Física II

Clase # 2

- Campo eléctrico & Líneas de fuerzas
- Campo eléctrico y conductores
- Movimiento de partículas en un campo eléctrico
- Dipolos eléctricos

Este apunte sólo constituye una guía de estudio de los temas desarrollados en el curso. De ninguna manera reemplaza la bibliografía sugerida, la cual deberá ser consultada necesariamente por los alumnos para lograr una visión más detallada de cada temática.

Marcelo S. Nazzarro

Fuerza eléctrica

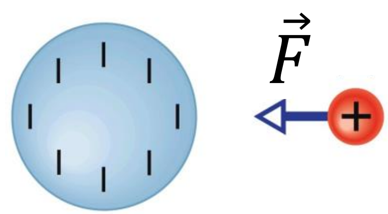
Ley de Coulomb

En la clase anterior vimos la **Ley de Coulomb** que establece que entre dos partículas cargadas aparece una **fuerza eléctrica** .

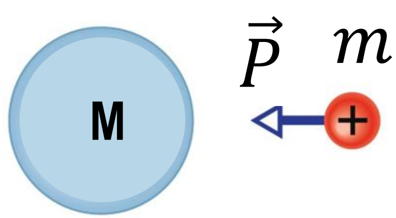
En el esquema vemos dos cargas positivas, en donde la carga $\mathbf{q_1}$ genera una fuerza sobre la carga $\mathbf{q_2}$.

De la misma manera la carga $\mathbf{q_2}$ genera una fuerza sobre la carga $\mathbf{q_1}$, recordemos que estas fuerzas deben ser, y de hecho lo son, iguales y opuestas para que cumplan con la tercera Ley de Newton.

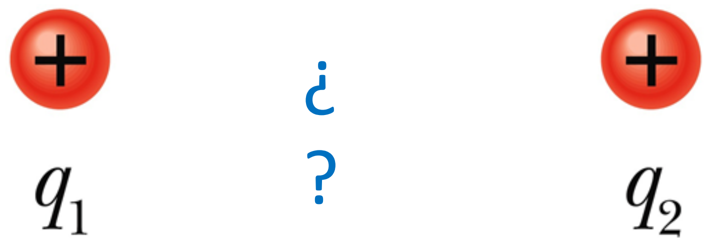
Si una de las cargas es negativa, como observamos en la segunda figura, la interacción es del tipo atractiva, en este caso, hemos representado únicamente la fuerza que actúa sobre la carga positiva.



Podemos hacer una analogía con el caso de masas gravitatorias. En el esquema hemos indicado solamente la fuerza que actúa sobre la masa pequeña. Ustedes ya vieron en Física 1, que a esa fuerza generada por la aceleración de la gravedad, se la llama peso.



El Campo Eléctrico



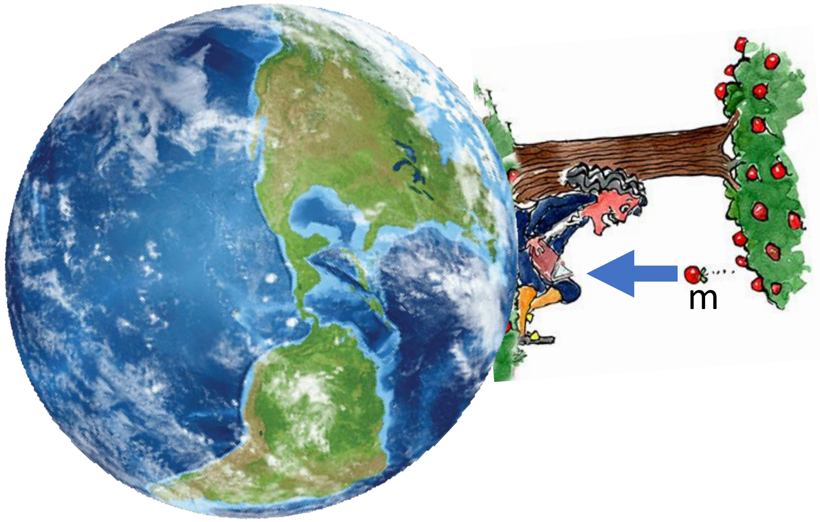
Ahora, cuando tenemos dos cargas separadas cierta distancia, ¿Cómo “sabe” o cómo “se entera” la carga $\boldsymbol{q_1}$ de la presencia de la carga $\boldsymbol{q_2}$? Es decir, dado que las carga**s** no se “tocan”, ¿cómo puede la carga $\boldsymbol{q_2}$ ejercer una fuerza sobre la carga $\boldsymbol{q_1}$?

¿Cómo puede haber tal acción a distancia?

Campos

Repasando el concepto de campo

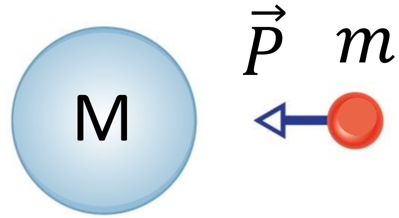
1 Así como Ustedes vieron en el curso de Física I, que cuando cae una manzana de un árbol es porque está interactuando **la masa** de la manzana con **la masa** de la tierra, también vieron que se puede ver como una interacción de la manzana, ya no directamente con la tierra, sino con el **campo gravitacional** que genera la tierra



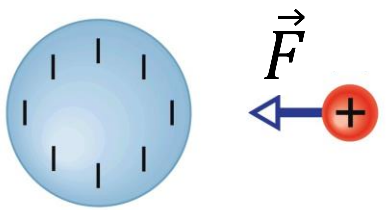
2 Esta es una interpretación más **moderna** basada en el **concepto de campo**, donde se propone al campo como un **intermediario**.

3 Decimos que es una interpretación más moderna porque antes de la noción de campo se creía en la **"Acción a distancia",** en el sentido de "**interacción instantánea"** y suponer la **acción a distancia instantánea** entre las partículas **viola** la Teoría Especial de la Relatividad, porque esta teoría **limita** la velocidad de propagación de la información a la velocidad de la Luz. Esto es, <u>ninguna información</u> puede transmitirse a una velocidad mayor que la <u>velocidad de la luz</u>, **<u>No</u>** <u>existen las interacciones instantáneas.</u>

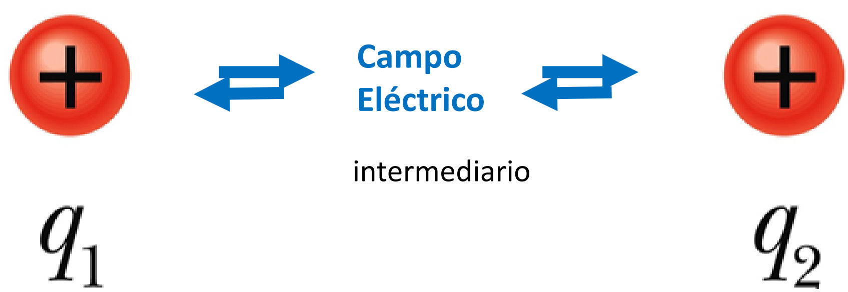
El Campo Eléctrico



Entonces, como dijimos, en el espacio alrededor de cualquier masa se genera un campo gravitacional, este campo gravitacional altera las propiedades del espacio en cada punto, y esa alteración es la que la masa siente, o percibe, como una fuerza.



Esta interpretación aplicada al caso de la interacción entre partículas con masa podemos aplicarla a partículas con **carga eléctrica**. ¿Qué sucede con una carga eléctrica? **Si lo vemos con la misma perspectiva podemos pensar que toda carga eléctrica perturba las propiedades del espacio a su alrededor, generando un Campo Eléctrico**.



El Campo Eléctrico

¿Cómo detectarlo ?

Michael Faraday desarrolló las primeras ideas de campo

La presencia de un campo eléctrico puede detectarse con una pequeña* carga de prueba.

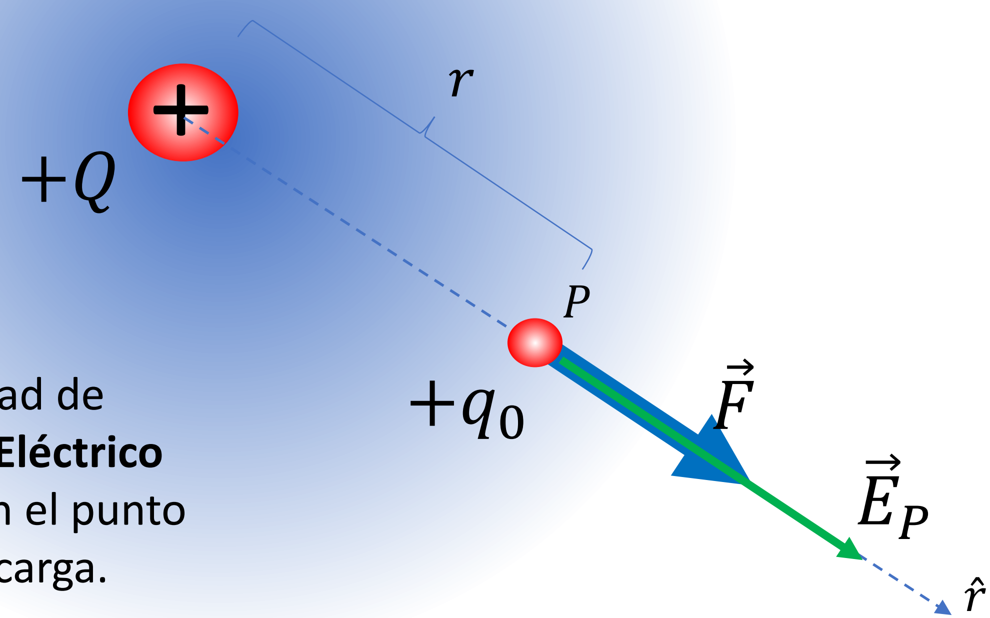
¿Cómo definimos al Campo Eléctrico?

El campo eléctrico en cualquier punto del espacio está definido como la fuerza ejercida sobre una pequeña carga de prueba positiva dividida por la magnitud de dicha carga

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$$

Entonces si elegimos un punto ***P*** a una dada distancia ***r*** …

y en ese punto ***P*** colocamos una carga de prueba $\boldsymbol{q_0}$ positiva…



Y luego calculamos la fuerza por unidad de carga obtendremos el vector **Campo Eléctrico** generado por una carga puntual ***Q*** en el punto P ubicado a una distancia **r** de dicha carga.

El Campo Eléctrico

Si aplicamos los pasos de la diapositiva anterior obtenemos:

La Fuerza sobre q_o según la Ley de Coulomb es

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Qq_0}{r^2}\hat{r}$$

y el campo en el punto P queda expresado como

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{r^2}\hat{r}$$

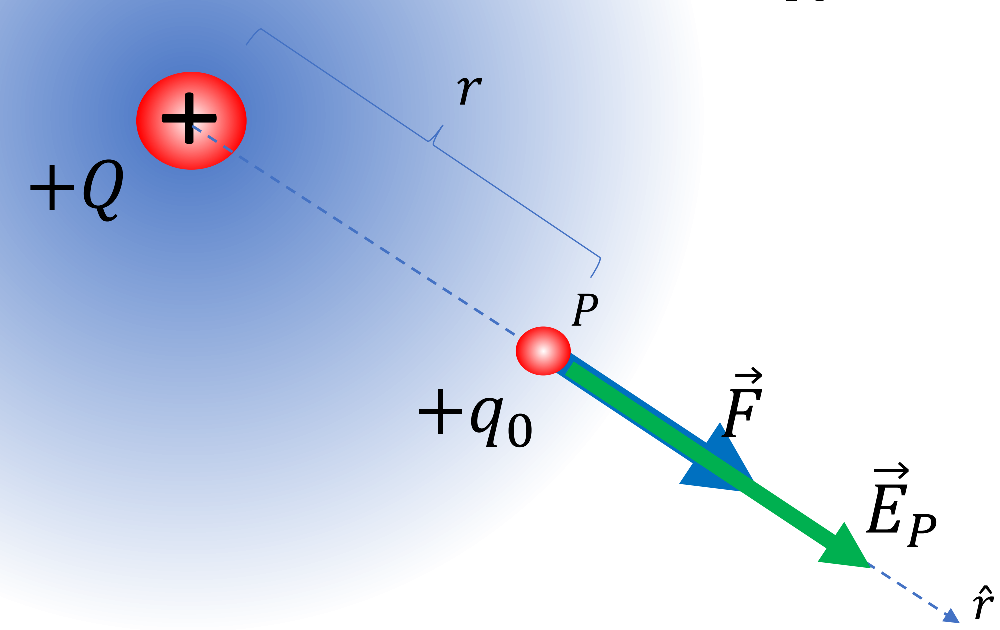
La magnitud del Campo Eléctrico generado por una carga puntual Q a una distancia r es

$$\boxed{E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{r^2}}$$

y su unidad N/C

$$Donde\ \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = K$$

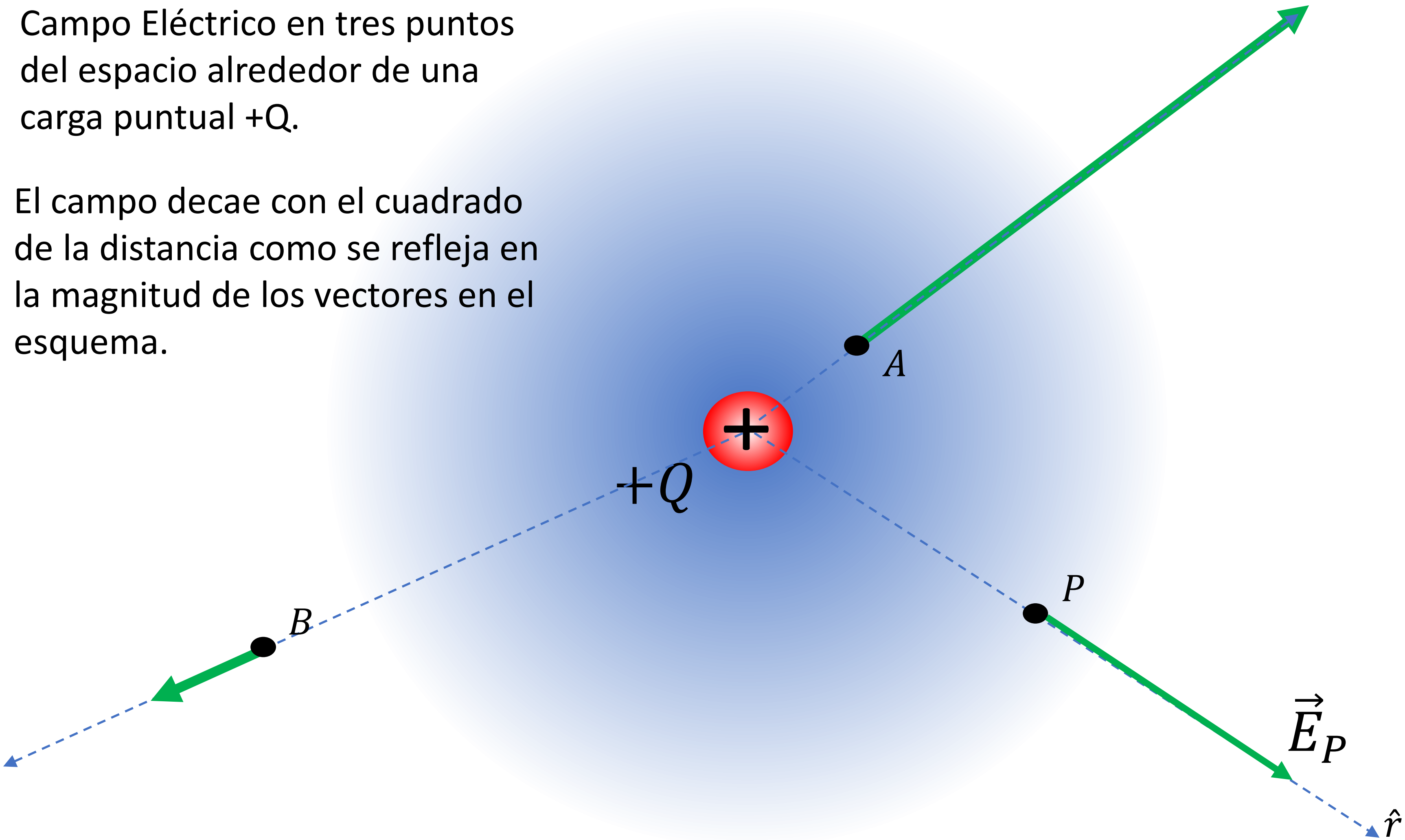
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$$



El Campo Eléctrico

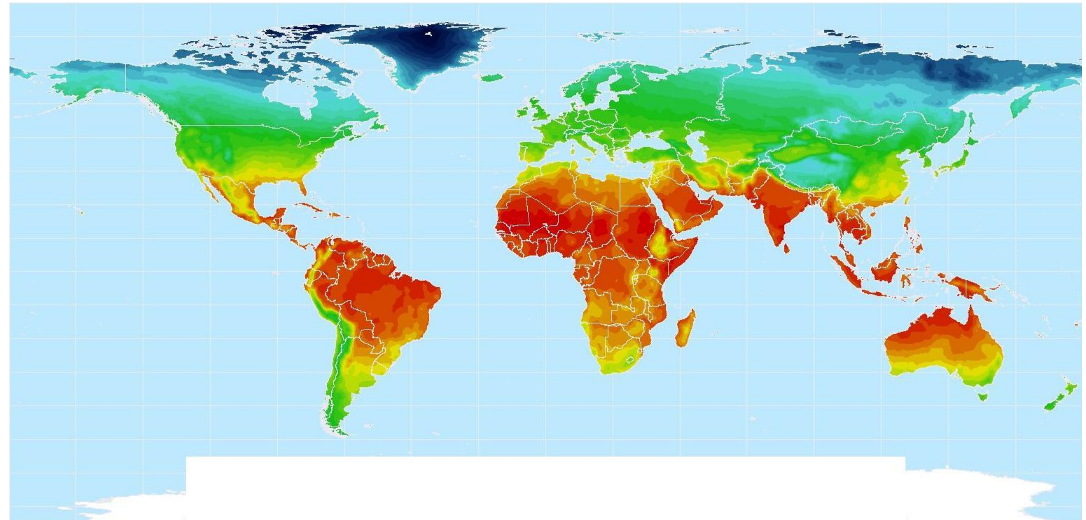
Campo Eléctrico en tres puntos del espacio alrededor de una carga puntual +Q.

El campo decae con el cuadrado de la distancia como se refleja en la magnitud de los vectores en el esquema.

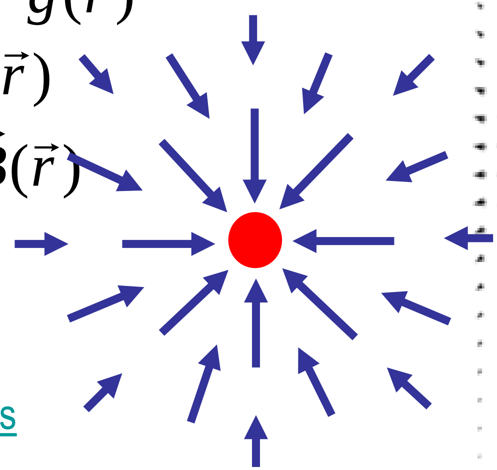


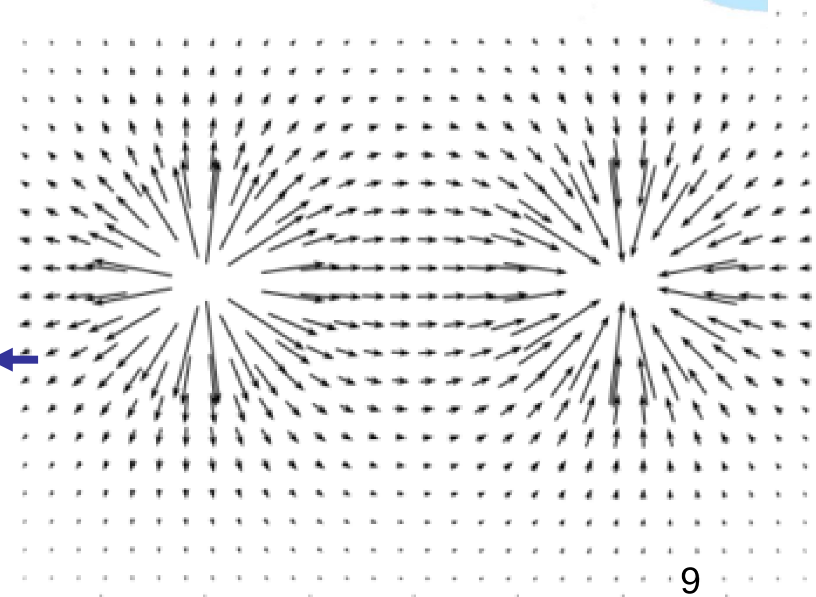
Campos

- **Campos escalares:**
  - Temperatura $T(\vec{r})$
  - Presión $P(\vec{r})$
  - Energía Potencial $U(\vec{r})$



- **Campos vectoriales:**
  - Campo Velocidad $\vec{V}(\vec{r})$
  - Campo Gravitacional $\vec{g}(\vec{r})$
  - Campo Eléctrico $\vec{E}(\vec{r})$
  - Campo Magnético $\vec{B}(\vec{r})$





Link ejemplo: vientos

El campo eléctrico

Expresión vectorial

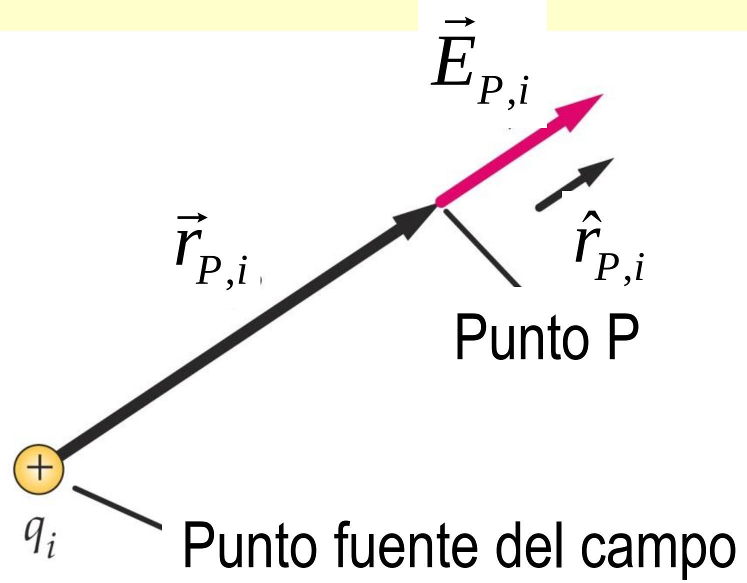
$$E_{P,i} = k\frac{q_i}{r_{P,i}^2}\hat{r}_{P,i}$$

Campo eléctrico generado por la carga q_i en el punto P

$$\hat{r}_{P,i} = \frac{\vec{r}_{P,i}}{r_{P,i}}$$

Vector unitario

$donde\ \ \vec{r}_{P,i} = \vec{r}_P - \vec{r}_i$



Para el caso de múltiples cargas puntuales aplicamos el principio de superposición*

$$\vec{E}_P = \vec{E}_{P,2} + \vec{E}_{P,3} + \vec{E}_{P,4} + .. + \vec{E}_{P,N}$$

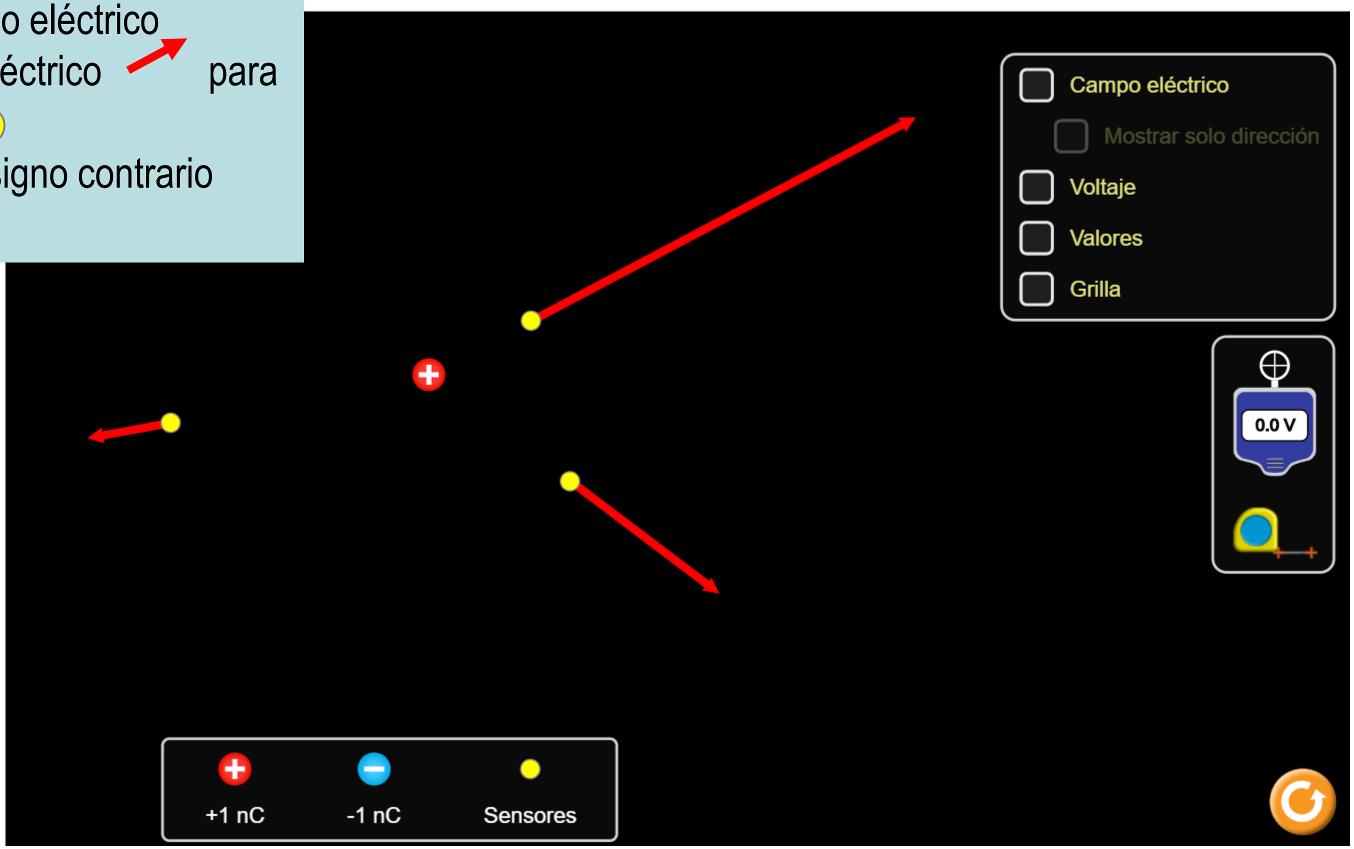
El principio de superposición del campo eléctrico ha sido verificado por experimentos. *Aunque no se cumple para campos extremadamente grandes

CAMPO ELÉCTRICO

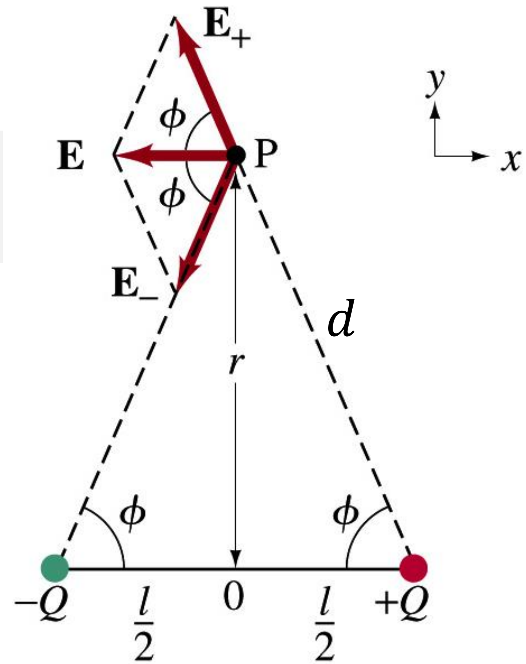
Simulación Interactiva

1) Ingresar al link
2) Desmarcar los casilleros de la esquina derecha
3) Agregar una carga
4) Agregar un sensor de campo eléctrico
5) observar el vector campo eléctrico para cada ubicación del punto
6) Repetir para una carga de signo contrario

Utilizar el link disponible en la Clase 2 de Classroom



Campo eléctrico debido a una distribución discreta de cargas



Problema: Calcular el campo en el punto P generado por dos cargas de igual magnitud pero de signos opuestos y separadas una distancia l tal como se muestra en la figura

Calcular el campo que cada carga genera en el punto P. En este caso llamaremos E_+ al campo eléctrico que genera +Q en el punto P y E_- al campo eléctrico que genera -Q en el punto P , sus módulos quedan expresados así:

$$|E_+| = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{d^2} \qquad |E_-| = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{d^2}$$

Y vectorialmente:

$$\vec{E}_+ = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{d^2}\cos\emptyset\ \hat{x} + \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{d^2}\operatorname{sen}\emptyset\ \hat{y}$$

$$\vec{E}_- = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{d^2}\cos\emptyset\ \hat{x} - \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{d^2}\operatorname{sen}\emptyset\ \hat{y}$$

Si aplicamos el principio de superposición y sumamos los vectores obtenemos el campo eléctrico total en el punto P :

$$\vec{E}_P = -\frac{2}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{d^2}\cos\emptyset\, A\ \ \hat{x}$$

Utilizar el link de la simulación interactiva para para armar la configuración de carga de la figura (configuración conocida como dipolo eléctrico) y encontrar en qué otros puntos el campo eléctrico solo tiene componente horizontal

Si expresamos

$$\cos\emptyset = \frac{l/_2}{d}$$

$$d^2 = r^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2$$

obtenemos :

$$\vec{E}_P = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Ql}{\left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)^{3/_2}}\hat{x}$$

El campo eléctrico

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

- Magnitud: $E=F/q_0$
- Dirección y sentido: el que tiene la fuerza que actúa sobre una carga de prueba positiva.
- Unidad en SI: N/C

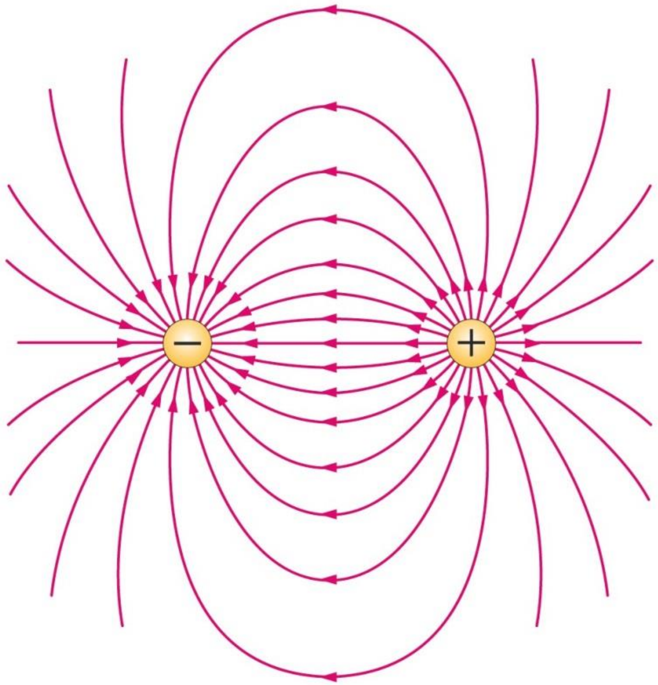
Situación	Valor
En el interior de un cable de cobre de un circuito doméstico	**10^{-2} N/C**
En el interior de un tubo de TV	**10^{5} N/C**
Cerca del cilindro de una fotocopiadora	**10^{5} N/C**
En la orbita del electrón de un átomo de hidrógeno	**5×10^{11} N/C**
Sobre la superficie de un núcleo de uranio	**3×10^{21} N/C**

Líneas de fuerzas

El campo eléctrico es una cantidad vectorial. Así, su magnitud puede ser expresada con la longitud de un vector.

Ya que el campo eléctrico "ocupa" el espacio entero, representarlo gráficamente con vectores <u>no es una buena idea</u>.

Líneas de fuerzas

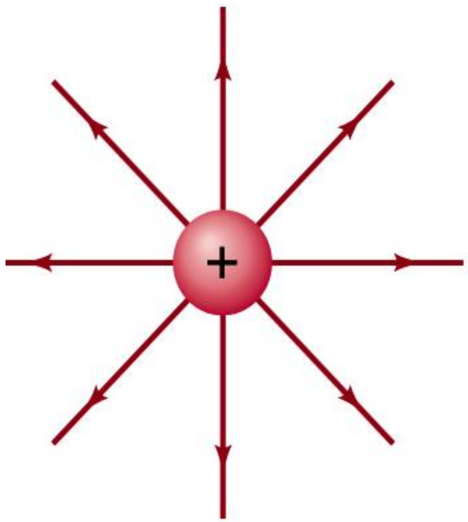


Indican la dirección de la fuerza debido a un campo eléctrico dado sobre una carga de prueba positiva.

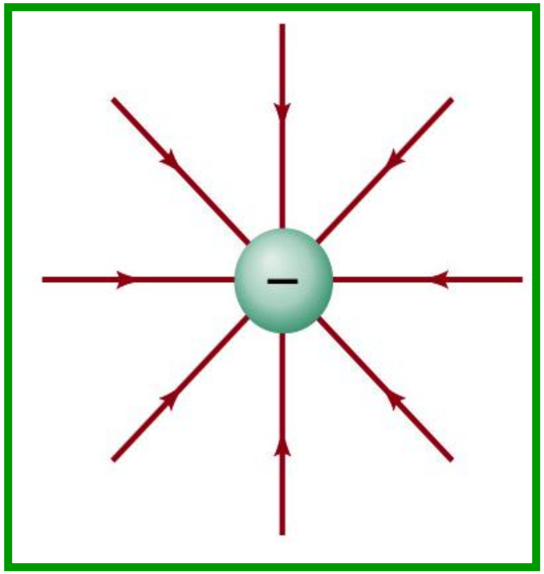
Mayor densidad de líneas → mayor campo en la región

Comienzan en cargas positivas y terminan en cargas negativas

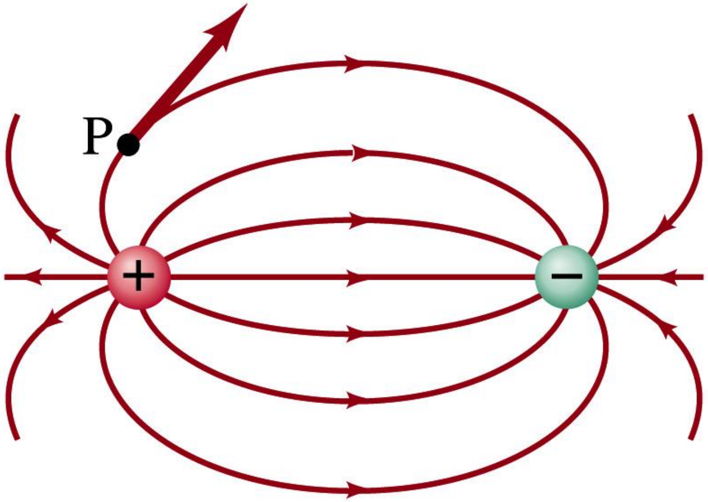
Ejemplos típicos - Líneas de fuerzas



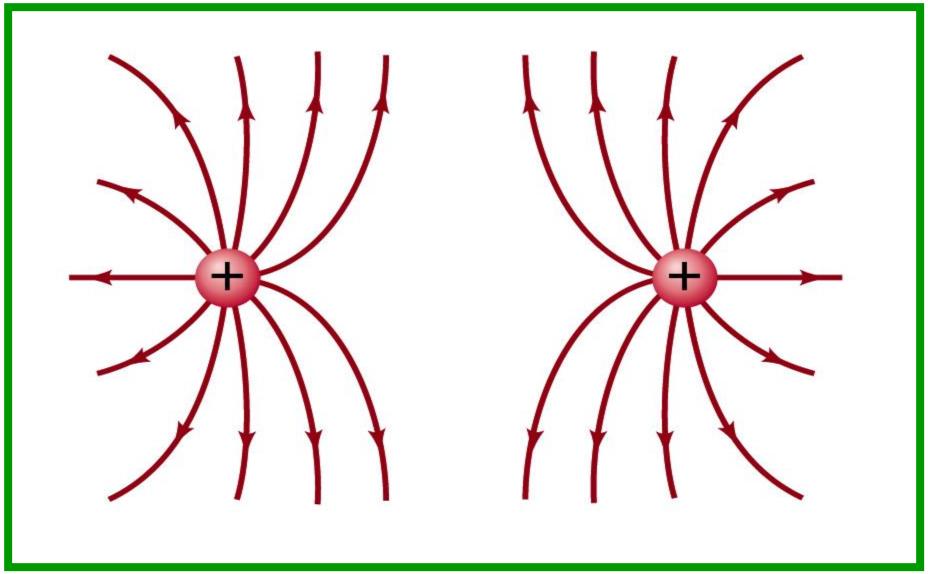
(a)



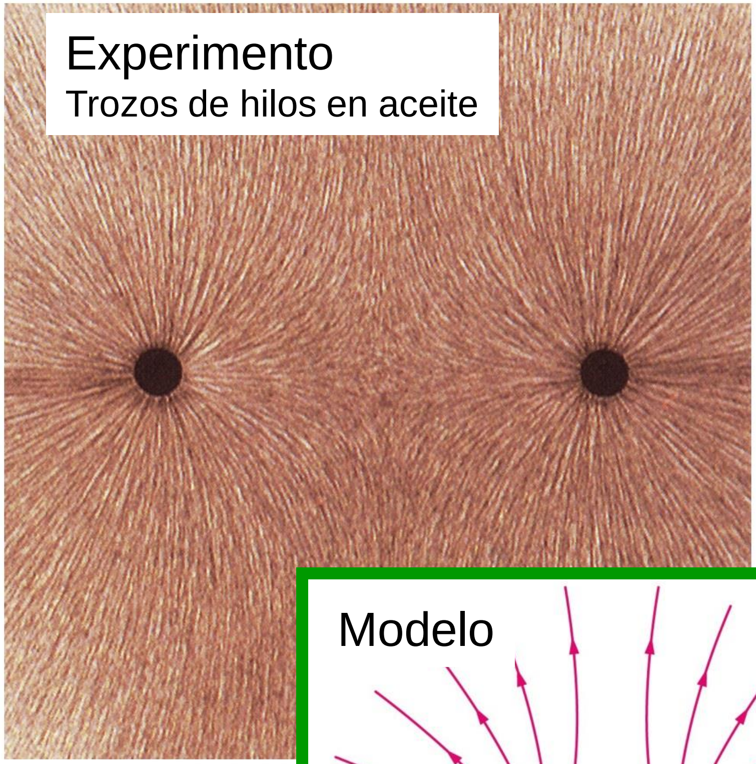
(b)

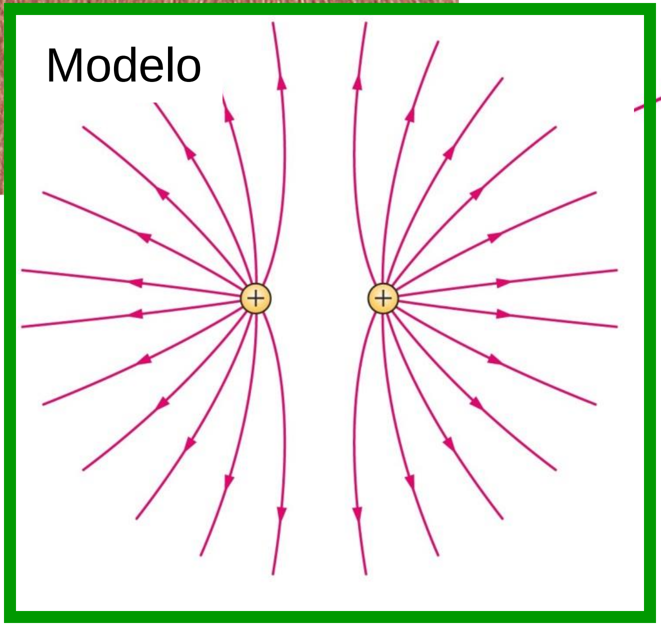


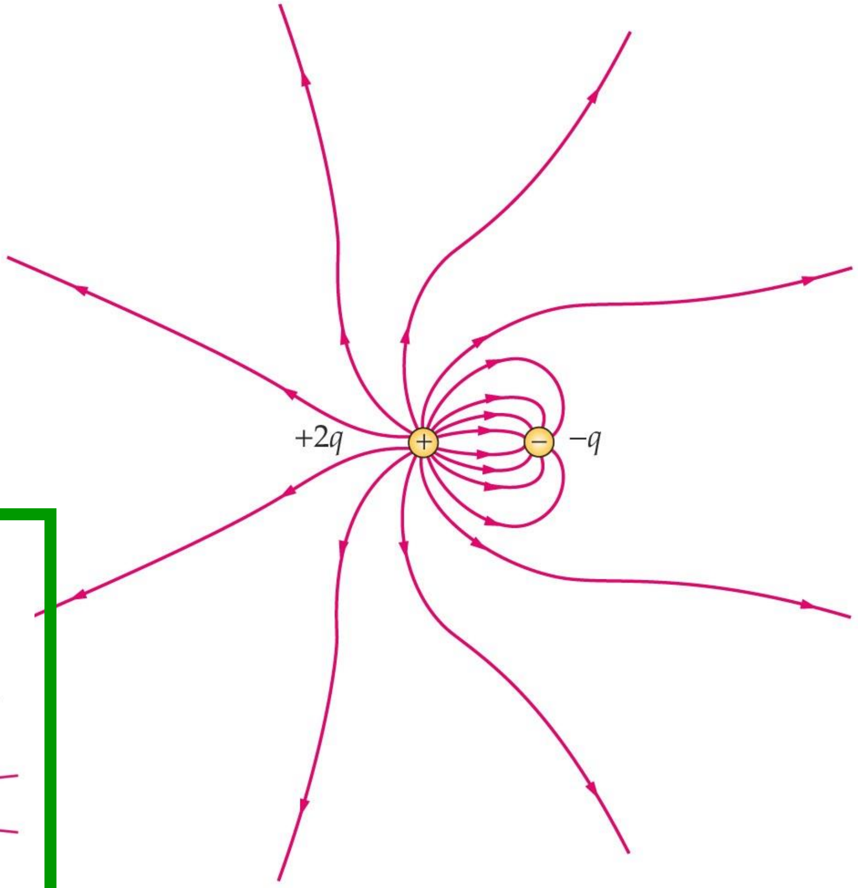
Link a demostración



Líneas de fuerzas …







Link a demostración 2

Link a demostración 3

Campo eléctrico y conductores

Teorema para conductores aislados:

La carga en exceso en un conductor aislado se encuentra en su superficie externa

En condiciones de equilibrio (electrostático!) el campo eléctrico dentro de un conductor aislado es CERO !! Por qué?

Si $E \neq 0$ → $F \neq 0$ **sobre los e⁻ libres** → **Corrientes internas**

Experimentalmente no se observan corrientes

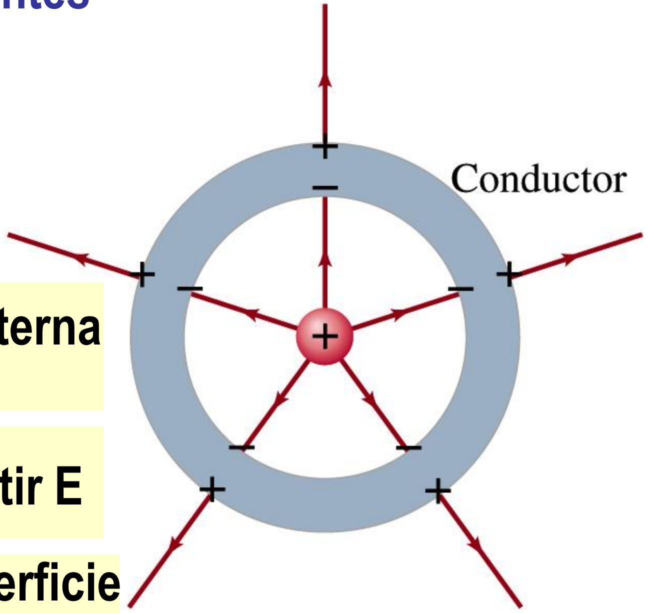
$E = 0$ **dentro de un conductor**

Consecuencias

Cualquier carga neta se distribuye en la superficie externa de manera que E sea cero en su interior

Aunque adentro del conductor E=0 afuera puede existir E

El campo eléctrico es siempre perpendicular a la superficie externa del conductor



Aplicaciones

Jaula de Faraday

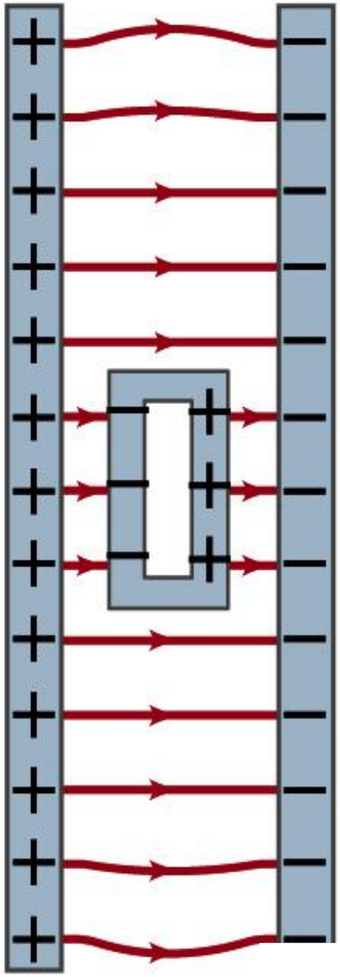
Loco ?

Blindaje eléctrico

Los electrones se redistribuyen sobre la superficie externa de la caja de manera que el campo eléctrico resultante en su interior sea CERO

Así la caja metálica se convierte en un efectivo blindaje

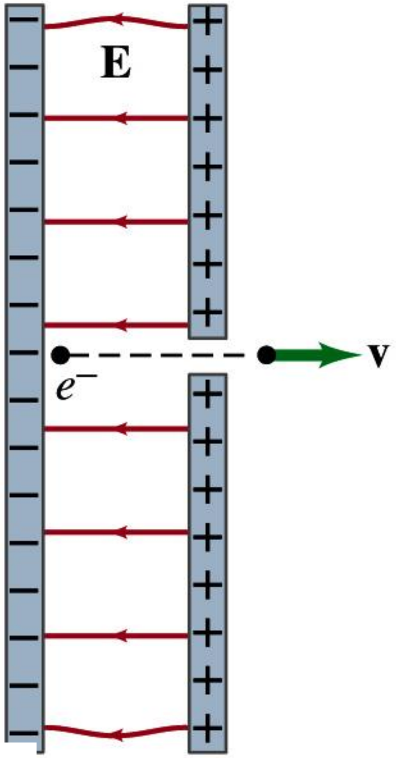
Jaula de Faraday



(b)

Movimiento de una carga en un campo eléctrico. Ejemplo 1

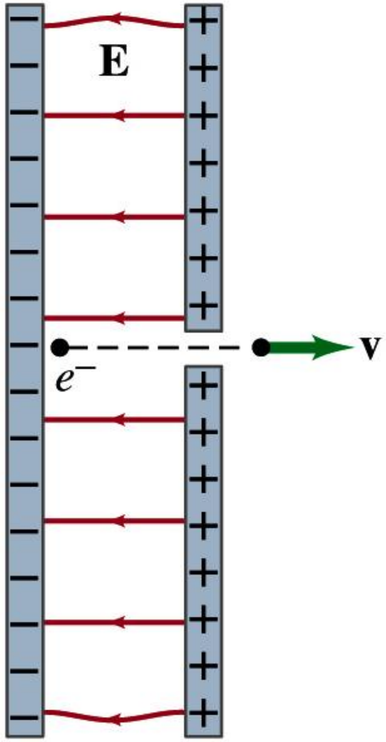
Electrón acelerado por un campo eléctrico.
Un electrón (m = 9.1x10^{-31}kg) es acelerado por un campo uniforme E (E=2.0x10^{4}N/C), entre dos placas paralelas cargadas. La separación entre las placas es 1.5 cm. (a) Con que velocidad abandona el orificio? (b) Podemos ignorar la fuerza gravitacional?. Asumir que el orificio es pequeño (por qué?)



$$F = qE = ma \Rightarrow a = \frac{qE}{m}$$

$$a = \frac{eE}{m_e} = \frac{\left(1.6\times10^{-19}\,C\right)\left(2.0\times10^{4}\,N/C\right)}{\left(9.1\times10^{-31}\,kg\right)} = 3.5\times10^{15}\,m/s^{2}$$

Ejemplo 1, cont.



Utilizando la ecuación ,

$$v^2 = v_0^2 + 2ax$$

$$\therefore v = \sqrt{2ax} = \sqrt{2 \cdot 3.5\times10^{15} \cdot 1.5\times10^{-2}} = 1.0\times10^{7}\ m/s$$

Debido a que no hay campo eléctrico el campo eléctrico, afuera del sistema de dos placas, el electrón seguirá con velocidad cte.

(b) Podemos ignorar la fuerza gravitacional ?

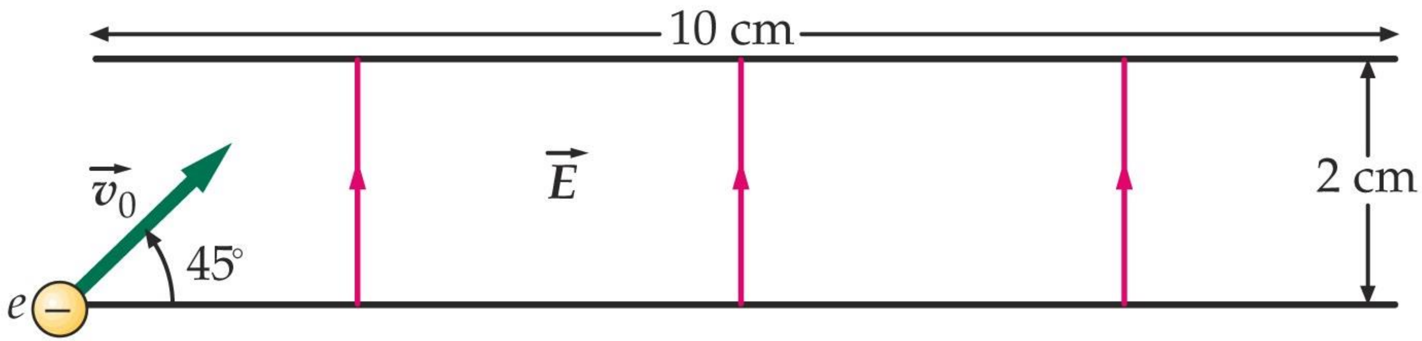
$$F_e = qE = eE = \left(1.6\times10^{-19}C\right)\left(2.0\times10^{4}N/C\right) = 3.2\times10^{-15}N$$

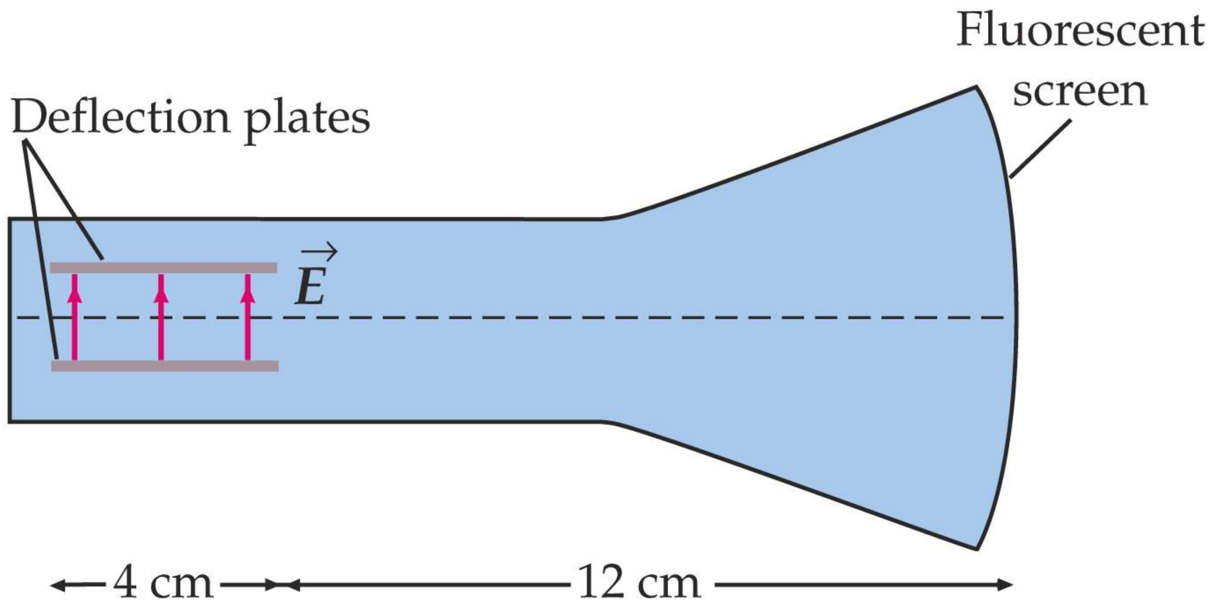
$$F_G = mg = 9.8\,m/s^2 \times \left(9.1\times10^{-31}kg\right) = 8.9\times10^{-30}N$$

$$F_G <<<< Fe$$

Movimiento de una carga en un campo eléctrico. Ejemplo 2

Cuál seria la trayectoria ? A que otra situación le recuerda?

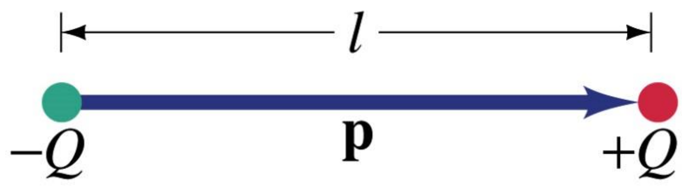




Dipolos eléctricos

Un dipolo eléctrico es una combinación de dos cargas iguales y de signo opuestos, +Q y –Q, separadas por una distancia l.

La cantidad ***Q.l*** es llamada **momento dipolar** eléctrico y es representado por el símbolo ***p***.

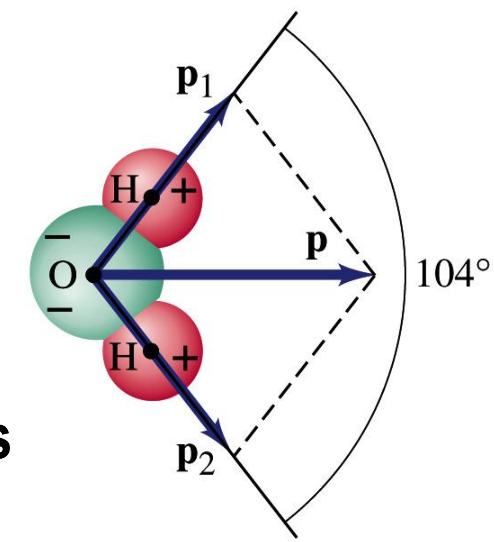


El momento dipolar es una cantidad vectorial

Unidades?

Su dirección de la carga negativa a la positiva.

Muchas moléculas diatómicas, como el CO, tienen un momento dipolar ➔ Conocidas como moléculas polares. Propiedad fundamental de las moléculas



H_2O
molécula bipolar

Las moléculas diatómicas simétricas, como el O_2, no presentan momento dipolar.

Dipolos en un campo externo

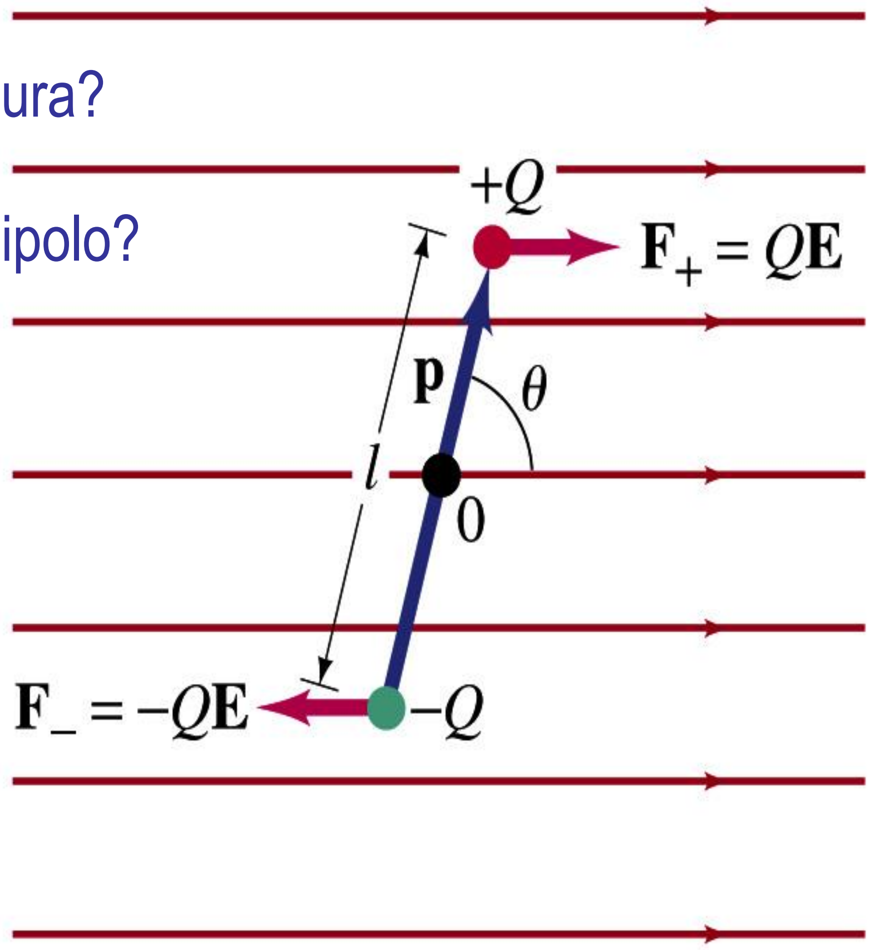
Consideremos un dipolo ubicado en un campo uniforme **E**.

Qué le ocurriré al dipolo de la figura?

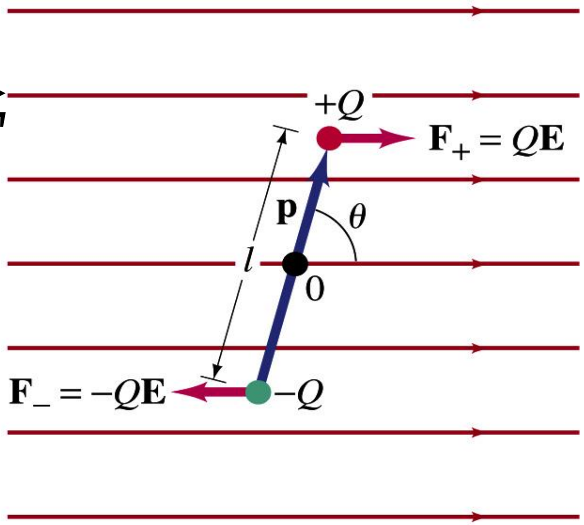
Cuál es la fuerza neta sobre el dipolo?

El dipolo se moverá?

Por qué?



Dipolos en un campo externo



Recordando la fórmula de Momento de torsión $\Rightarrow$ $\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F}$

Cuál es momento de torsión sobre el dipolo?

$$\left|\vec{\tau}\right| = \left|\vec{r} \times \vec{F}\right| = r\ F\ \mathrm{sen}\theta = \frac{\ell}{2} Q\ E\ \mathrm{sen}\theta$$

$$\left|\vec{\tau}_{TOTAL}\right| = \vec{\tau}_{Q+} + \vec{\tau}_{Q-} = \ell\ Q\ E\ \mathrm{sen}\theta = \boxed{p\ E\ \mathrm{sen}\theta}$$

$$\vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E}$$

Qué efecto produce el momento de torsión sobre el dipolo?

Energía potencial de un dipolo en un campo externo

Qué trabajo hace el campo eléctrico sobre un dipolo al cambiar su orientación desde θ_1 a θ_2?

Por qué negativo?

τ y θ tienen sentido opuestos

$$W = \int_{\theta_1}^{\theta_2} dW = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \vec{\tau} \cdot d\vec{\theta} = \int_{\theta_1}^{\theta_2} -\tau \, d\theta$$

El momento de torsión es $\tau = pE \sin\theta$

Así el trabajo hecho sobre el dipolo por el campo es

$$W = \int_{\theta_1}^{\theta_2} -p\,E\,\mathrm{sen}\,\theta\,d\theta = pE\left[\cos\theta\right]_{\theta_1}^{\theta_2} = pE\left(\cos\theta_2 - \cos\theta_1\right)$$

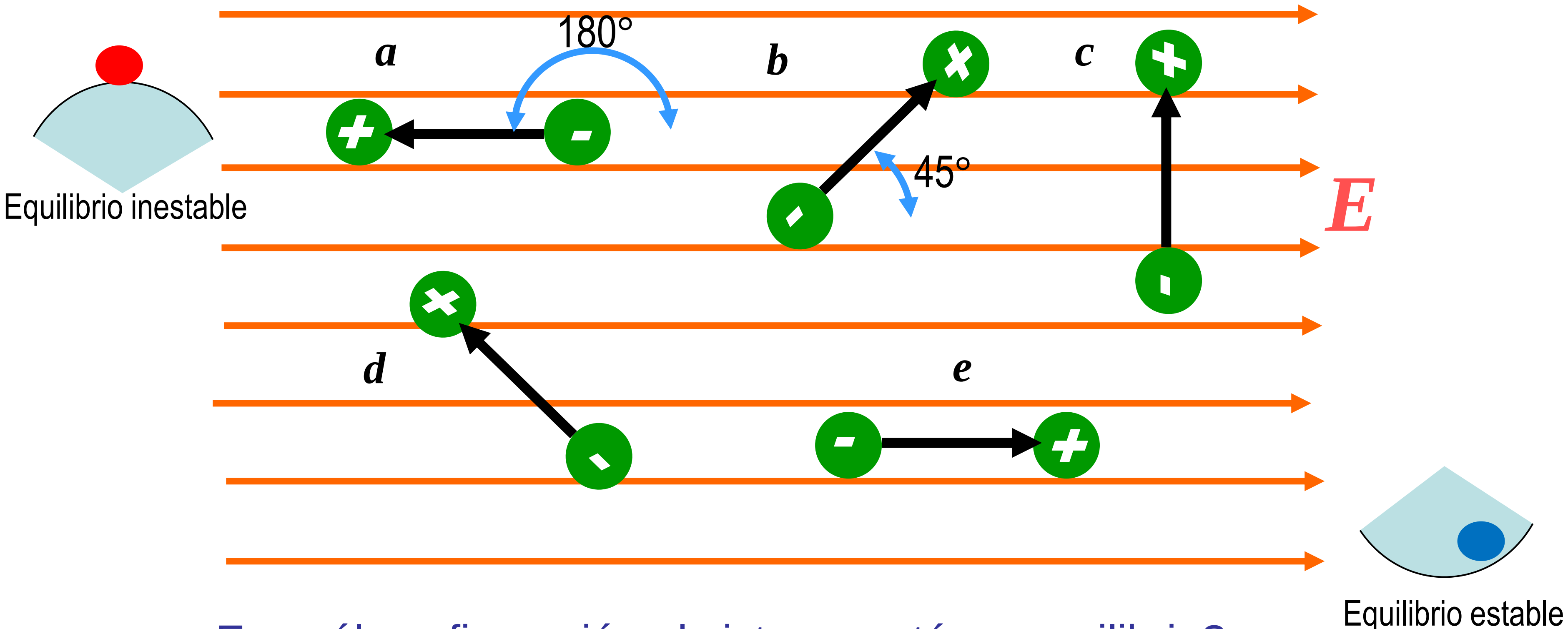
Qué ocurre con la energía potencial del dipolo, U, cuando el campo realiza un trabajo positivo sobre éste? Decrece

Si elegimos arbitrariamente que **U=0** cuando **θ_1=90º**, entonces la energía potencial Para **θ_2=θ** queda:

$$\boxed{U} = -W = -pE\cos\theta = \boxed{-\vec{p}\cdot\vec{E}}$$

Dipolo en un campo E uniforme

En cuál configuración, la energía potencial del dipolo es más grande?

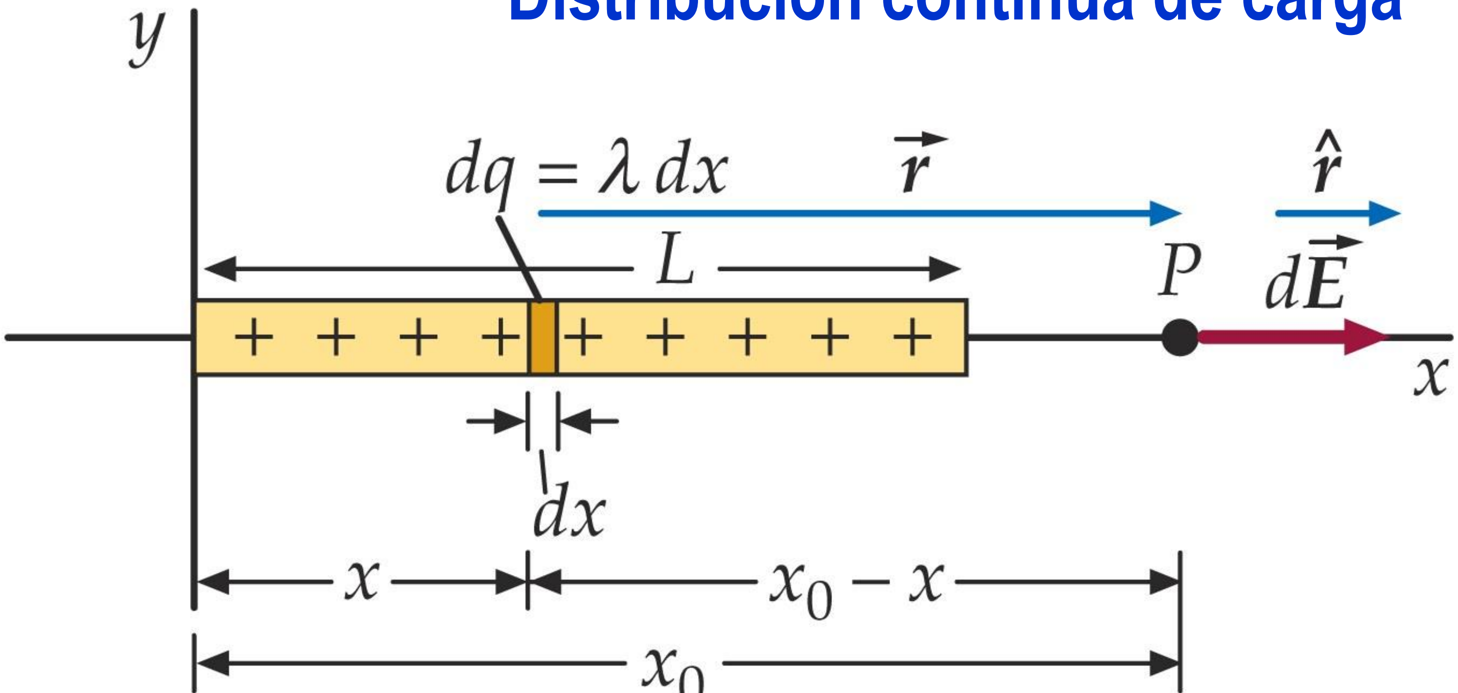


En cuál configuración el sistema está en equilibrio?

Qué tipo de equilibrio?

Campo Eléctrico

Distribución continua de carga



dE campo eléctrico generado por un diferencial de carga *dq* en el punto *P*

$$E = \int k\frac{dq}{r^2} = \int k\frac{\lambda\, dx}{r^2} = k\lambda \int_0^L \frac{dx}{(x_0 - x)^2} =$$