

Curso “Electromagnetismo”

Tema 2

Electrostática

José Emilio Prieto
Dpto. Física de la Materia Condensada
Universidad Autónoma de Madrid

joseemilio.prieto@uam.es

Fuerza electrostática

J.E. Prieto

Fuente principal de figuras:

“Physics for scientists and engineers” (5th edition),

P.A. Tipler, G. Mosca

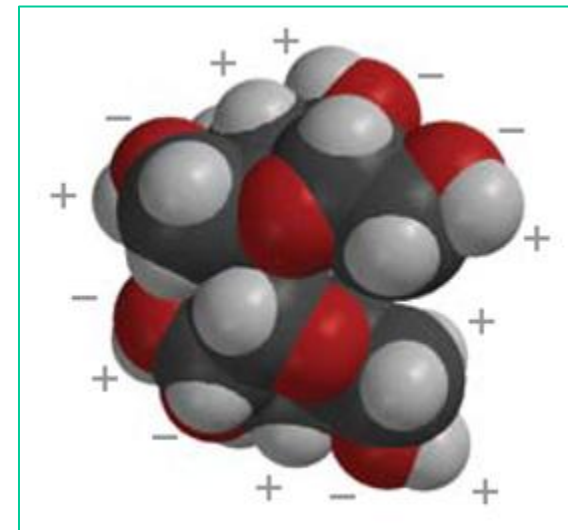
Interacciones fundamentales en la Naturaleza

- *Cuatro* interacciones fundamentales:

Interaction	Current theory	Mediators	Relative strength ^[7]	Long-distance behavior	Range (m)
Strong	Quantum chromodynamics (QCD)	gluons	10^{38}	1 (see discussion below)	10^{-15}
Electromagnetic	Quantum electrodynamics (QED)	photons	10^{36}	$\frac{1}{r^2}$	∞
Weak	Electroweak Theory (EWT)	W and Z bosons	10^{25}	$\frac{1}{r} e^{-m_{W,Z} r}$	10^{-18}
Gravitation	General Relativity (GR)	gravitons (hypothetical)	1	$\frac{1}{r^2}$	∞

- *Interacción electromagnética*: responsable de fenómenos como:

- la cohesión y estructura de la materia,
- la conducción eléctrica,
- la radiación EM (luz),
- ...



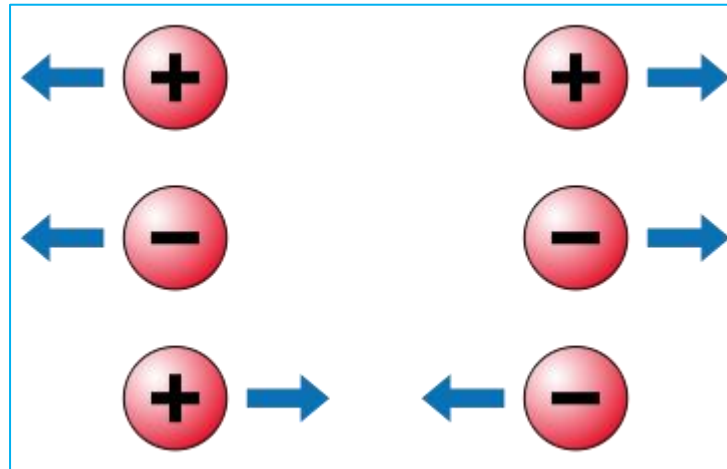
Interacción eléctrica

Comenzamos con la condición más simple: situación *estática*:
Nada cambia con el tiempo: **Electrostática**.

Observación *experimental*: Hay dos tipos de “cargas” en la naturaleza: “**positiva**” (**+**) y “**negativa**” (**-**):

Mismo signo: **repulsión**

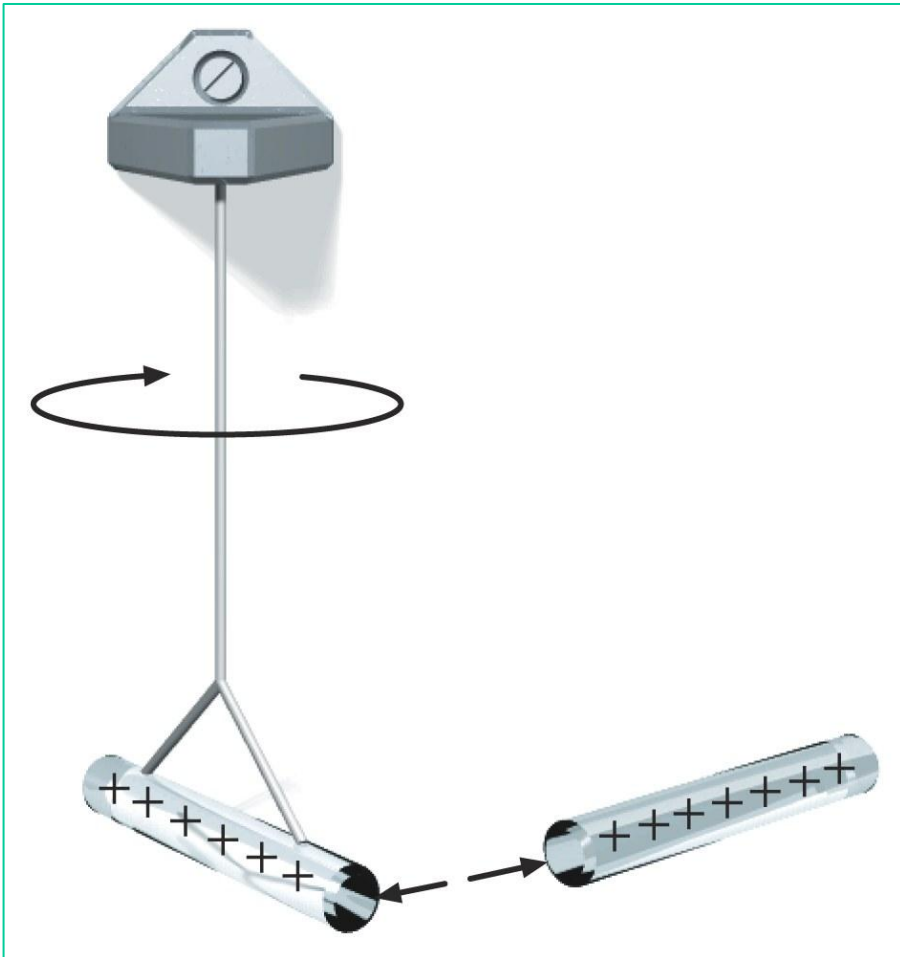
Distinto signo: **atracción**



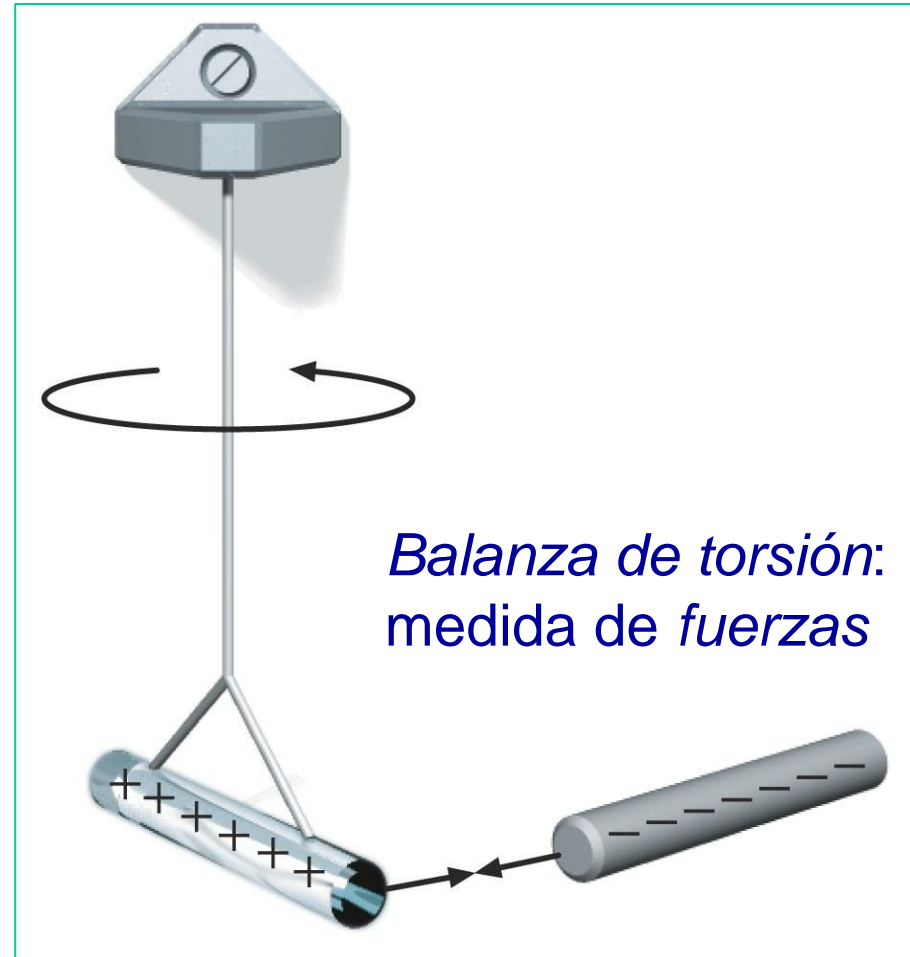
Fuerza electrostática

Observación *experimental*: Dos tipos de “cargas” en la naturaleza:
“**positiva**” (+) y “**negativa**” (-):

Mismo signo: *repulsión*.



Distinto signo: *atracción*



Ley de Coulomb

Resultado de los experimentos de Coulomb:

The force exerted by one point charge on another acts along the line between the charges. It varies inversely as the square of the distance separating the charges and is proportional to the product of the charges. The force is repulsive if the charges have the same sign and attractive if the charges have opposite signs.

Ley de Coulomb:

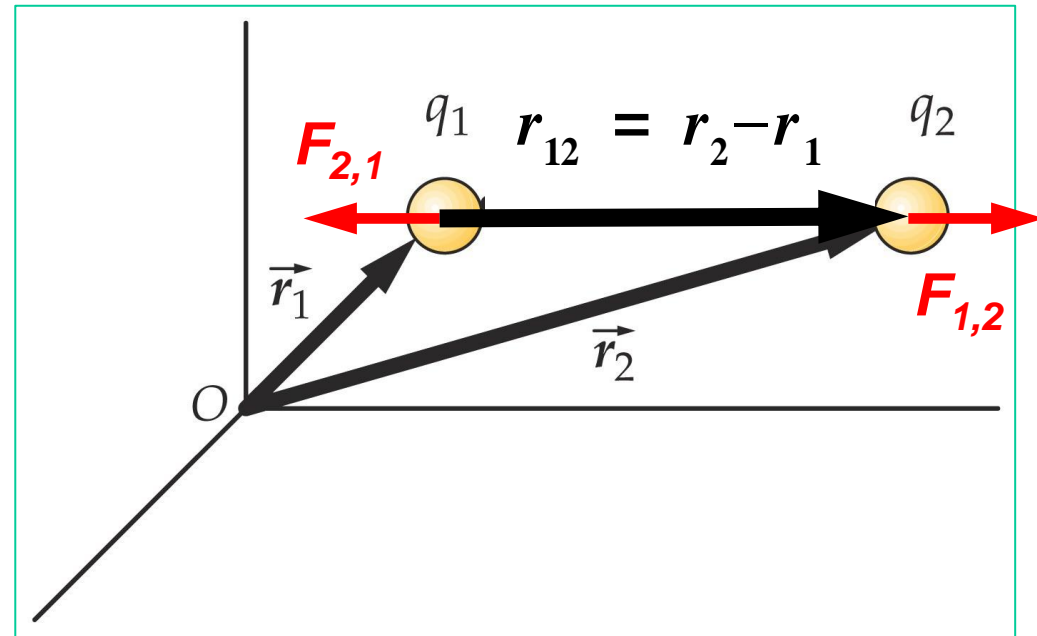
Expresión *cuantitativa* de la fuerza $\mathbf{F}_{1,2}$ entre cargas eléctricas *puntuales* q_1 y q_2 separadas por una distancia $r_{1,2}$:

$$\mathbf{F}_{1,2} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \hat{\mathbf{u}}_{12}$$

$\mathbf{F}_{1,2}$: fuerza de q_1 **sobre** q_2

$\hat{\mathbf{u}}_{1,2}$: vector **unitario** en la dirección de $\mathbf{r}_{1,2}$

COULOMB'S LAW



Ley de Coulomb

Fuerza entre cargas eléctricas *puntuales* q_1 y q_2 separadas por una distancia $r_{1,2}$: Fuerza $\mathbf{F}_{1,2}$ que la carga q_1 ejerce sobre q_2 :

$$\mathbf{F}_{1,2} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \hat{\mathbf{u}}_{12}$$

- Constante k en la Ley de Coulomb:

$$k = 8.99 \cdot 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2$$

$$k = 1 / (4 \pi \epsilon_0); \quad \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{N m}^2$$

Equivalentemente:

$$\mathbf{F}_{1,2} = \frac{1}{4 \pi \epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \hat{\mathbf{u}}_{12}$$

Carga eléctrica: propiedades

- La carga *se conserva* en todo tipo de procesos conocidos: reacciones químicas, nucleares, etc.
- La carga está *cuantizada* en la Naturaleza:
 - Aparece siempre en *múltiplos enteros* de la *carga elemental e*:

$$e = 1.602177 \times 10^{-19} \text{ C} \approx 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

21-1

FUNDAMENTAL UNIT OF CHARGE

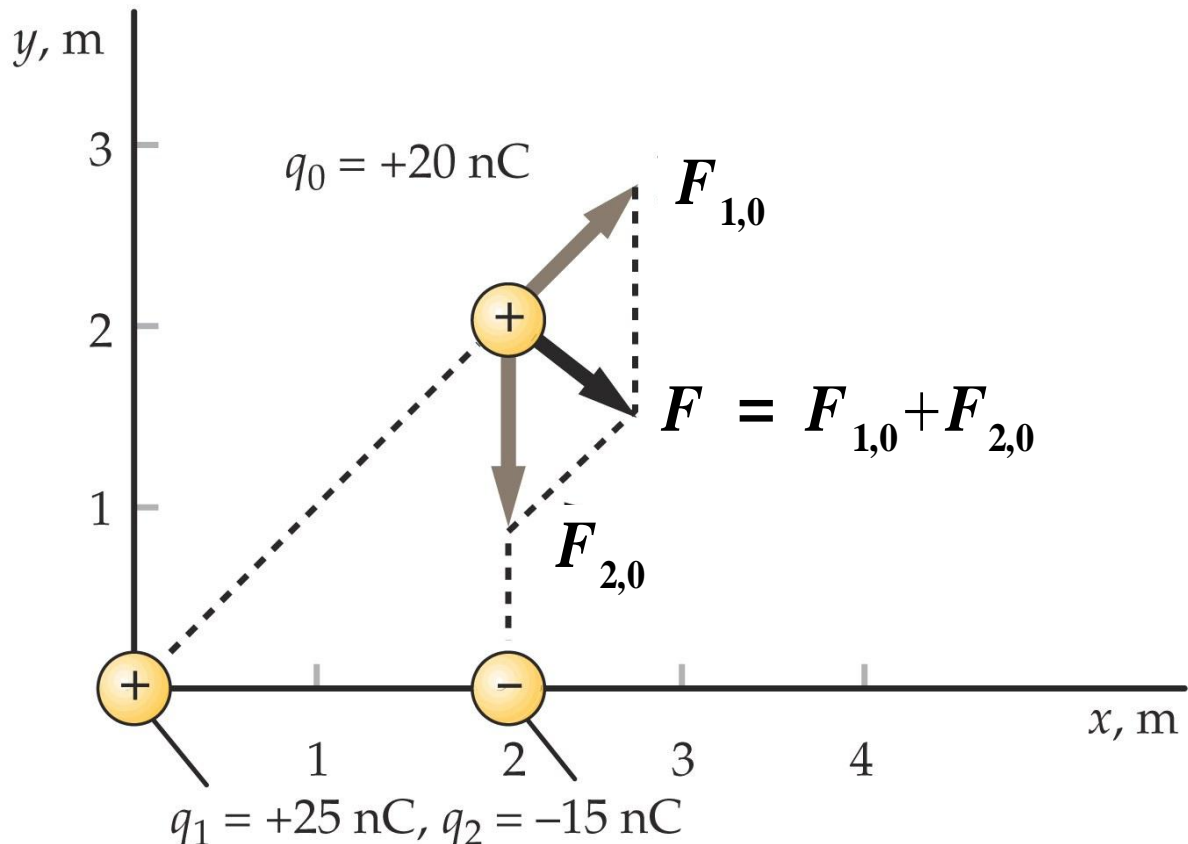
- Ejemplos:
 - $q_{\text{protón}} = + e$
 - $q_{\text{electrón}} = - e$

Ley de Coulomb: Principio de Superposición

- Las fuerzas son *aditivas*
- Las fuerzas son *vectores*



$$\mathbf{F} = \sum_i \mathbf{F}_i$$



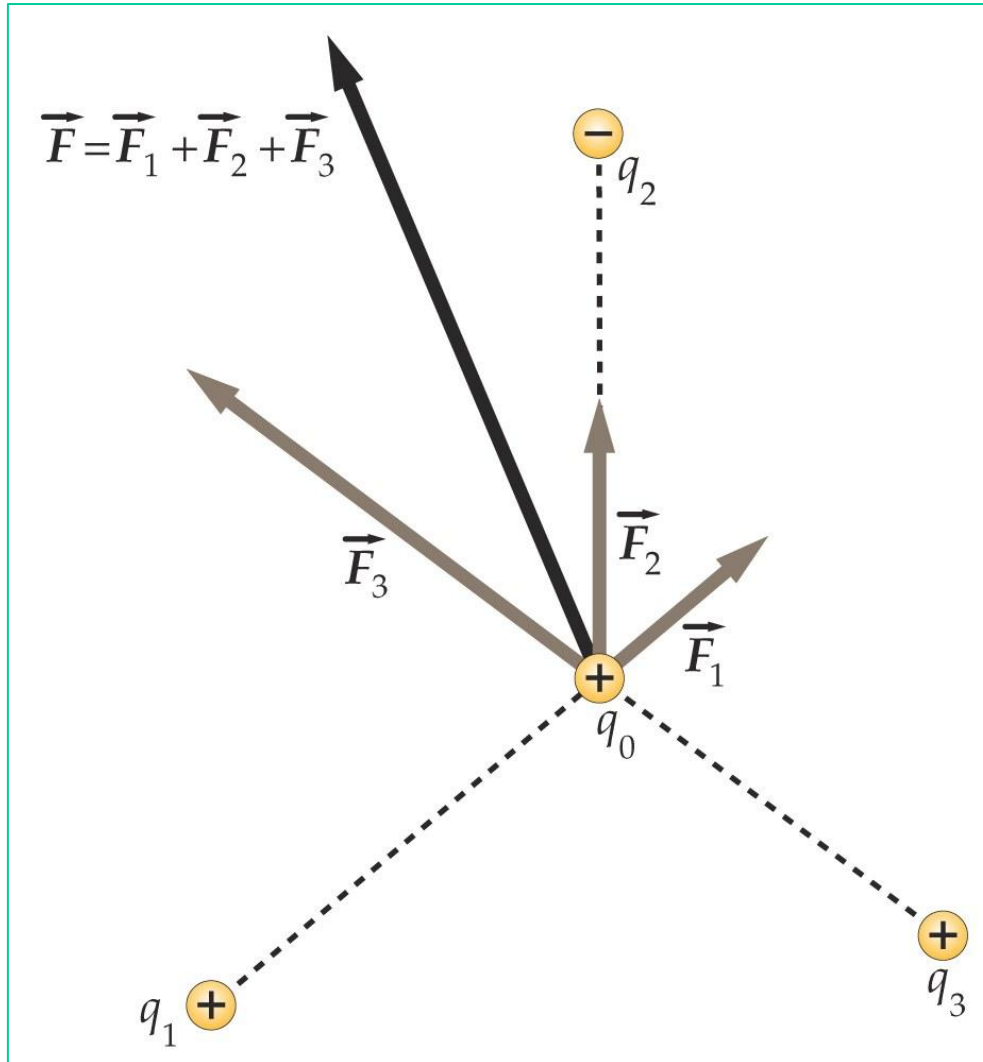
Ejemplo (21.5 Tipler):

Fuerza neta \mathbf{F} ejercida por las cargas q_1 y q_2 sobre q_0 :

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_{1,0} + \mathbf{F}_{2,0}$$

¡¡ Suma *vectorial* !!

Ley de Coulomb: Principio de Superposición



$$\mathbf{F} = \sum_i \mathbf{F}_i$$

Varias cargas. Ejemplo:

Fuerza neta \mathbf{F} ejercida por tres cargas q_1 , q_2 y q_3 sobre q_0 :

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \mathbf{F}_3$$

!! Suma vectorial !!

Campo eléctrico

J.E. Prieto

Fuente principal de figuras:

“Physics for scientists and engineers (5th edition),
P.A. Tipler, G. Mosca

Campo eléctrico: concepto

- Origen “histórico”: Fuerza entre cargas en el vacío (Ley de Coulomb):
 - *Acción “a distancia”*: Dificultades “filosóficas” o “metafísicas”
- “Solución”: concepto de *campo*:
 - *Campo eléctrico*: describe un “estado del espacio” en el que se ejercen fuerzas sobre cargas eléctricas. La presencia de *una carga “fuente”* q_1 *perturba* el espacio que la rodea: *crea un campo eléctrico* \mathbf{E} , de manera que *otra carga “de prueba”* q_2 situada en el punto \mathbf{r} *sufre una fuerza eléctrica* $\mathbf{F}_{1,2}$

$$\mathbf{F}_{1,2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \hat{\mathbf{u}}_{12}$$

Campo eléctrico: concepto

- F es *proporcional* al valor de la *carga de prueba* q . Dividiendo F entre q obtenemos una *caracterización del espacio en el punto r* .

Definimos el *campo eléctrico* E en la posición r como:

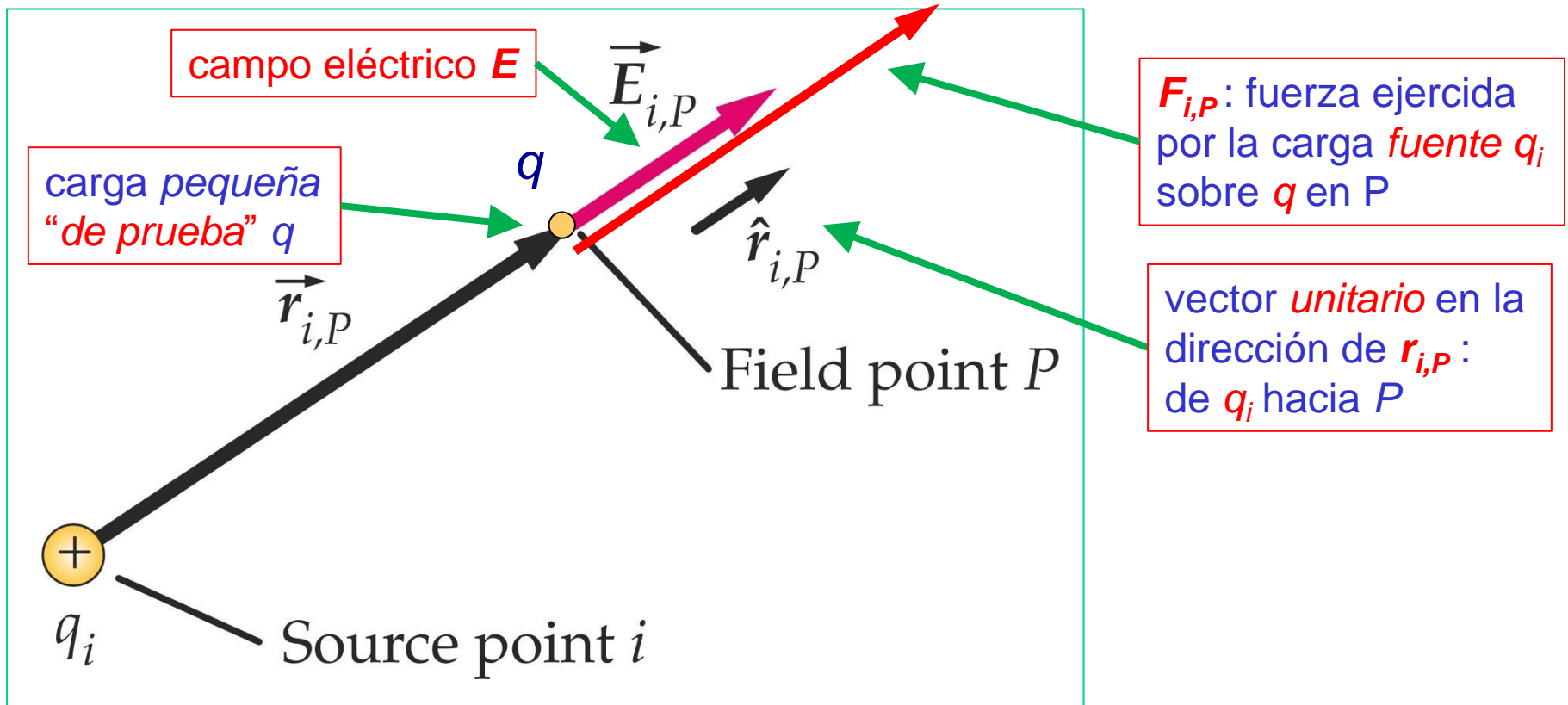
$$\mathbf{E} \equiv \frac{\mathbf{F}_q}{q},$$

donde \mathbf{F}_q es la fuerza sobre la carga (pequeña) *de prueba* q en r .

- Unidades: $[E] = [F] / [q] = \text{N} / \text{C}$
- Conocido el campo $\mathbf{E}(r)$, podemos calcular la fuerza \mathbf{F}_q sobre una carga q situada en r :

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

Ejemplo: Campo eléctrico en el punto P creado por una carga puntual q_i



$$\mathbf{E} \equiv \frac{\mathbf{F}_q}{q}$$

Definición de campo eléctrico (con q pequeña).

Ejemplo: Campo eléctrico en el punto P creado por una carga puntual q_i

Expresión analítica: Ley de Coulomb.
Fuerza ejercida por q_i sobre q (en P):

$$\mathbf{F}_{i,P} = k \frac{q_i q}{r_{i,P}^2} \hat{\mathbf{u}}_{i,P}$$

→

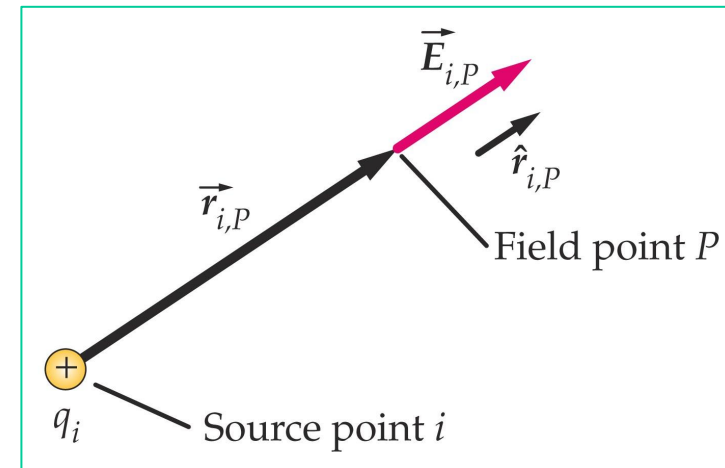
$$\mathbf{E}_{i,P} = k \frac{q_i}{r_{i,P}^2} \hat{\mathbf{u}}_{i,P}$$

vector unitario en la dirección de $\mathbf{r}_{i,P}$:
de q_i hacia P

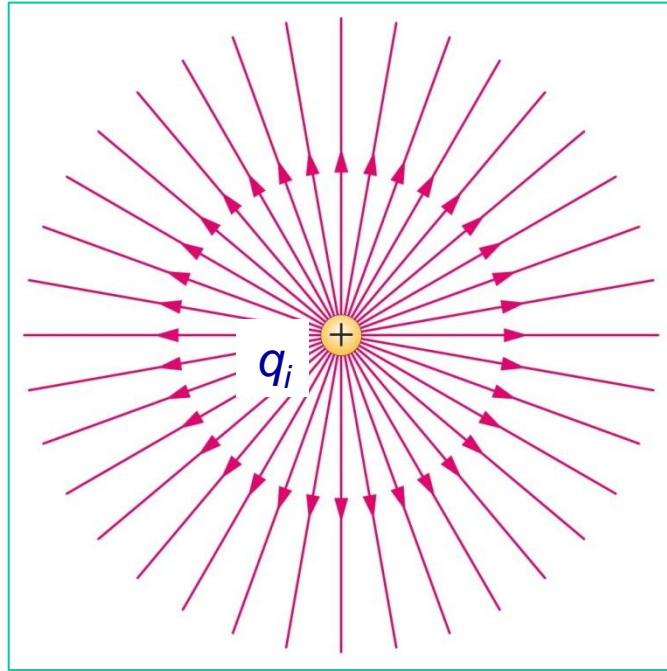
Ley de Coulomb:
campo eléctrico creado por una
carga puntual q_i a una distancia $r_{i,P}$

Definición de
campo eléctrico:

$$\mathbf{E} \equiv \frac{\mathbf{F}}{q}$$

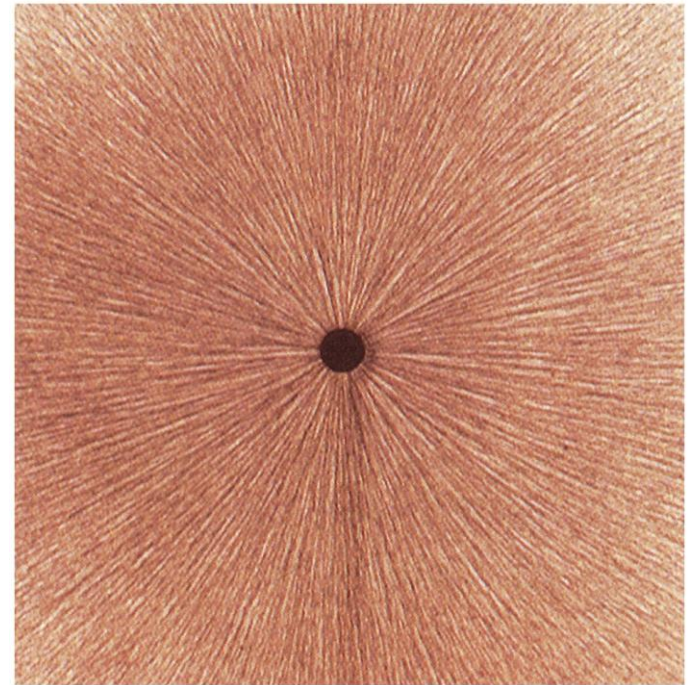


Ejemplo: Campo eléctrico creado por una carga puntual q_i



Líneas de campo \mathbf{E} :

- Indican la *dirección* de la fuerza \mathbf{F} sobre una carga de prueba q
- Densidad de líneas: ilustra la intensidad de \mathbf{E}

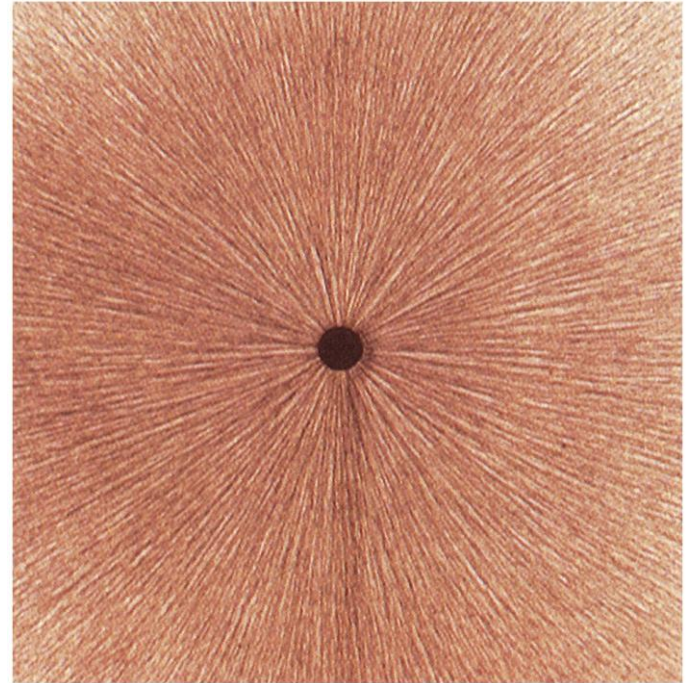
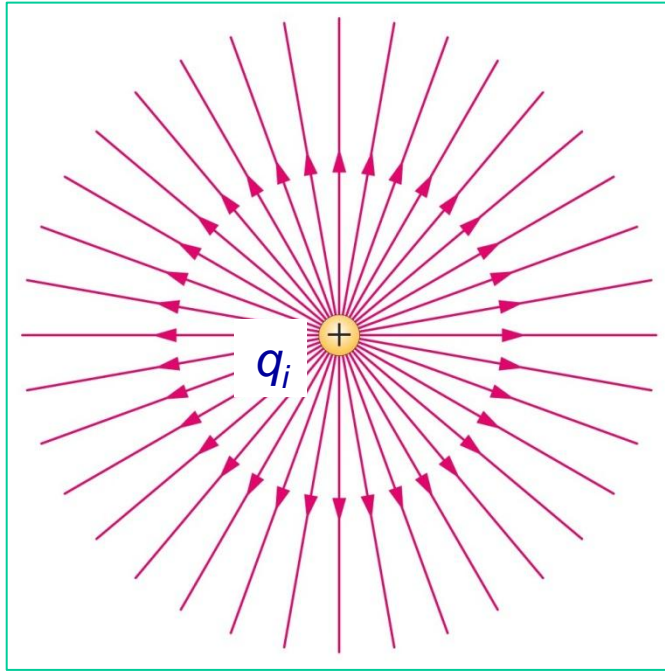


Visualización de líneas de campo \mathbf{E} con hebras de hilo suspendidas en aceite

- \mathbf{E} apunta en la dirección *radial* alrededor de la carga puntual q_i
- \mathbf{E} tiene *simetría esférica* alrededor de q_i

Ejemplo: Campo eléctrico creado por una carga puntual

¡ Atención !



- Campo \mathbf{E} de una carga puntual (Coulomb): estructura muy simple y muy simétrica, pero... ¡ **no es homogéneo** !
- No tiene en todo lugar *el mismo módulo* (depende de r)
- No tiene en todo lugar *la misma dirección* (tiene la dirección **radial** alrededor de la carga puntual q_i)

Ejemplo: Campo eléctrico creado por un conjunto *discreto* de cargas puntuales q_i

- Las fuerzas son *aditivas* → el campo \mathbf{E} es *aditivo*
- La fuerza y el campo son *vectores*

→ *Principio de superposición*

$$\mathbf{E}_P(\mathbf{r}) = \sum_i \mathbf{E}_{i,P} = \sum_i \frac{k q_i}{r_{i,P}^2} \hat{\mathbf{u}}_{i,P} = \sum_i \frac{k q_i}{(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i)^2} \hat{\mathbf{u}}_{i,P}$$

Campo eléctrico \mathbf{E} en el punto P (en \mathbf{r}) producido por un conjunto de cargas *puntuales* q_i situadas en \mathbf{r}_i .

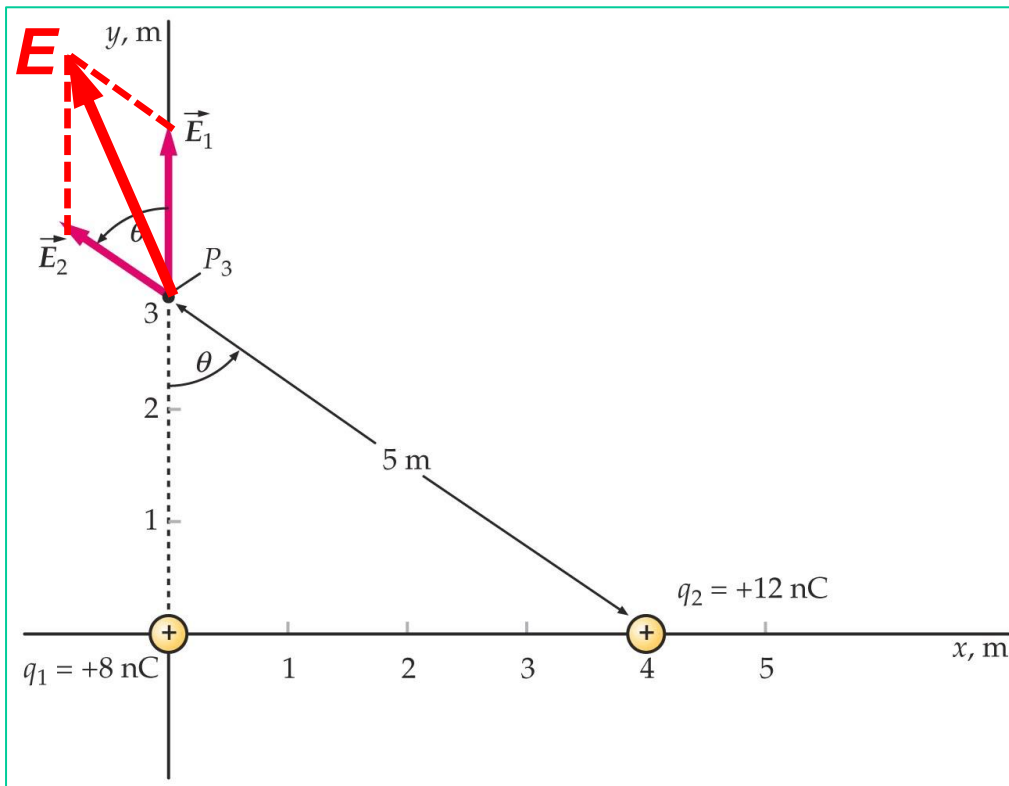
\mathbf{E} es el resultante de la *suma vectorial* de los campos \mathbf{E}_i creados por cada una de las cargas q_i

Principio de Superposición para el campo eléctrico

Ejemplo (21.7 Tipler):

$$\mathbf{E} = \sum_i \mathbf{E}_i$$

Campo \mathbf{E} creado por las cargas q_1 y q_2 (situadas sobre el eje x) en un punto P_3 (sobre el eje y):



campo
creado por q_1

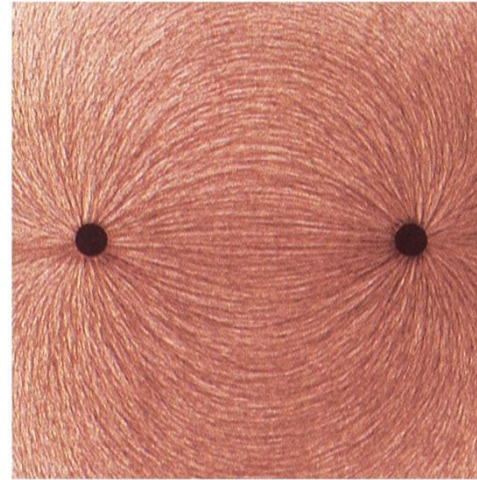
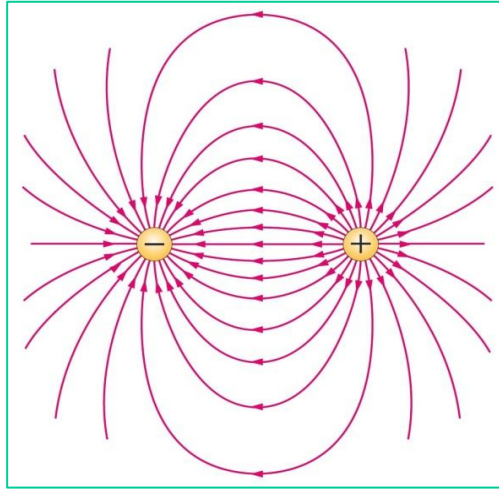
campo
creado por q_2

$$\begin{aligned}\mathbf{E} &= \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 \\ E_x &= 0 + E_{2x} \\ E_y &= E_{1y} + E_{2y}\end{aligned}$$

¡¡ Suma vectorial !!

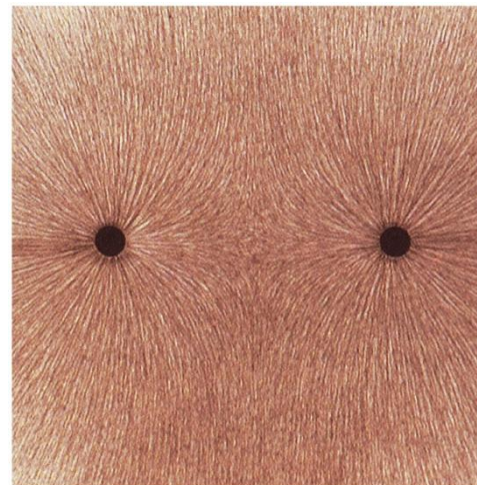
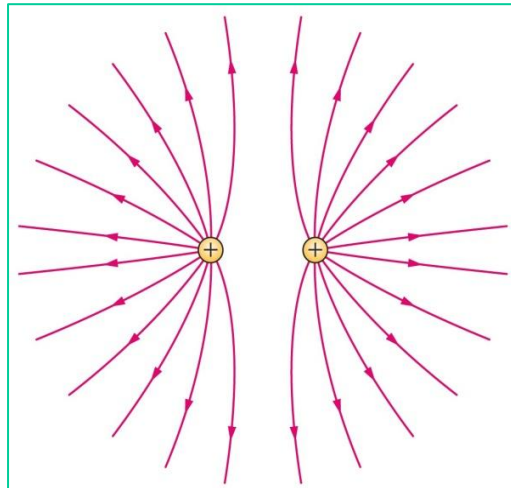
Ejemplo: campo eléctrico creado por *dos* cargas puntuales

Dos cargas de *signos opuestos*



Cálculo de E :

Dos cargas del *mismo signo*



Principio de superposición

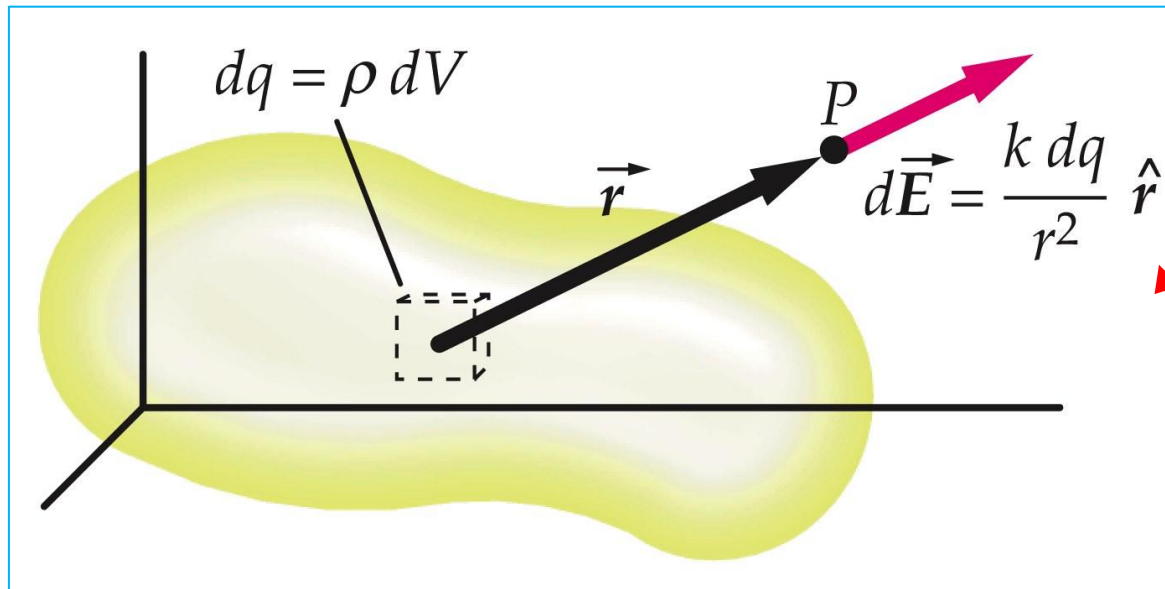
Campo eléctrico creado por una distribución *continua* de carga

- Principio de superposición: \mathbf{E} es el resultante de la *suma vectorial* de los campos $d\mathbf{E}$ creados por todos los elementos de carga dq

→ suma se transforma en *integral*

Concepto importante:

densidad de carga $\rho = dq / dV$



campo $d\mathbf{E}$
creado en \mathbf{r} por
carga $dq = \rho dV$

vector *unitario* en
la dirección de \mathbf{r} :
de dq hacia P

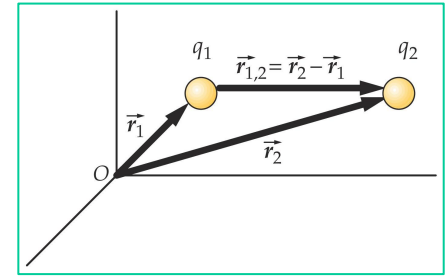
$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E} = \int \frac{k dq}{r^2} \hat{u}_{dq, P}$$

- $d\mathbf{E}$ se suma a todas las cargas dq :
→ se integra ρdV al volumen V

Resumen (1)

- Ley de Coulomb:

$$\mathbf{F}_{1,2} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \hat{\mathbf{u}}_{12}$$

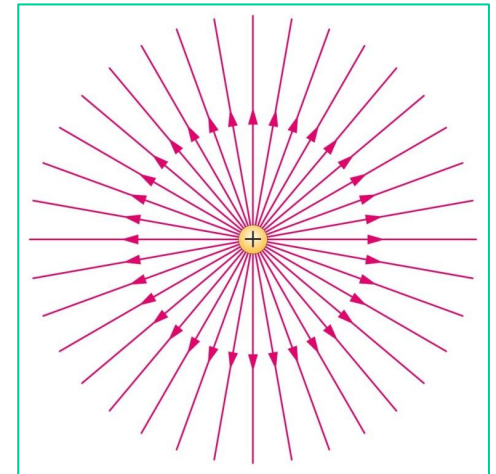


- Campo eléctrico \mathbf{E} :

$$\mathbf{E} \equiv \frac{\mathbf{F}}{q}$$

- Campo \mathbf{E} de una carga puntual q_i (Coulomb):

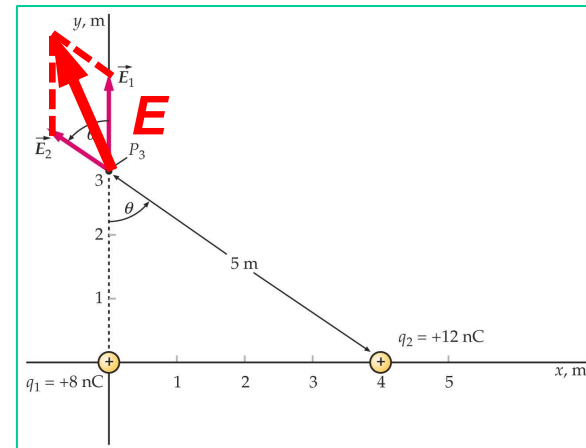
$$\mathbf{E}_{i,P} = k \frac{q_i}{r_{i,P}^2} \hat{\mathbf{u}}_{i,P}$$



Resumen (2)

- Principio de *superposición* (los campos son aditivos):
 - Para una colección *discreta* de *cargas puntuales*:

$$E_P(\mathbf{r}) = \sum_i E_{i,P}$$



- Para una *distribución continua* de carga:

$$E_P = \int dE = \int \frac{k dq}{r^2} \hat{u}_{dq,P}$$

