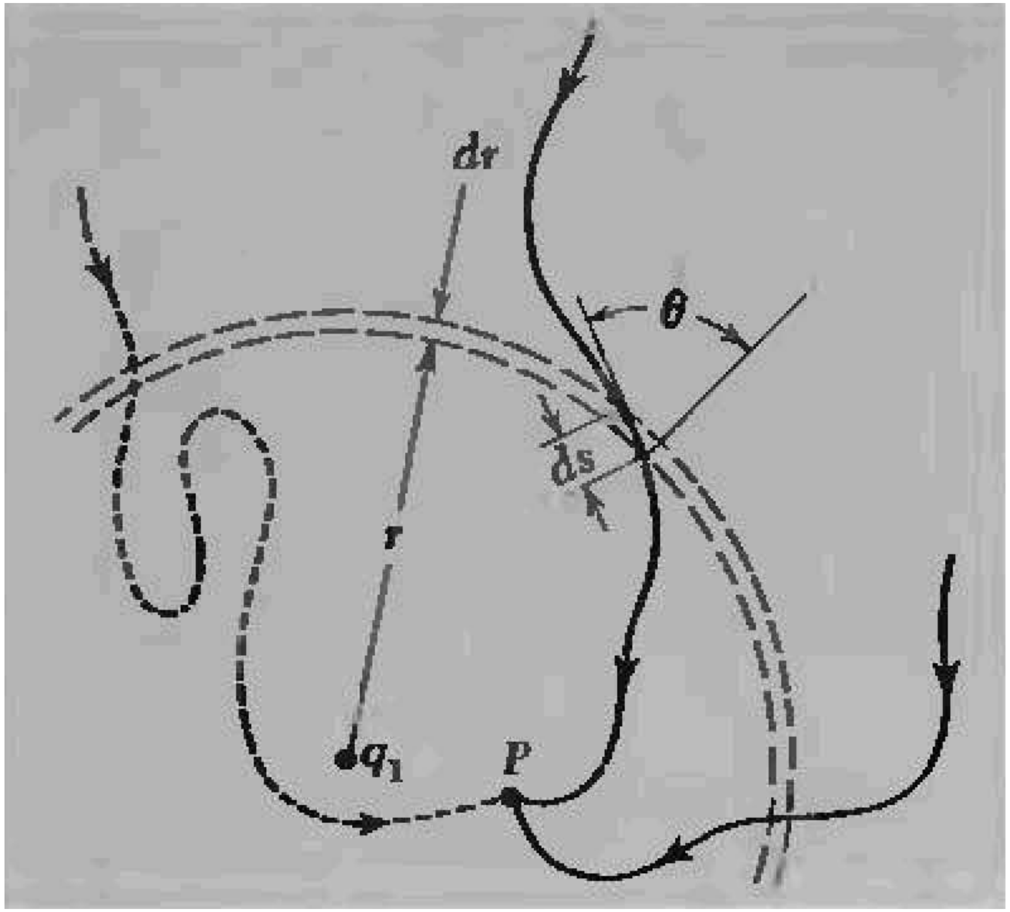
Me paro en **q_1**

Como siempre la fuerza es radial

$$\int_{\infty}^{r_{12}} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2(-dr)}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}}$$

W > 0 para signos de cargas iguales,

W < 0 para signos de cargas opuestos



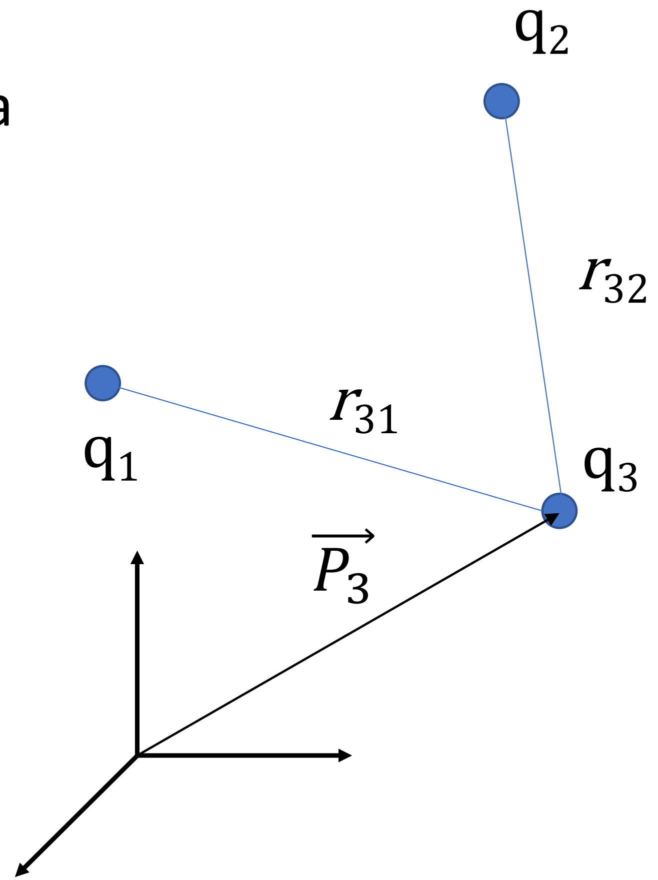
Debido a que la fuerza electrostática es central, los tramos de diferentes caminos entre r y $r+dr$ requieren el mismo trabajo

Energía de un sistema de cargas

Calculemos la energía que insume armar un sistema de cargas puntuales. Acerquemos una tercera carga q_3 desde muy lejos hasta $\overrightarrow{P_3}$.

$$W = -\int_{\infty}^{P_3} \vec{F}_3 \cdot \overrightarrow{ds} = -\int_{\infty}^{P_3} \vec{F}_{31} \cdot \overrightarrow{ds} - \int_{\infty}^{P_3} \vec{F}_{32} \cdot \overrightarrow{ds}$$

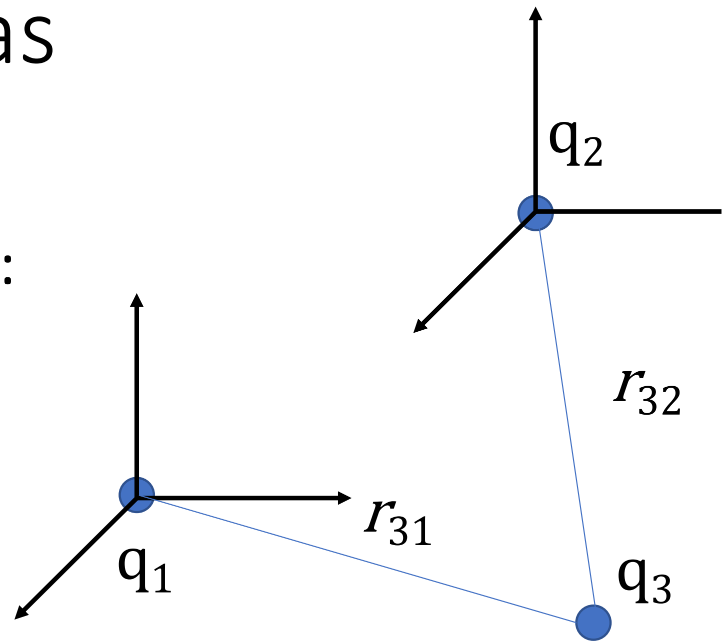
Donde $\vec{F}_{31}$ y $\vec{F}_{32}$ son las fuerzas que siente q_3 a causa de q_1 y q_2 respectivamente



Energía de un sistema de 3 cargas

Parándonos en q_1 y q_2 respectivamente, W queda:

$$W = -\int_{\infty}^{r_{31}} \vec{F}_{31} \cdot \overrightarrow{ds'} - \int_{\infty}^{r_{32}} \vec{F}_{32} \cdot \overrightarrow{ds''} =$$



$$= -\int_{\infty}^{r_{31}} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_3 \widehat{r'}}{r'^2} \cdot \overrightarrow{ds'} - \int_{\infty}^{r_{32}} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2 q_3 \widehat{r''}}{r''^2} \cdot \overrightarrow{ds''}$$

Energía de un sistema de 3 cargas

$$W = -\int_{\infty}^{r_{31}} \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{q_1 q_3 dr'}{r'^2} - \int_{\infty}^{r_{32}} \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{q_2 q_3 dr''}{r''^2} = \underbrace{\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{q_1 q_3}{r_{31}}}_{W_{31}} + \underbrace{\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{q_2 q_3}{r_{32}}}_{W_{32}}$$

- El trabajo para llevar q_3 a $\overrightarrow{P_3}$ es la suma del trabajo cuando solamente está q_1 y cuando solamente está q_2.
- Entonces el trabajo total cedido al sistema para reunir las tres cargas es igual a la energía electrostática acumulada *U*

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\left[\frac{q_1 q_2}{r_{21}} + \frac{q_1 q_3}{r_{31}} + \frac{q_2 q_3}{r_{32}}\right]$$

La energía potencial eléctrica U de un sistema

- No depende del orden de colocación de las cargas
- Es independiente del camino seguido por cada carga

Dependerá únicamente de la disposición final de las cargas

Energía de un sistema de N cargas

- La expresión general queda:

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{N}\sum_{k\neq j}\frac{q_j q_k}{r_{jk}}$$

- La doble sumatoria significa:
  - tomar j=1 y sumar para k=2,3,4…N,
  - luego tomar j=2 y sumar para k= 1, 3, 4… N y así sucesivamente hasta j=N.
- El ½ aparece porque los términos con cargas j y k aparecen dos veces como jk y kj.

Pregunta 1

Si una vez armado, un sistema de cargas estáticas tiene una energía total U_0.

¿Cuánto valdrá la energía cinética total que alcanzaría el sistema si se sueltan las cargas ?

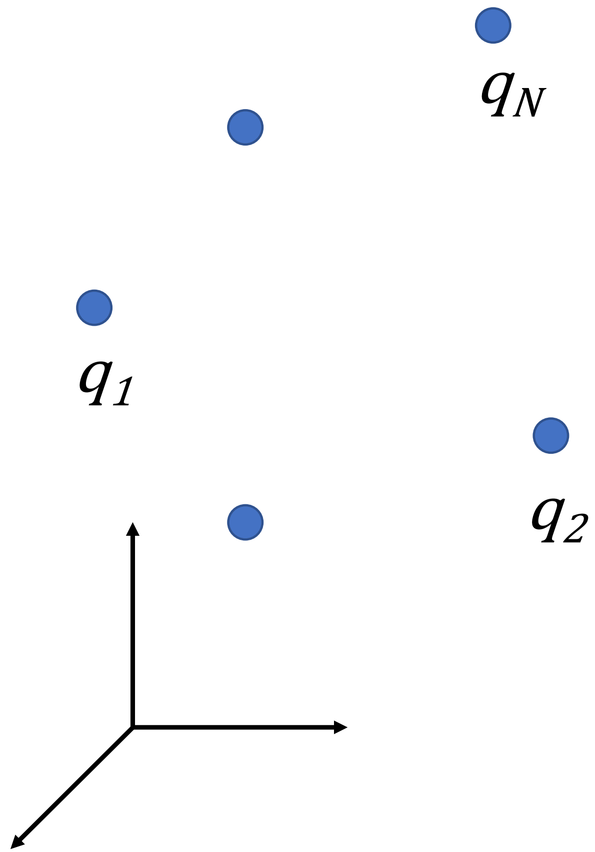
Descanso

El Campo Eléctrico

Electrostática

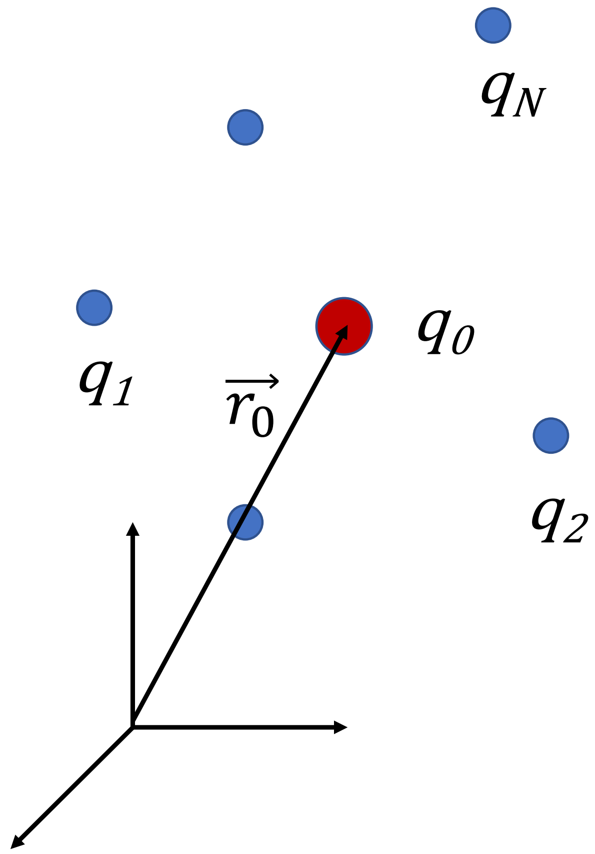
El campo eléctrico

- Supongamos una distribución de cargas q_1, q_2... q_N fijas.



El campo eléctrico

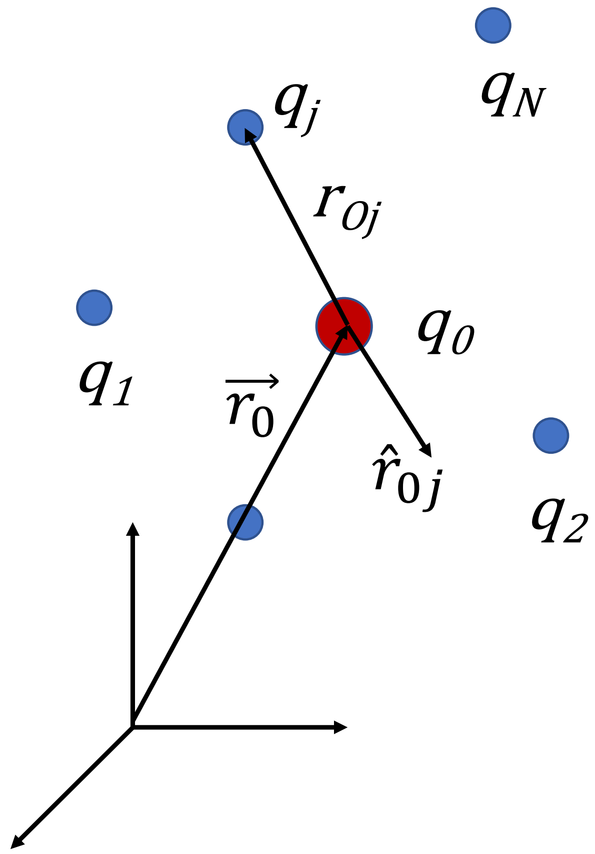
- Supongamos una distribución de cargas q_1, q_2... q_N fijas.
- Nos interesa saber la fuerza resultante sobre una carga q_0 que se agrega en la posición $\vec{r_0}$



El campo eléctrico

- Supongamos una distribución de cargas q_1, q_2... q_N fijas.
- Nos interesa saber la fuerza resultante sobre una carga q_0 que se agrega en la posición $\overrightarrow{r_0}$

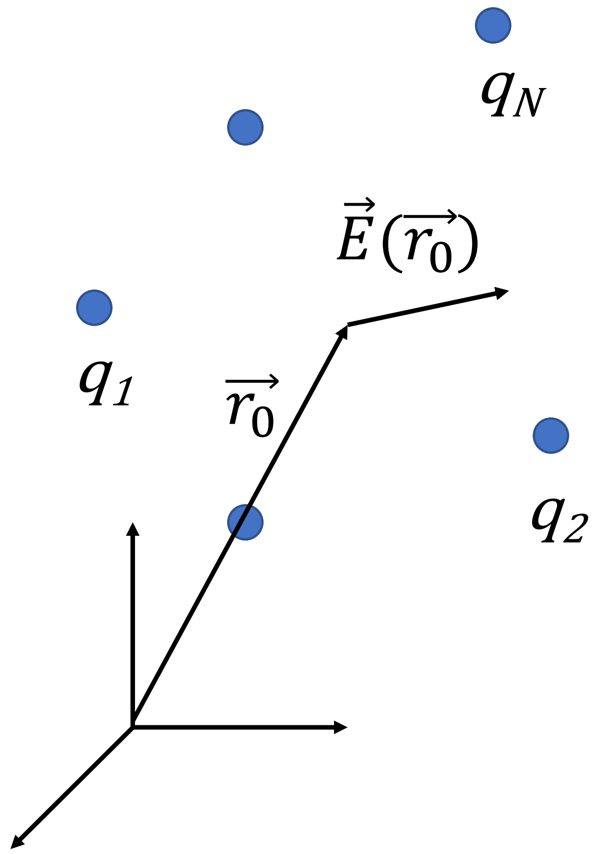
$$\vec{F}_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\sum_{j=1}^{N}\frac{q_0 q_j \hat{r}_{0j}}{r_{0j}^2}$$

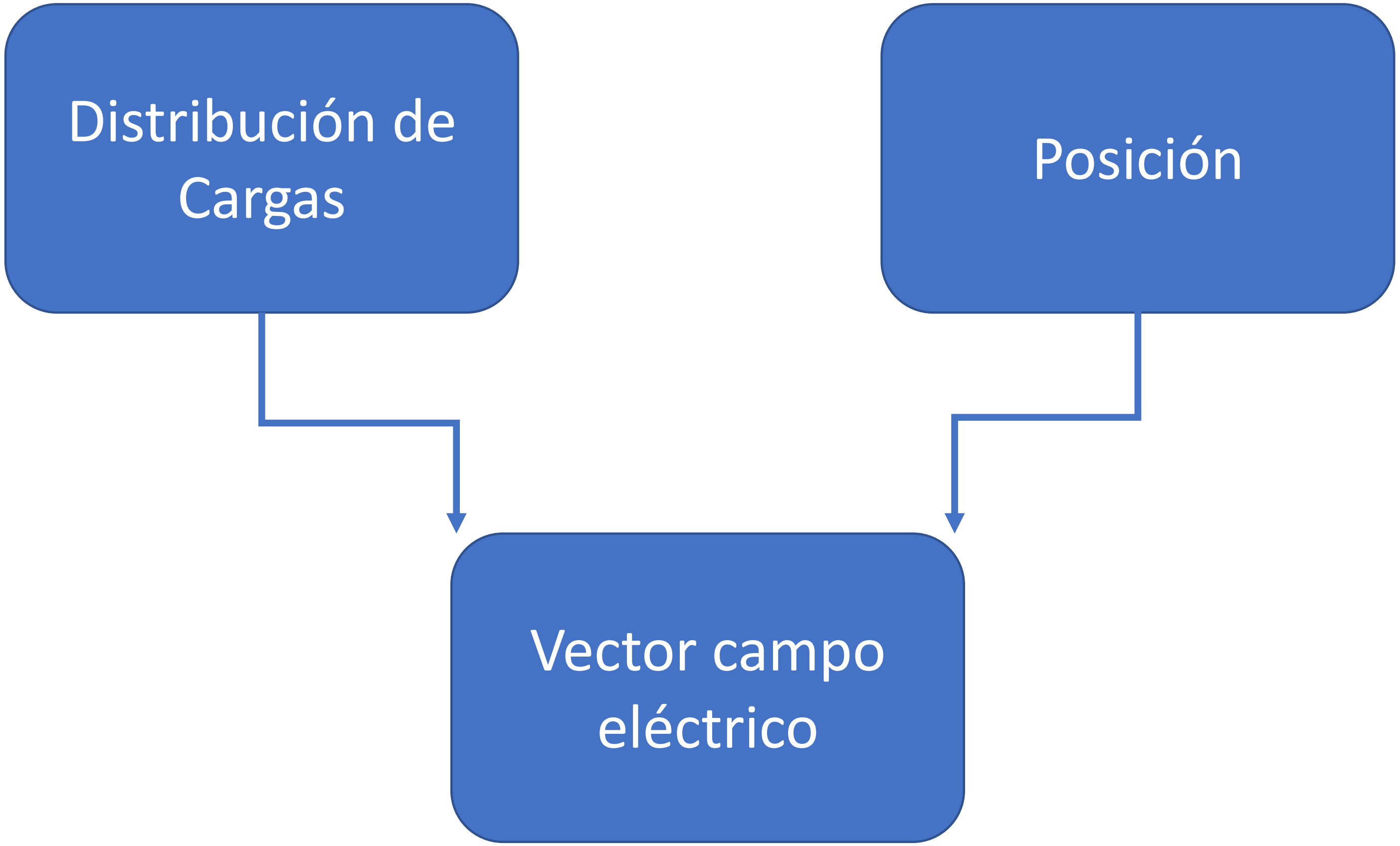


El campo eléctrico

- Si dividimos $\vec{F}_0$ por q_0 nos queda una cantidad vectorial dependiente del sistema de cargas y de la posición $\overrightarrow{r_0}$.
- Esta cantidad es el campo eléctrico $\vec{E}$ generado por el sistema de cargas en el punto $\overrightarrow{r_0}$:

$$\vec{E}(\overrightarrow{r_0}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\sum_{j=1}^{N}\frac{q_j\hat{r}_{0j}}{r_{0j}^2}$$




Distribución de Cargas
Posición
Vector campo eléctrico

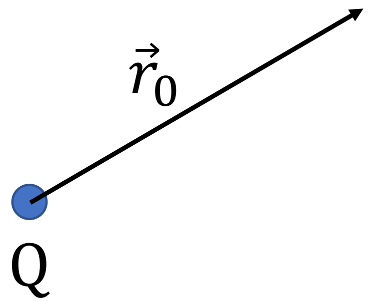
Propiedades del campo electrico

- Su intensidad se mide en N/C ó como veremos más adelante en Volt /m
- La dirección vendrá dada por una combinación de versores.
- Si queremos representar el campo en todo el espacio, a cada posición le asignaremos una flecha (vector).

Campo de una carga Q

- El campo generado por una carga Q en cualquier posición $\overrightarrow{r_0}$ es:

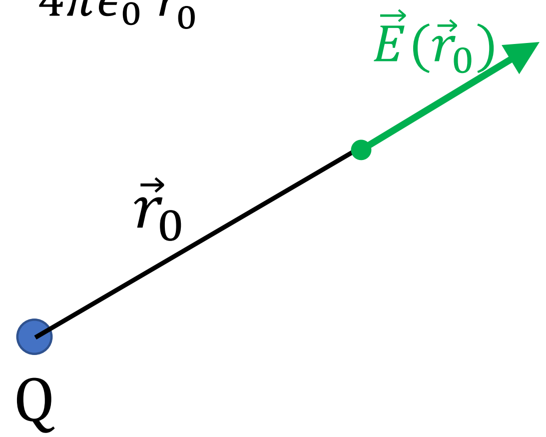
$$\vec{E}(\vec{r}_0) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q}{r_0^2}\,\hat{r}_0$$



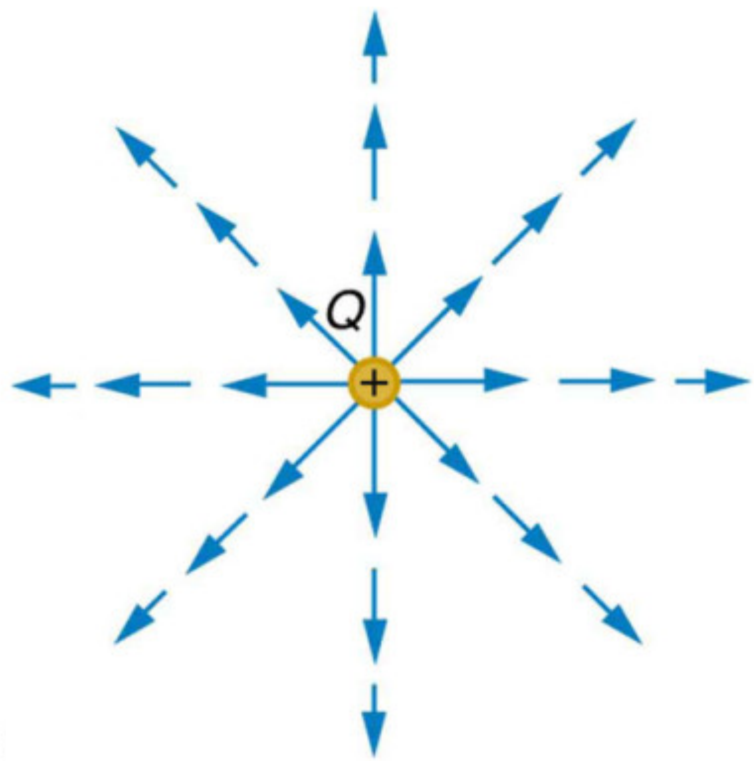
Campo de una carga Q

- El campo generado por una carga Q en cualquier posición $\overrightarrow{r_0}$ es:

$$\vec{E}(\vec{r}_0) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q}{r_0^2}\,\hat{r}_0$$



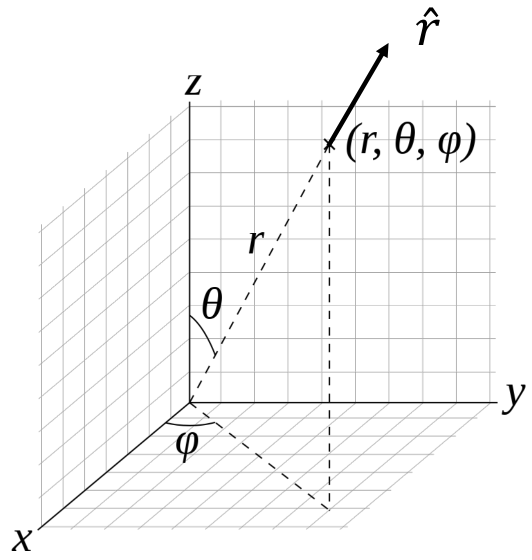
Campo de una carga Q>0



Campo de una carga Q

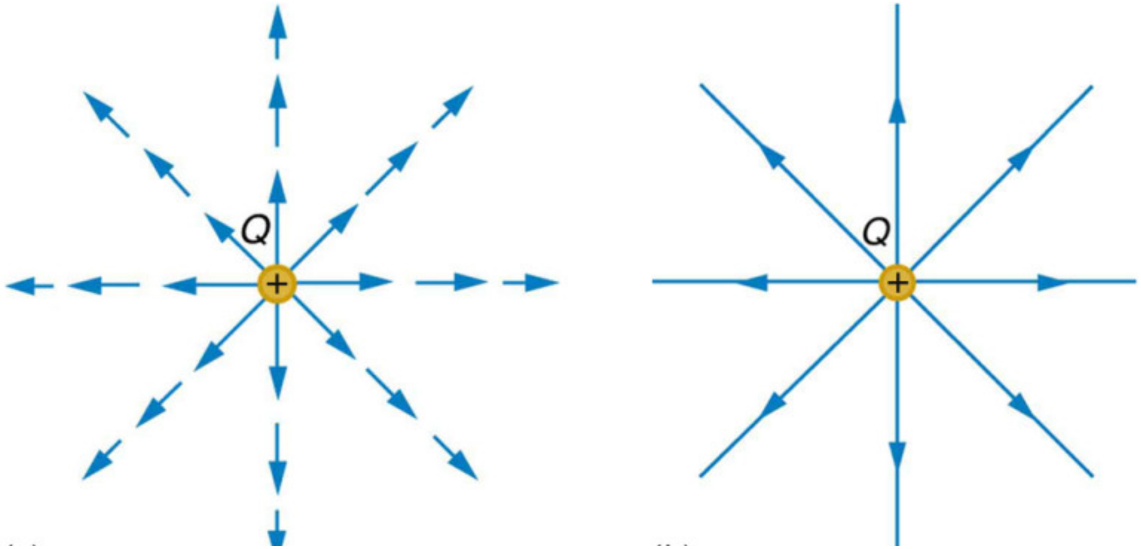
- En coordenadas esféricas (r, θ, φ)

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q}{r^2}\hat{r}$$



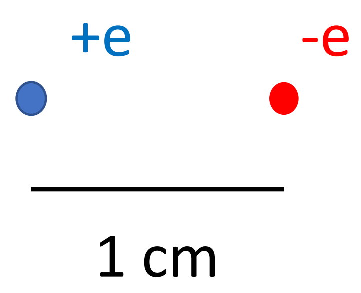
Líneas de campo de una carga Q

- Líneas que tienen al campo $\vec{E}$ como vectores tangentes.
- Densidad de líneas indica intensidad.



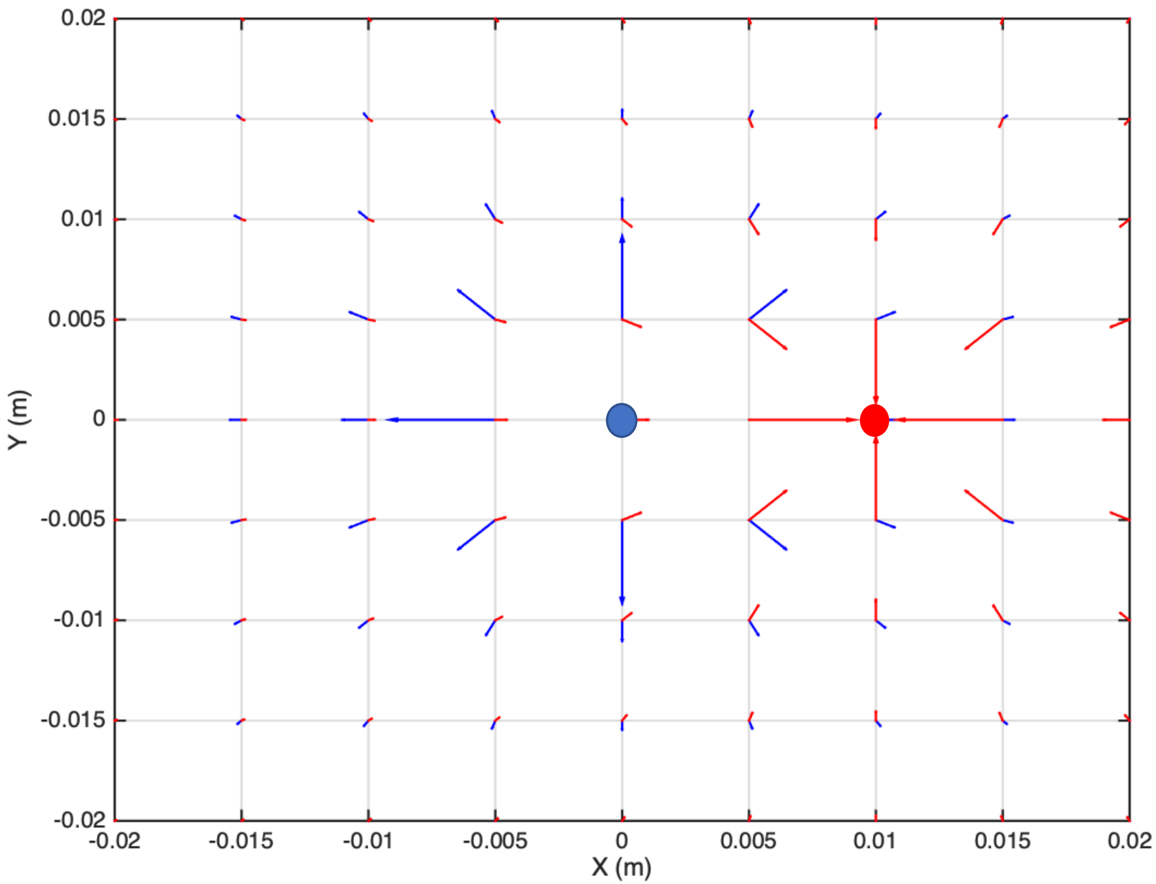
Campo de dos cargas

- Una carga +e en (0,0).
- Una carga –e en (1 cm).



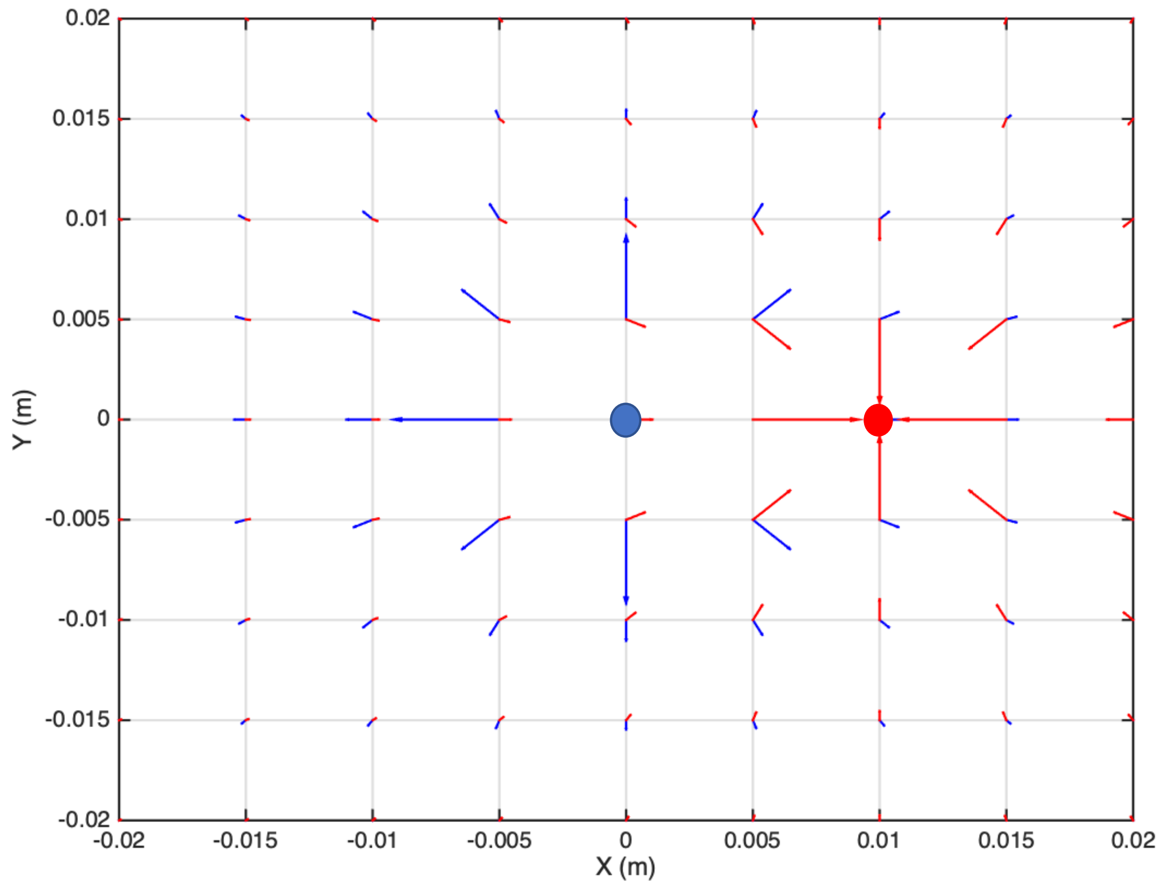
Campo de dos cargas

- Una carga +e en (0,0).
- Una carga –e en (0,1 cm).



Campo de dos cargas

- Una carga +e en (0,0).
- Una carga –e en (0,1 cm).
- El campo total en cada punto es la suma vectorial de los campos de cada carga.

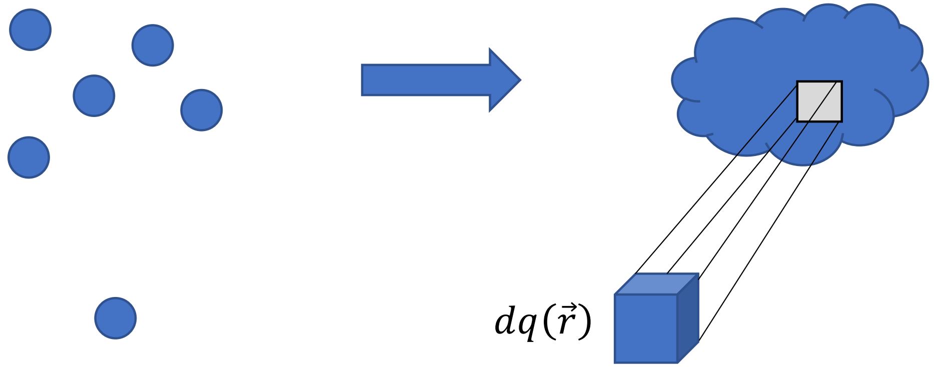


Pregunta 2

En el gráfico anterior, dibujar el campo total.

Puede haber lugares en donde el campo total sea cero ?

Distribución contínua de cargas



Carga puntual en punto $\vec{r}$

Diferencial de carga en el punto $\vec{r}$

$$Q$$

$$dq(\vec{r}) = \rho(\vec{r})\, dx\, dy\, dz$$

Densidad de carga en $\vec{r}$

Diferencial de volumen en el punto $\vec{r}$

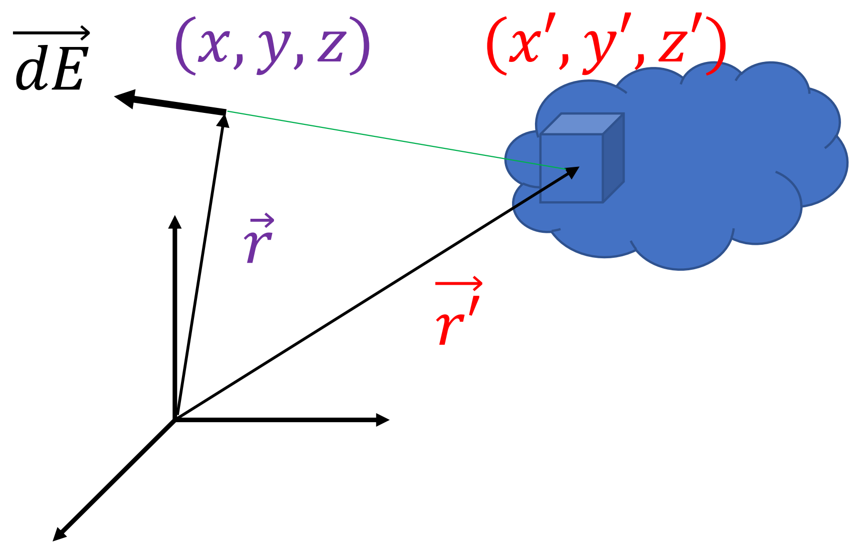
Campo eléctrico de una distribución

- Vimos que para N cargas puntuales en posiciones $\vec{r_j}$, el campo $\vec{E}$ en el punto $\vec{r_0}$

$$\vec{E}(\vec{r_0}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\sum_{j=1}^{N}\frac{q_j\hat{r}_{0j}}{r_{0j}^2}$$

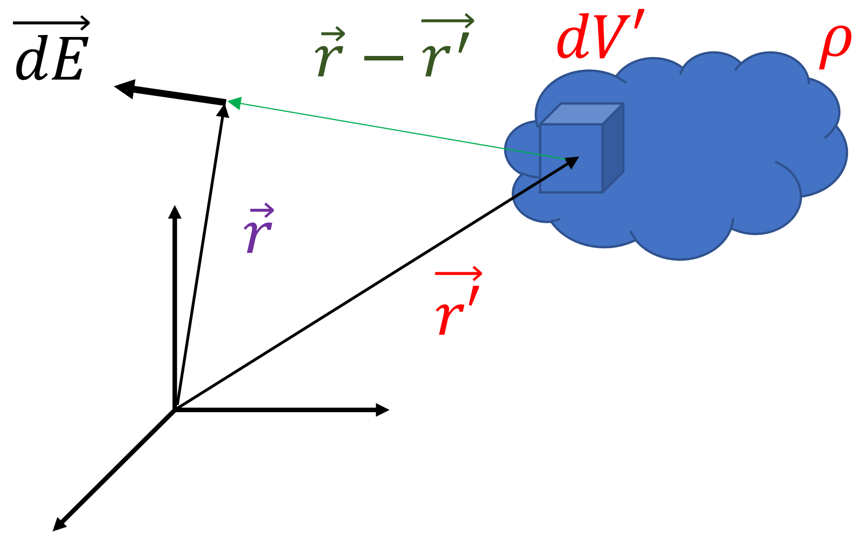
- Donde $\hat{r}_{0j}$ es un vector unitario que apunta desde $\vec{r_0}$ hasta $\vec{r_j}$. Equivalentemente:

$$\vec{E}(\vec{r_0}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\sum_{j=1}^{N}\frac{q_j\left(\vec{r_j}-\vec{r_0}\right)}{\left|\vec{r_j}-\vec{r_0}\right|^3}$$



Campo eléctrico de una distribución

- Equivalentemente, pensemos en un diferencial de carga $\rho\left(\overrightarrow{r'}\right) dV'$ en el punto $\overrightarrow{r'}$ como parte de una distribución volumétrica ρ.



- La contribución de $\rho\left(\overrightarrow{r'}\right) dV'$ al campo eléctrico $\vec{E}$ en el punto $\vec{r}$ es:

$$\overrightarrow{dE}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\rho\left(\overrightarrow{r'}\right) dV' \left(\vec{r} - \overrightarrow{r'}\right)}{\left|\vec{r} - \overrightarrow{r'}\right|^3}$$

Campo eléctrico de una distribución

- El campo total $\vec{E}$ en el punto $\vec{r}$ se obtiene integrando sobre todo el volumen de la distribución de carga.

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iiint \frac{\rho\left(\overrightarrow{r'}\right)\left(\vec{r} - \overrightarrow{r'}\right)}{\left|\vec{r} - \overrightarrow{r'}\right|^3} \, dV'$$

- En cartesianas $\overrightarrow{r'} = (x', y', z')$ y $\vec{r} = (x, y, z)$:

$$E_x(x, y, z) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iiint \frac{\rho(x', y', z')\,(x - x')}{\left(\sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2}\right)^3} \, dx'dy'dz'$$

$$E_y(x, y, z) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iiint \frac{\rho(x', y', z')\,(y - y')}{\left(\sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2}\right)^3} \, dx'dy'dz'$$

$$E_z(x, y, z) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iiint \frac{\rho(x', y', z')\,(z - z')}{\left(\sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2}\right)^3} \, dx'dy'dz'$$