

Física 2 para ciencias químicas a distancia
FCEN – UBA - 1 Cuatrimestre 2021

César Bertucci
cbertucci@iafe.uba.ar

Programa

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

Links útiles

- Página de la materia
<https://materias.df.uba.ar/f2qa2021c1/>
- 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

Electrostática

Electrostática

La carga eléctrica

La carga eléctrica

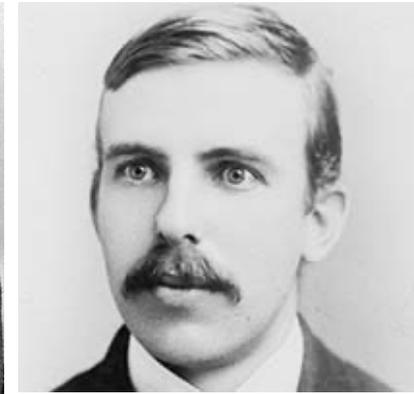
- Característica fundamental de la materia, junto con la masa. Existe en dos versiones: positiva y negativa
- Los portadores de carga son los **protones (positiva)** y los **electrones (negativa)**. Ambos tienen carga
$$|e| = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$
- En átomos y moléculas neutros las cargas positivas y negativas se compensan.
- Un exceso de carga en un cuerpo implica que este está cargado con una carga Q .

Experimentos fundacionales

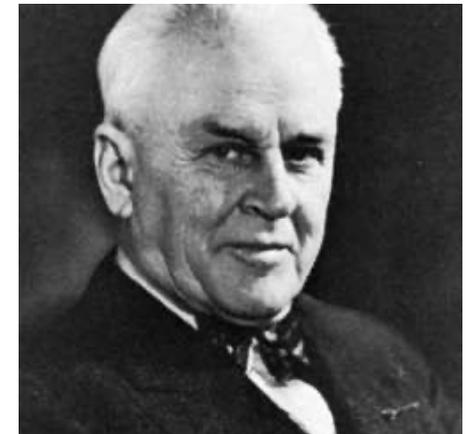
- Descubrimiento de los protones (Goldstein, 1886; Rutherford 1899).
- Descubrimiento del electrón a partir de rayos catódicos (Thomson, 1896)
- Modelo del átomo como núcleo y electrones (Rutherford, 1911)
- Cuantización de la carga (Milikan & Fletcher 1909)



Joseph Thomson



Ernest Rutherford



Robert Milikan

Leyes fundamentales de la electrostática

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

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

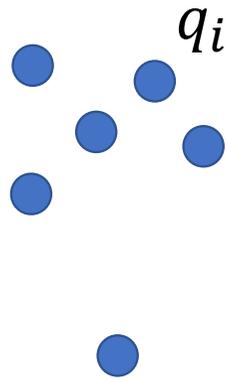
- **Ley de conservación de la carga:**

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

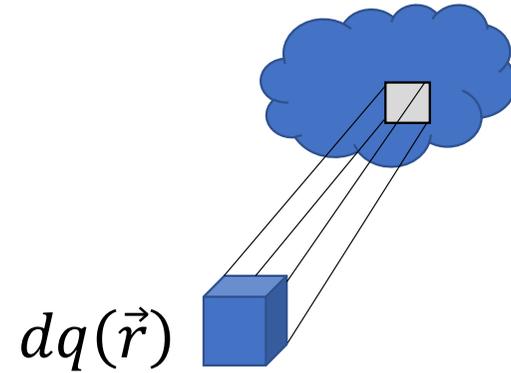
- **Ley de Coulomb:**

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.

Tipos de carga



Puntuales
(discretas)

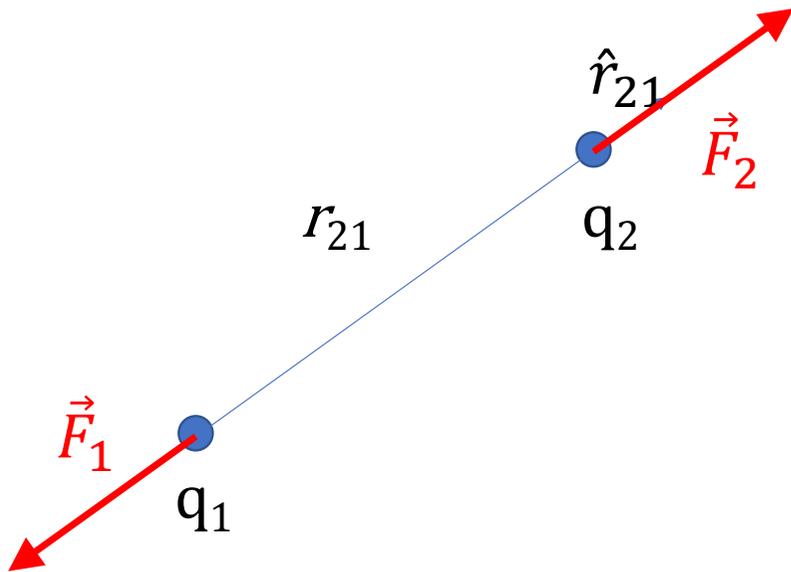


Distribución continua
de cargas

Electrostática

Ley de Coulomb

Ley de Coulomb



- La fuerza experimentada por q_2 :

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

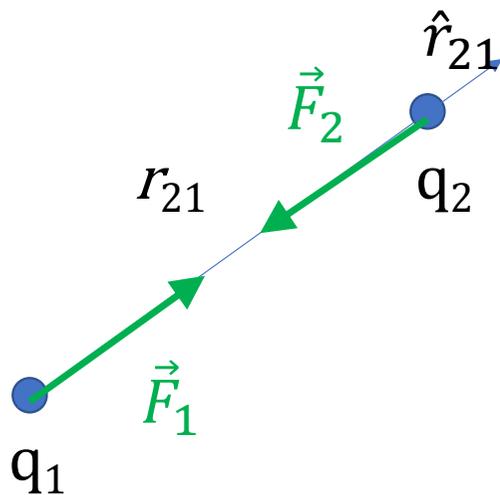
\hat{r}_{21} es el vector unitario de q_1 a q_2

- 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 :

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

\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**

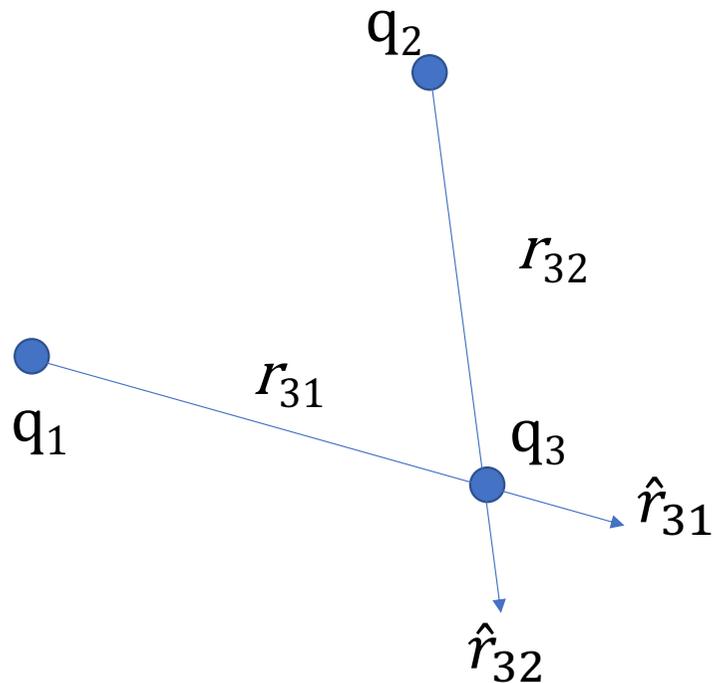
Factor de proporcionalidad

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

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:

$$W = \int_{\text{posición inicial}}^{\text{posición final}} \vec{F} \cdot \vec{ds} \quad \leftarrow \text{Diferencial de camino}$$

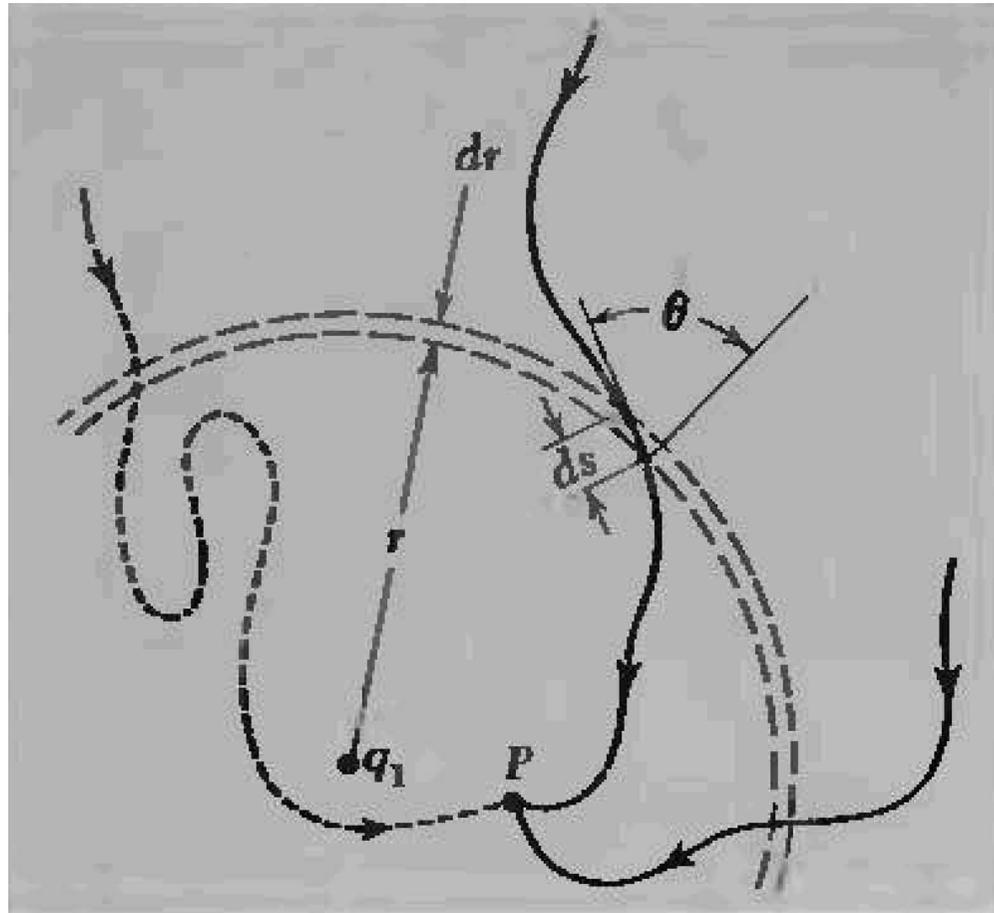
Me paro en q_1



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



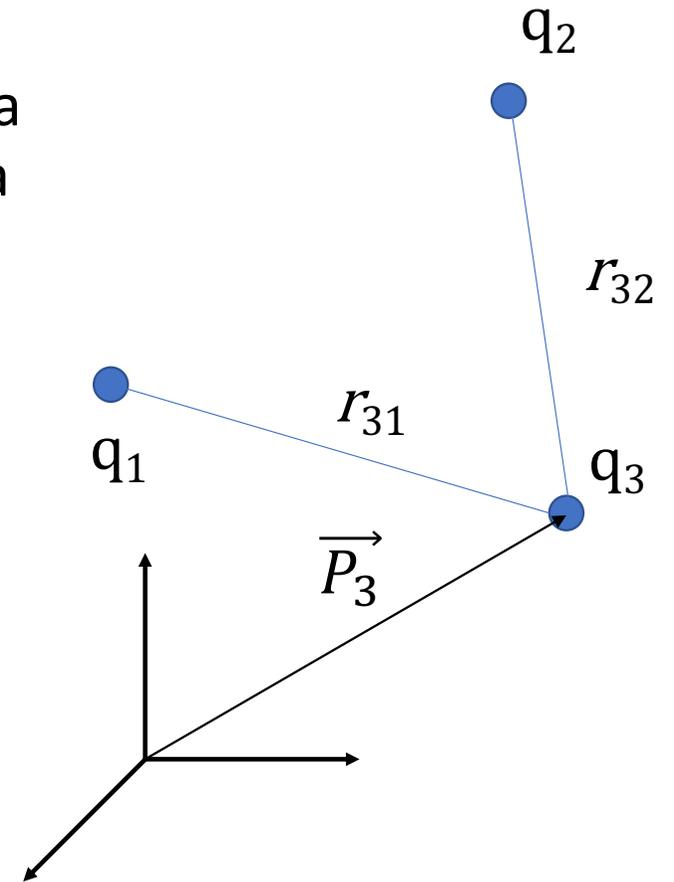
Debido a que la fuerza electrostática es central, los tramos de diferentes caminos entre r y $r+dr$ requieren el mismo trabajo

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 \vec{P}_3 .

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

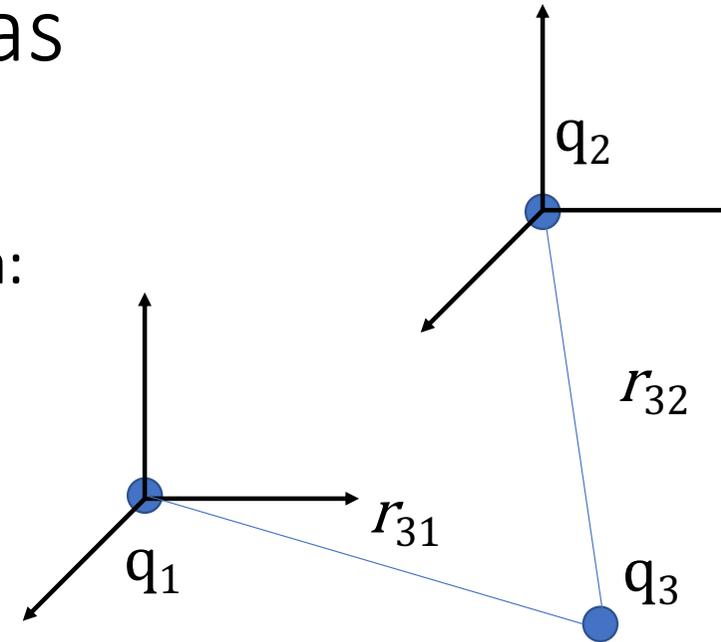
Donde \vec{F}_{31} y \vec{F}_{32} son las fuerzas que siente q_3 a causa de q_1 y q_2 respectivamente



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 \vec{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 $k=2,3,4\dots N$,
 - luego tomar $j=2$ y sumar para $k=1, 3, 4\dots N$ y así sucesivamente hasta $j=N$.
- El $\frac{1}{2}$ 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 ?

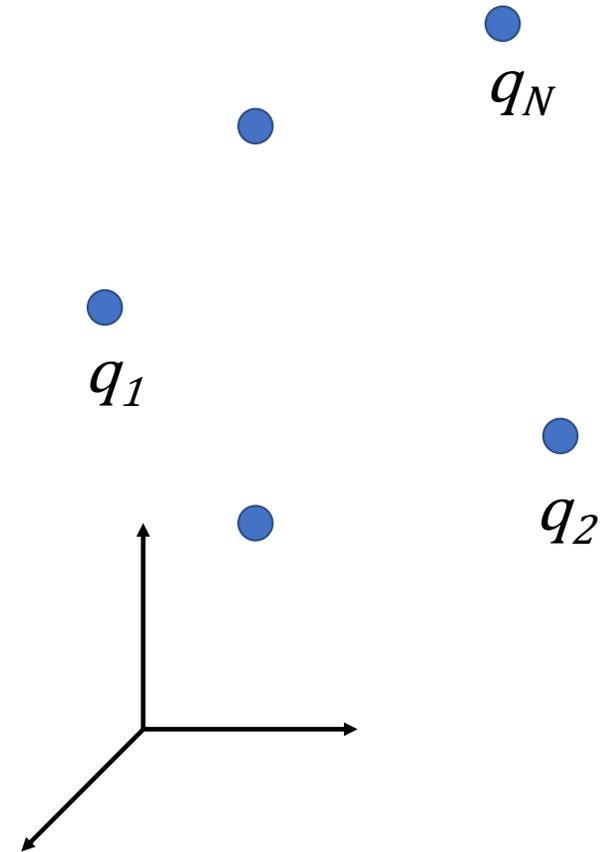
Descanso

Electrostática

El Campo Eléctrico

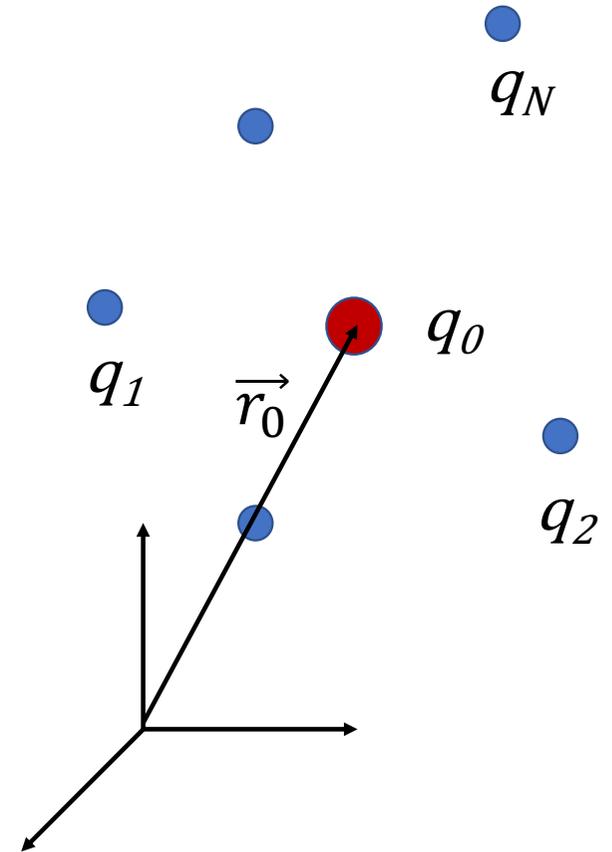
El campo eléctrico

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



El campo eléctrico

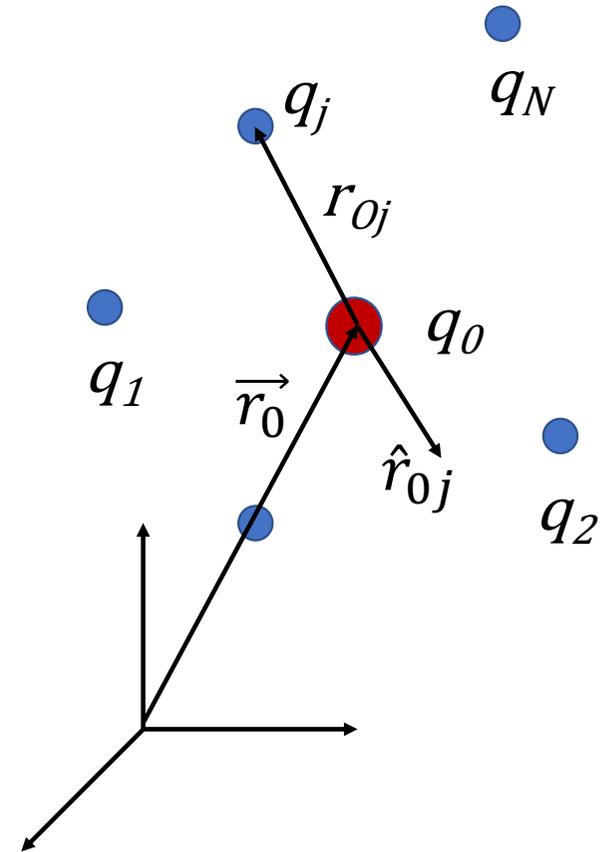
- Supongamos una distribución de cargas q_1, q_2, \dots, q_N fijas.
- Nos interesa saber la fuerza resultante sobre una carga q_0 que se agrega en la posición \vec{r}_0



El campo eléctrico

- Supongamos una distribución de cargas q_1, q_2, \dots, q_N fijas.
- Nos interesa saber la fuerza resultante sobre una carga q_0 que se agrega en la posición \vec{r}_0

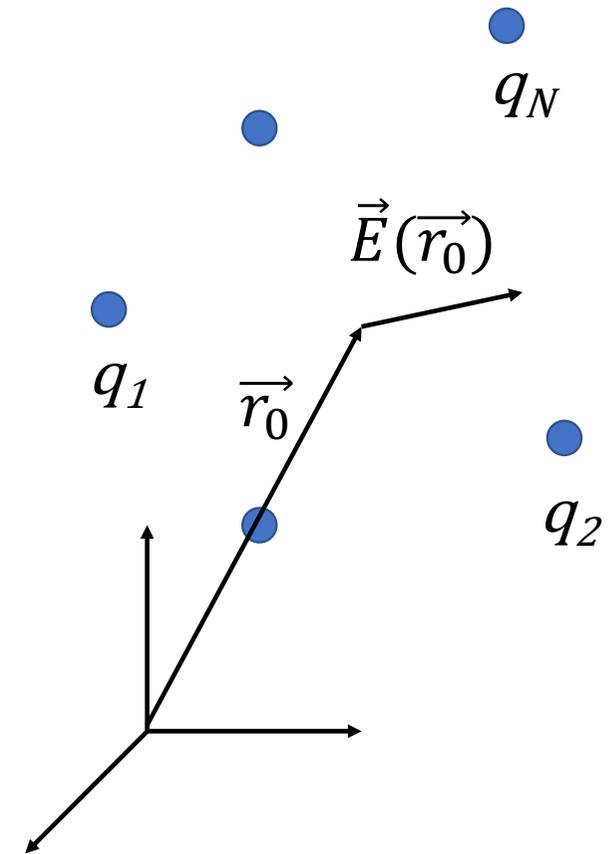
$$\vec{F}_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{j=1}^N \frac{q_0 q_j \hat{r}_{0j}}{r_{0j}^2}$$

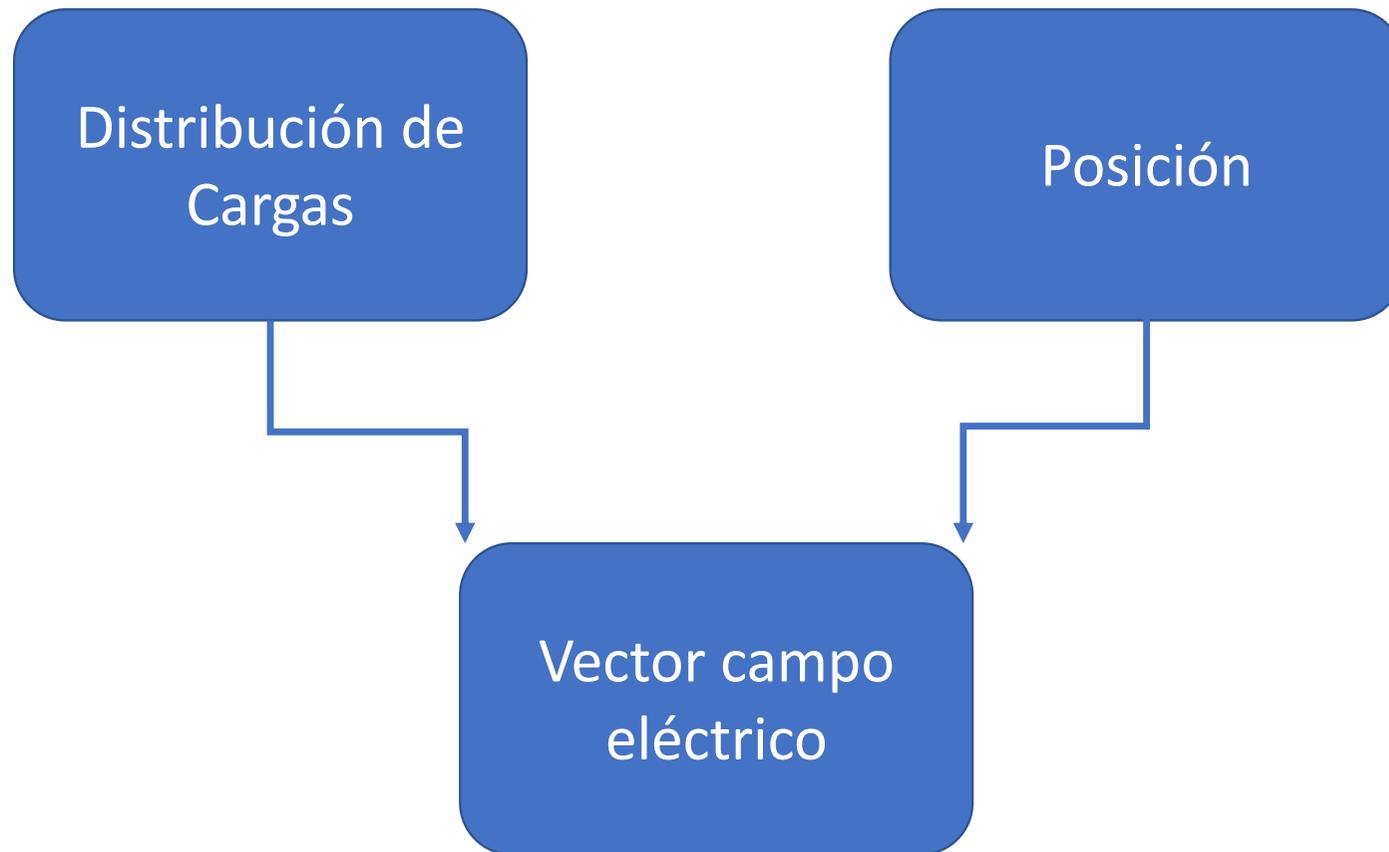


El campo eléctrico

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

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





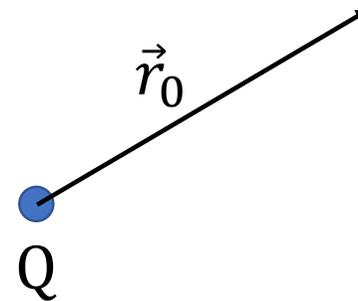
Propiedades del campo electrico

- 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 \vec{r}_0 es:

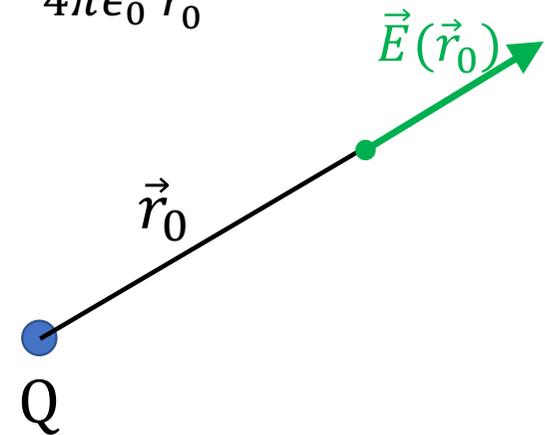
$$\vec{E}(\vec{r}_0) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r_0^2} \hat{r}_0$$



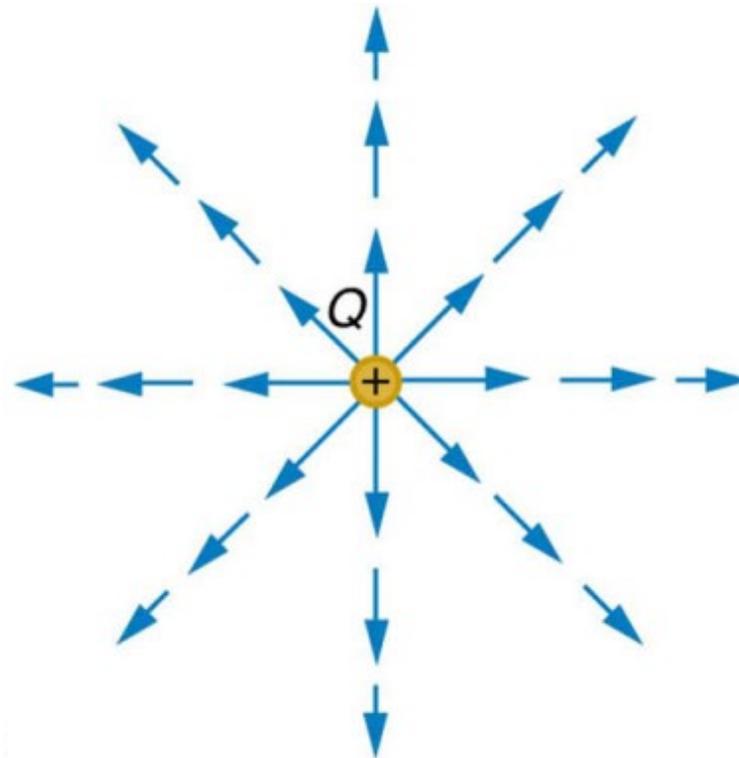
Campo de una carga Q

- El campo generado por una carga Q en cualquier posición \vec{r}_0 es:

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



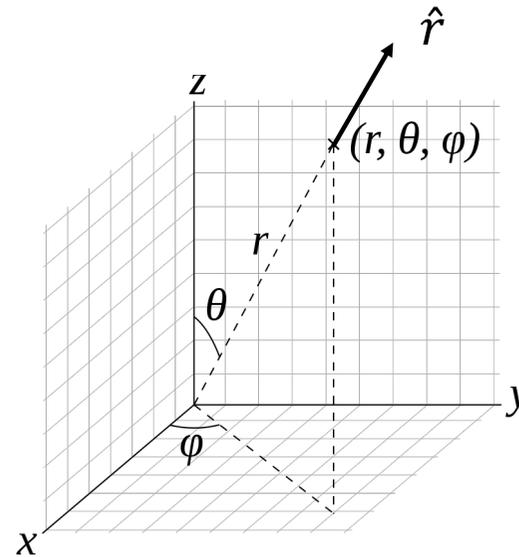
Campo de una
carga $Q > 0$



Campo de una carga Q

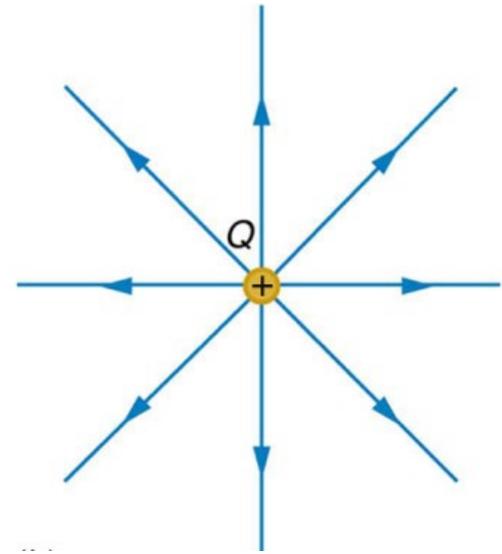
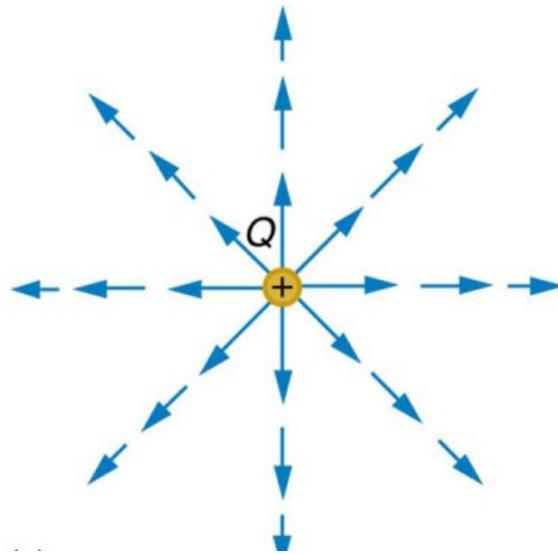
- En coordenadas esféricas (r, θ, φ)

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



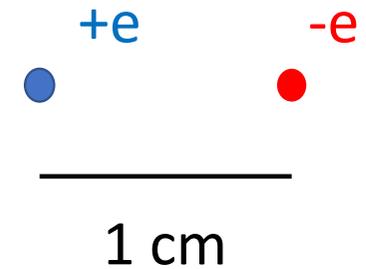
Líneas de campo de una carga Q

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



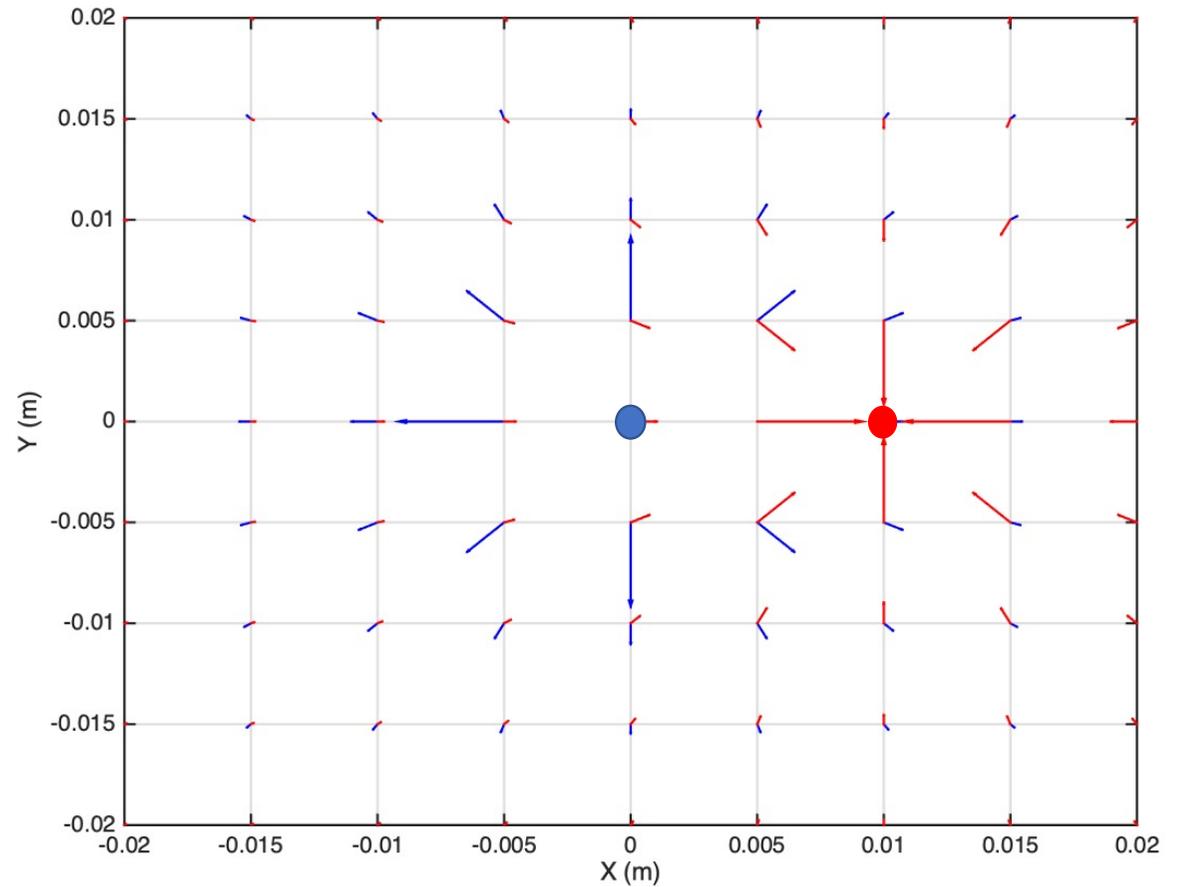
Campo de dos cargas

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



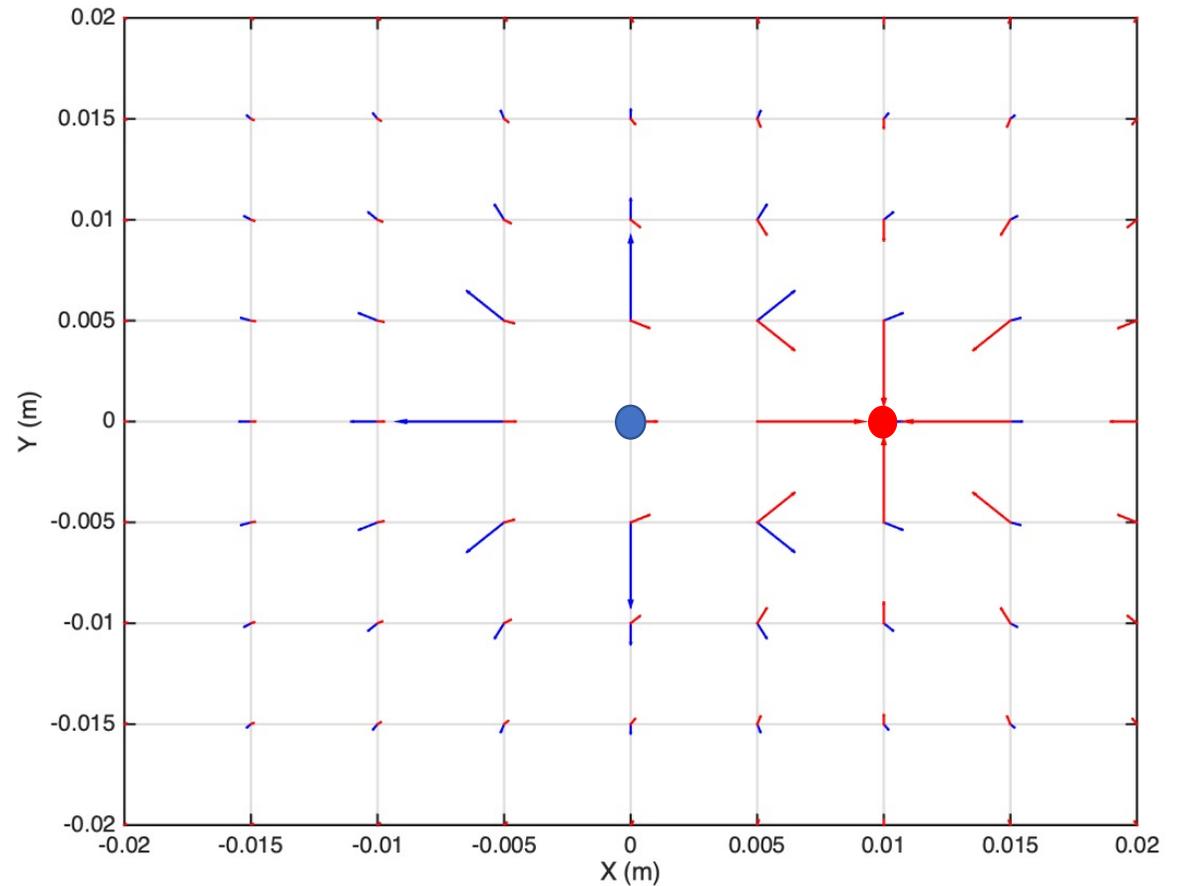
Campo de dos cargas

- Una carga $+e$ en $(0,0)$.
- Una carga $-e$ en $(0,1 \text{ cm})$.



Campo de dos cargas

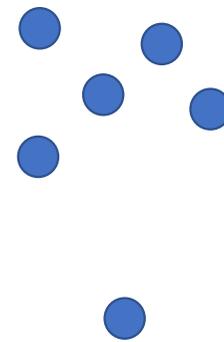
- Una carga $+e$ en $(0,0)$.
- Una carga $-e$ en $(0,1 \text{ cm})$.
- El campo total en cada punto es la suma vectorial de los campos de cada carga.



Pregunta 2

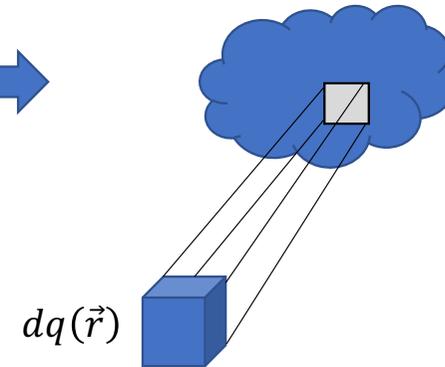
En el gráfico anterior, dibujar el campo total.
Puede haber lugares en donde el campo total sea cero ?

Distribución continua de cargas



Carga puntual
en punto \vec{r}

Q



$dq(\vec{r})$

Diferencial de carga en el
punto \vec{r}

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

Densidad
de carga en \vec{r}

Diferencial
de volumen
en el punto \vec{r}

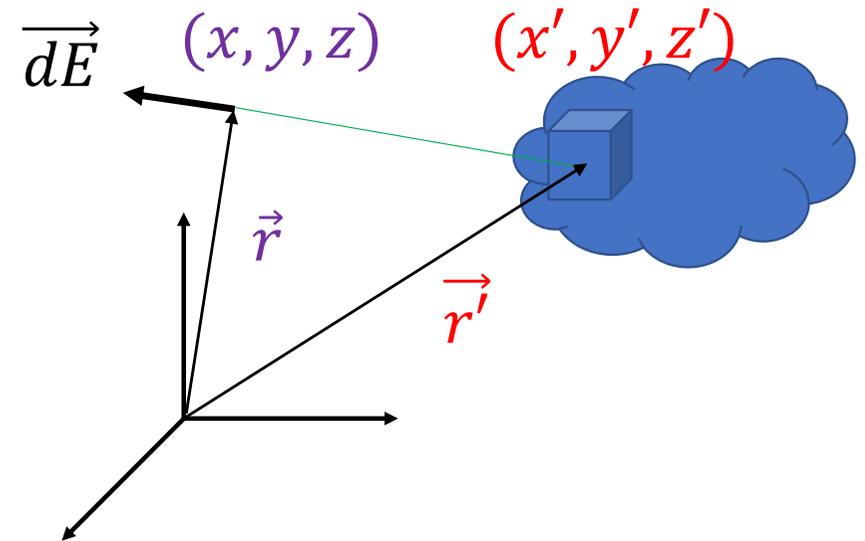
Campo eléctrico de una distribución

- 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:

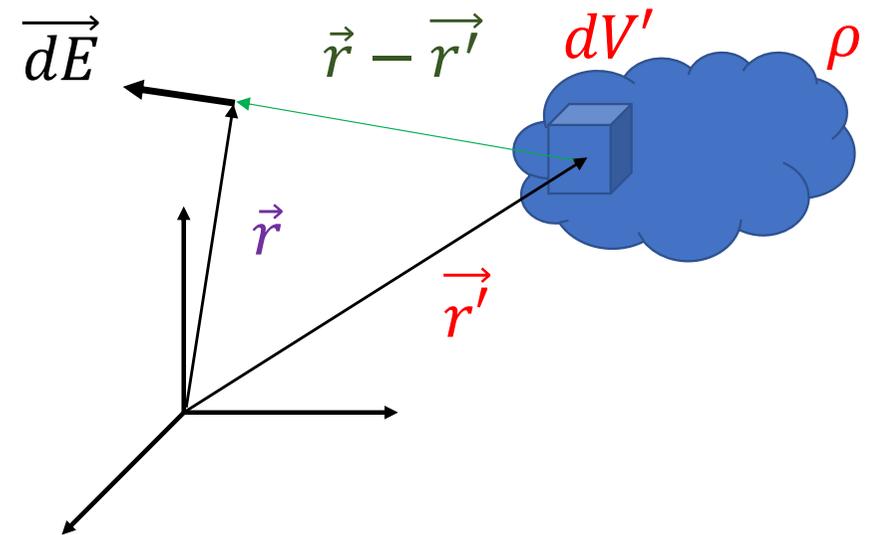
$$\vec{E}(\vec{r}_0) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{j=1}^N \frac{q_j (\vec{r}_j - \vec{r}_0)}{|\vec{r}_j - \vec{r}_0|^3}$$



Campo eléctrico de una distribución

- Equivalentemente, pensemos en un diferencial de carga $\rho(\vec{r}') dV'$ en el punto \vec{r}' como parte de una distribución volumétrica ρ .
- La contribución de $\rho(\vec{r}') dV'$ al campo eléctrico \vec{E} en el punto \vec{r} es:

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



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.

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

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

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

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

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