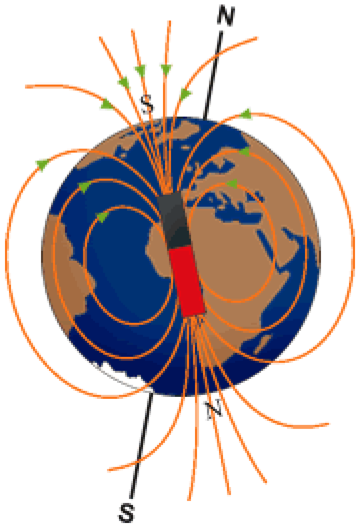
Magnetismo.

Campo Magnético



Magnetismo I: Introducción

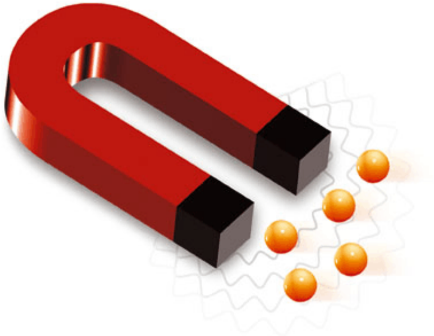
- El término magnetismo tiene su origen en el nombre que en Grecia clásica recibía una región del Asia Menor, entonces denominada Magnesia (abundaba una piedra negra o piedra imán capaz de atraer objetos de hierro y de comunicarles por contacto un poder similar).

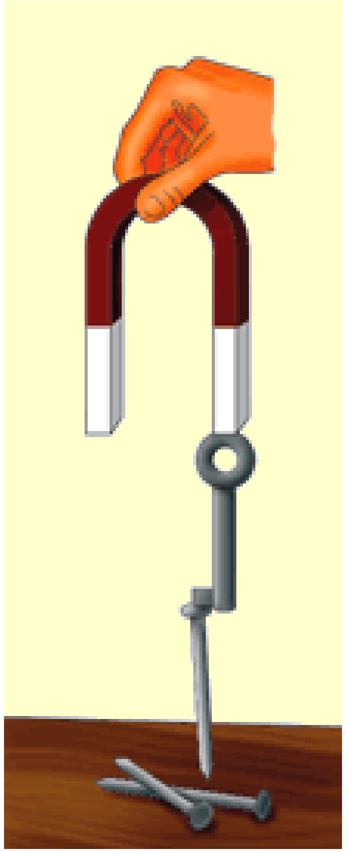
- A pesar de que ya en el siglo VI a. de C. se conocía un cierto número de fenómenos magnéticos, el magnetismo no se desarrolla hasta más de veinte siglos después (Gilbert (1544-1603), Ampére (1775-1836), Oersted (1777-1851), Faraday (1791-1867) y Maxwell (1831-1879))

- A partir del experimento de Oersted el Magnetismo y la electricidad (que hasta entonces habían permanecido como fenómenos independientes) quedan conectados para la física.

Magnetismo II: Imanes

→ Se denominan imanes los cuerpos que poseen propiedades magnéticas, es decir que tienen la propiedad de atraer piezas o limaduras de hierro y de atraerse (repelerse) entre sí, denominándose a esta propiedad magnetismo (más propiamente, ferromagnetismo).





Magnetismo II: Imanes

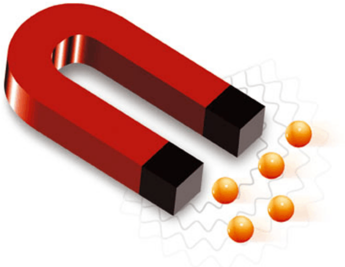
→ **Según su origen, los imanes se clasifican en naturales y artificiales. Tipos de imanes (según su origen):**

→**Los imanes naturales:** **son cuerpos que se encuentran en la naturaleza y que tienen propiedades magnéticas.**

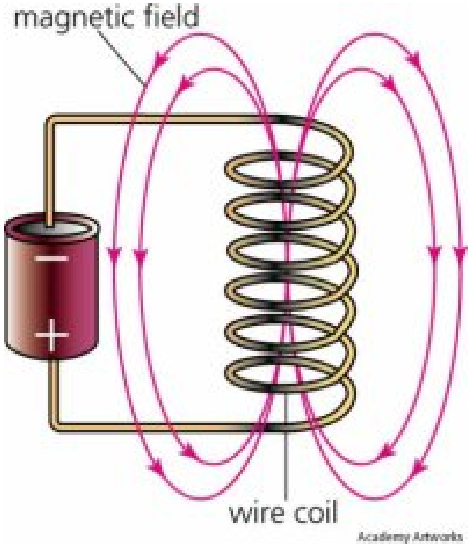
El mineral más común de los imanes naturales es la magnetita: óxido ferroso-diférrico (Fe_3O_4), mineral de color negro y brillo metálico.

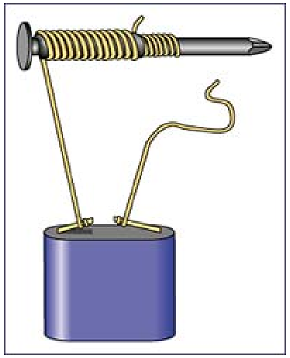
Magnetismo II: Imanes

→**Los imanes artificiales:** son los que se obtienen por imantación de ciertas sustancias metálicas. Es decir, un imán artificial es un cuerpo metálico al que se ha comunicado la propiedad del magnetismo, mediante frotamiento con un imán natural, o bien por la acción de corrientes eléctricas aplicadas en forma conveniente (electroimanación).



→**Electroimánes:** es una bobina (en el caso mínimo, una espira) por la cual circula corriente eléctrica, la cual lleva por tanto asociado un campo magnético.

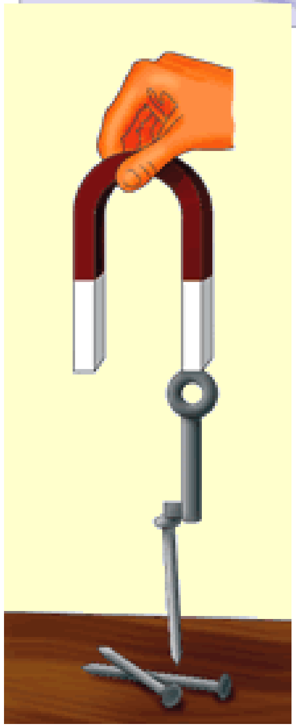




Magnetismo III: Imanes

→ **Según su comportamiento los imanes se clasifican en temporales y permanentes:**

→**Los imanes temporales pierden sus propiedades magnéticas cuando deja de actuar sobre ellos la causa que produce la imantación. Los imanes construidos con hierro dulce son de este tipo. Estos imanes se utilizan para fabricar electroimanes para timbres eléctricos, telégrafos, teléfonos etc.**



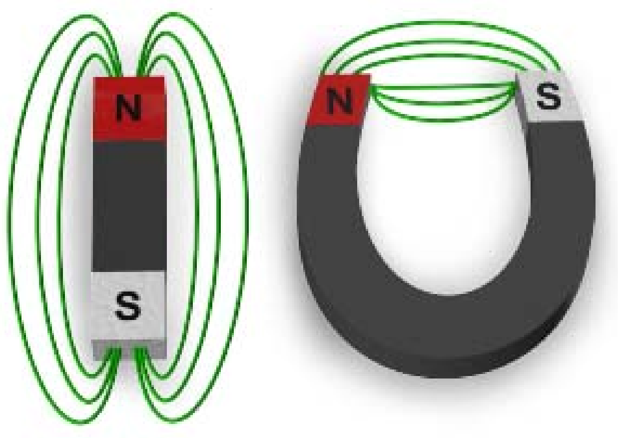
→ **Los imanes permanentes mantienen sus propiedades aunque deje de actuar la causa que produce la imantación. Los imanes construidos con acero son de este tipo. Estos imanes se utilizan en la construcción de diversos aparatos eléctricos, como dinamos, amperímetros, voltímetros, motores, etc.**

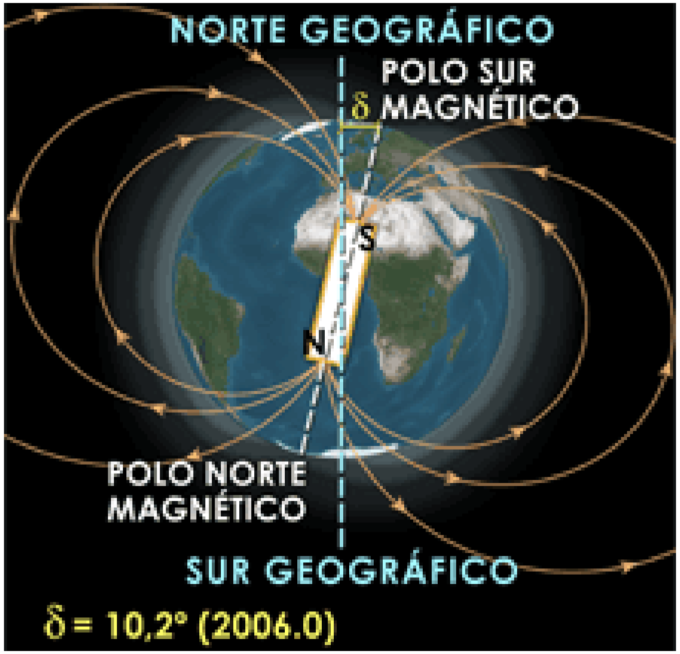
Magnetismo IV: Imanes

Características de los imanes (polos de un imán):

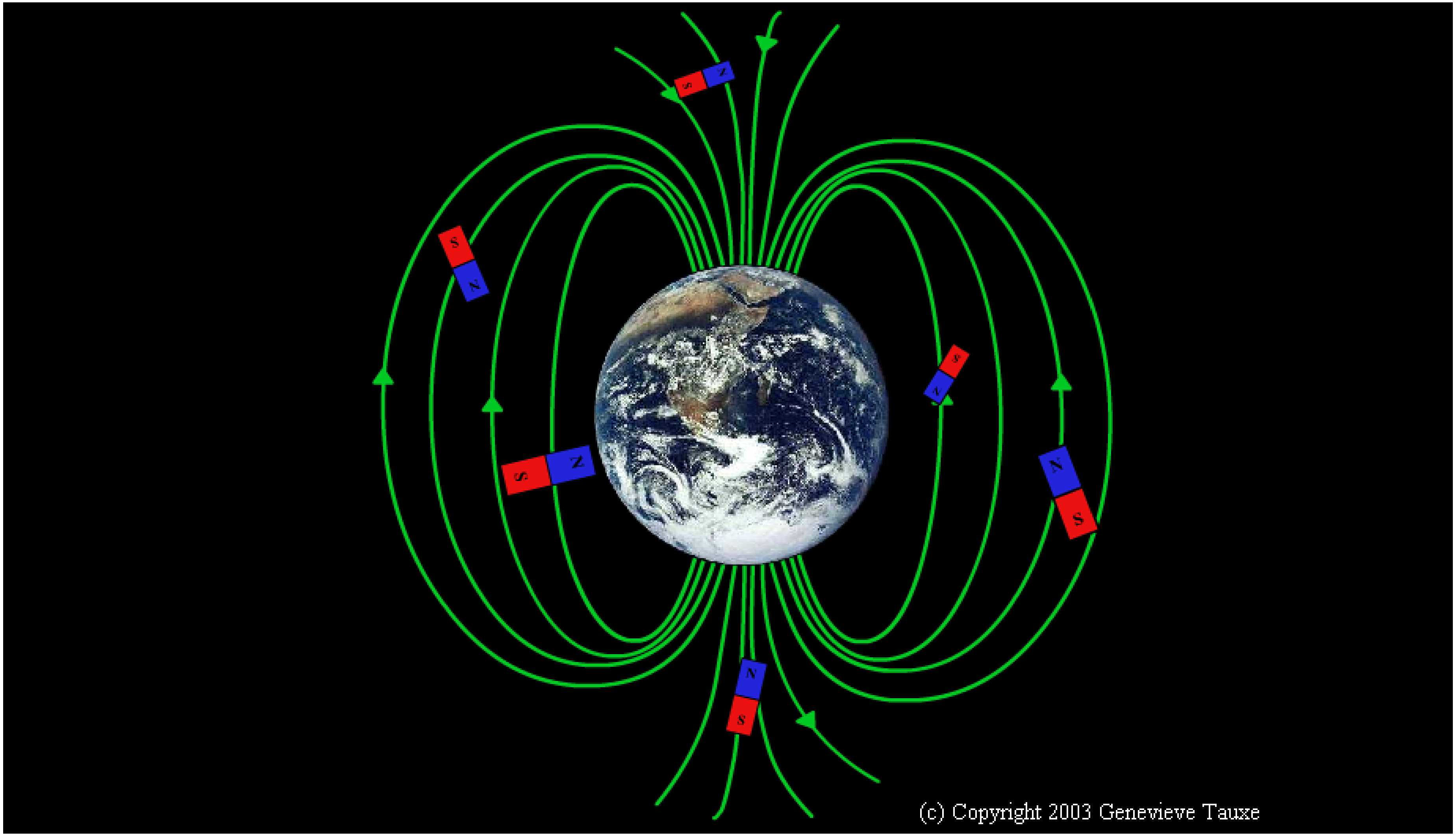
→ **Polos:**

- **Son los extremos de un imán**
- **en ellos el poder de atracción es máximo.**
- **la capacidad de atracción del imán es prácticamente nula en su parte central.**
- **Se les denomina polo norte y polo sur . El polo que señala hacia el Norte geográfico se denomina polo norte del imán (N) y el que se orienta hacia el Sur de la Tierra recibe el nombre de polo sur del imán (S).**





Magnetismo IV: Imanes



Magnetismo IV: Imanes

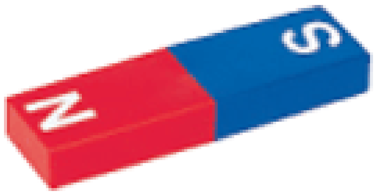
Características de los imanes (polos de un imán):

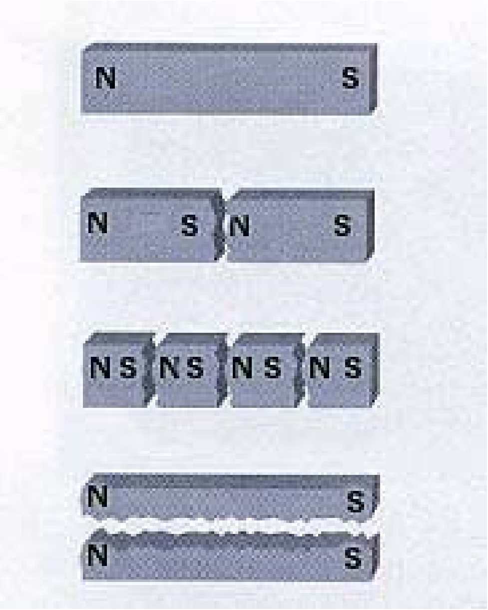
→ Los polos opuestos se atraen y los polos iguales se repelen

→ Es imposible aislar los polos magnéticos de un imán.

No es posible, obtener un imán con un solo polo magnético (semejante a un cuerpo cargado con electricidad de un solo signo).

-> Un imán es un dipolo magnético.

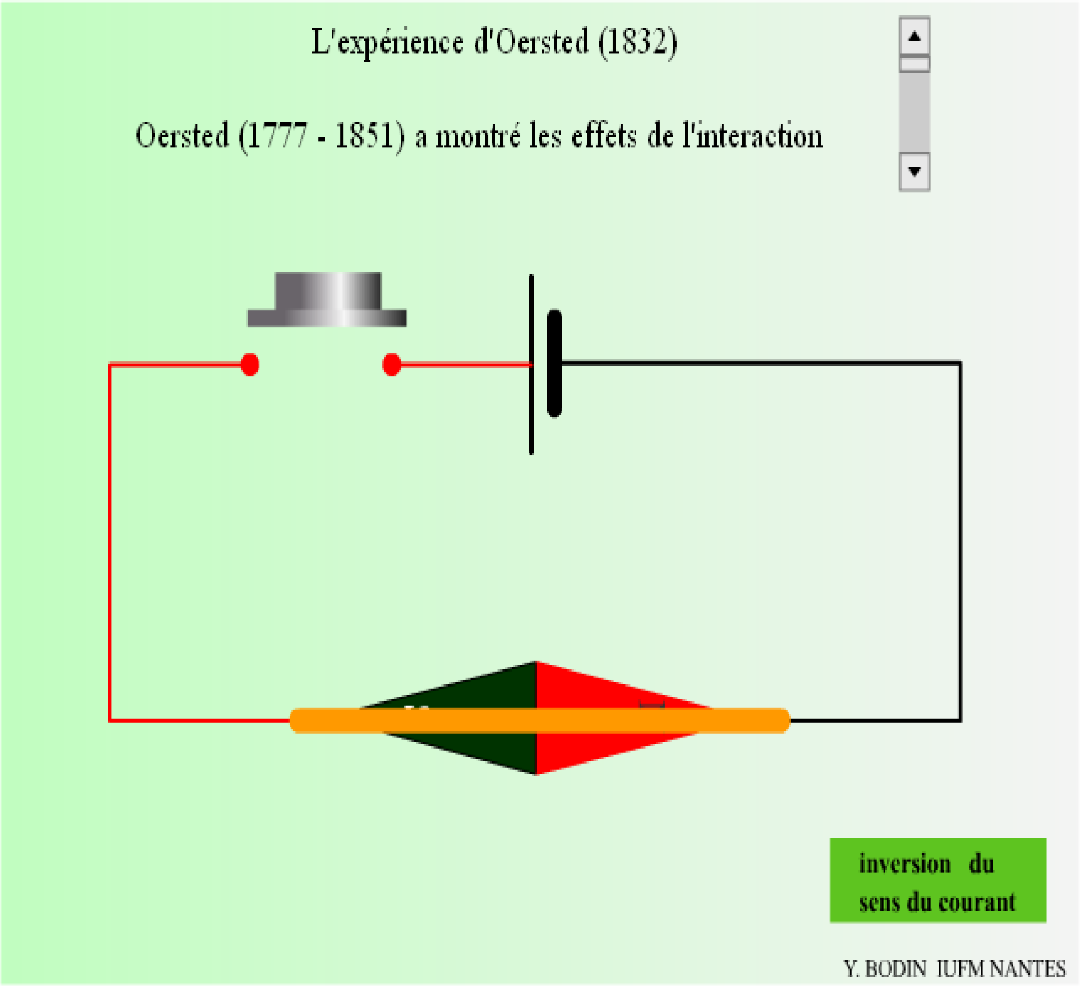




Experimento de Oersted

Hans Christian Oersted, 1820, descubre que las corrientes eléctricas producen campos magnéticos

Norte Terrestre



Sur Terrestre

Conclusión:

“*La corriente que circula por un conductor produce un campo magnético que actúa sobre la aguja imantada desviándola*”

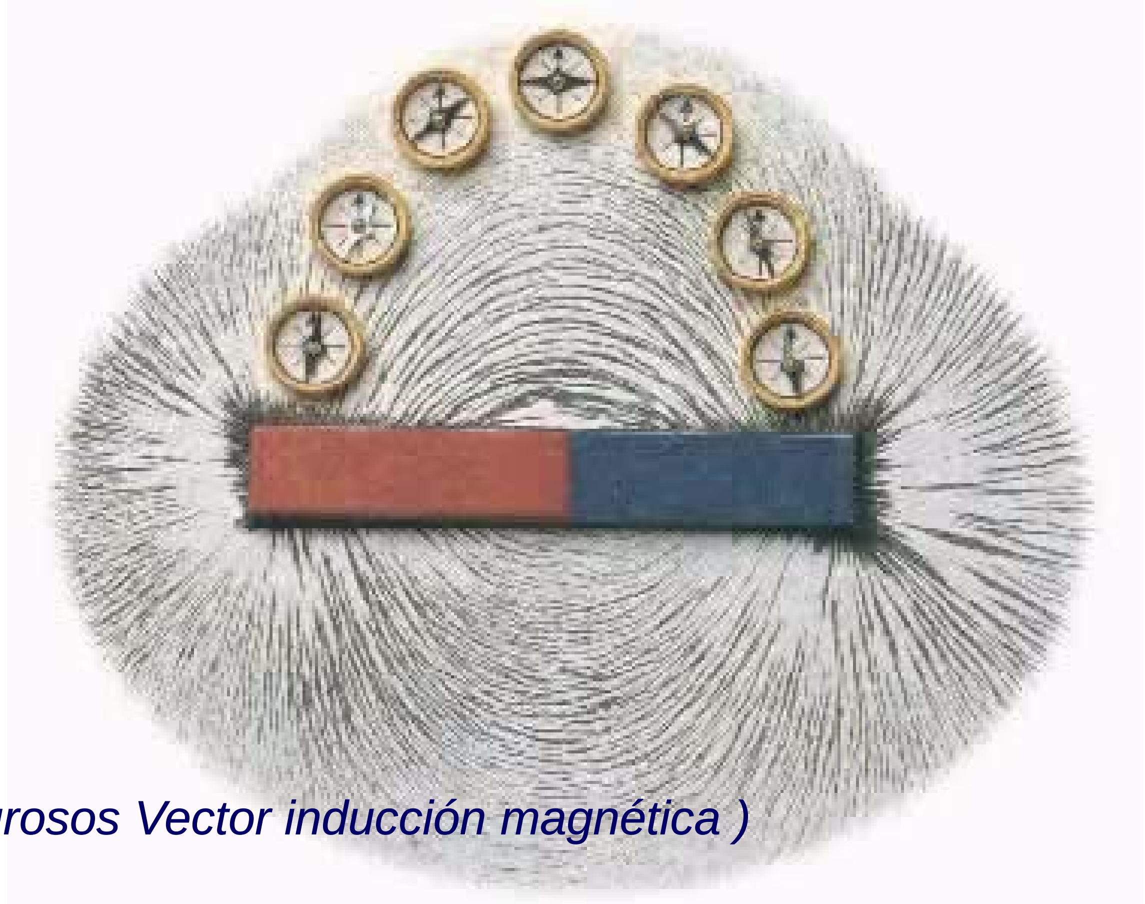
Una carga eléctrica en reposo produce fenómenos electrostáticos, pero si está en movimiento origina también, en el espacio que la rodea, un campo magnético.

Campo magnético

Campo magnético B:

“Se define campo magnético[1] como la perturbación que un imán (o una corriente eléctrica) produce en el espacio que lo rodea”.

La unidad del campo magnético (inducción magnética) en el SI es el Tesla (T)



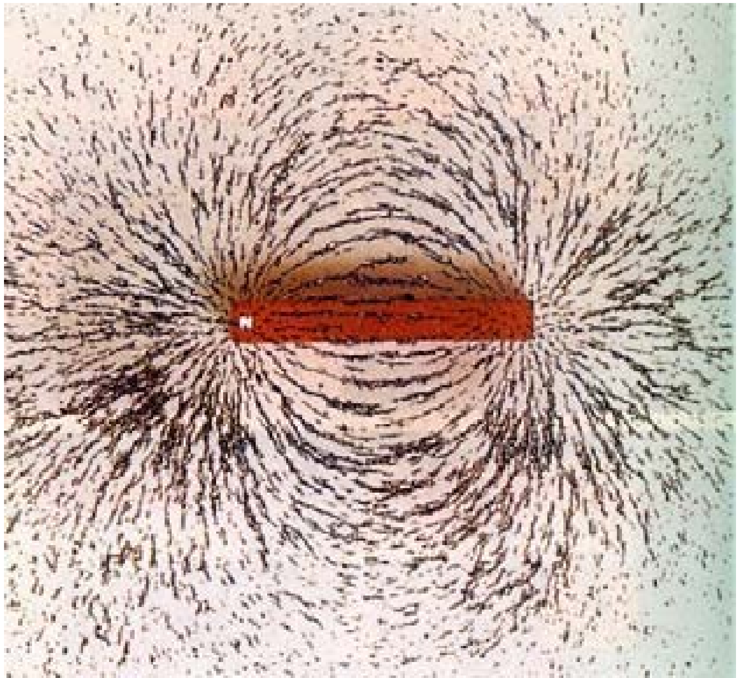
Animacion1

[1] *siendo rigurosos Vector inducción magnética)*

Campo magnético

Características (generales) de las lineas de campo (de cualquier campo vectorial):

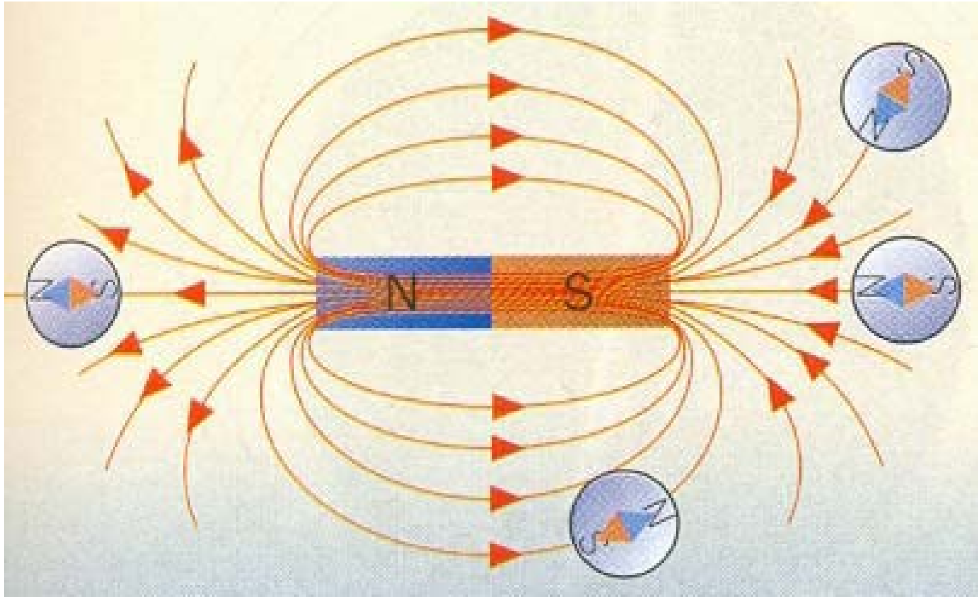
- →Son paralelas a en cada punto (nos indican la dirección y sentido de   en cada punto).
- →Una mayor densidad de lineas (líneas más juntas) representa un campo más intenso (modulo, mayor).
- → Menor densidad de lineas (líneas más separadas) representa un campo menos intenso (modulo, menor).

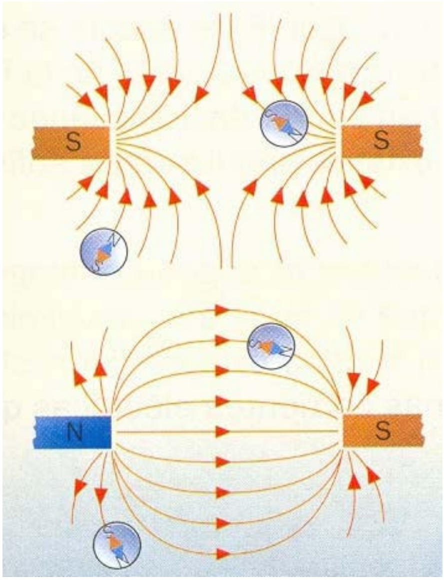


Campo magnético

Características especificas de las lineas del campo magnético:

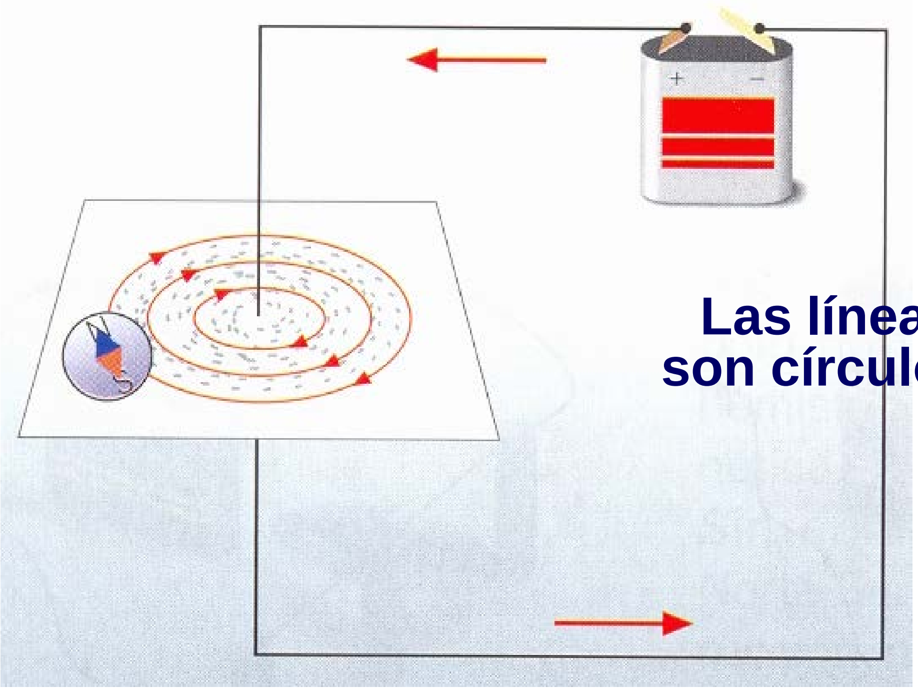
- →**Más juntas en los polos (el campo es más intenso en los polos)**
- →**Son siempre líneas cerradas. Nunca pueden terminar en el infinito, siempre hacen bucles o empiezan en un polo y terminan en otro.**
- →**Se les atribuye, por convenio, un sentido. Salen siempre de un polo N y terminan en un polo S. Las líneas de campo salen del polo norte del imán, recorren el espacio exterior, regresan al imán por el polo sur y continúan por su interior hasta el polo norte**





Campo magnético creado por corrientes eléctricas I

Caso 1: Campo magnético creado por un conductor rectilíneo e indefinido por el que circula una corriente eléctrica I.



Las líneas de campo son círculos concéntricos

→**Módulo:** $$B = \frac{2K_m I}{d} = \frac{\mu_0 I}{2\pi d}$$

→ **Dirección: Recta tangente a las líneas de campo.**

→**Sentido: Regla de la mano derecha**

Campo magnético creado por corrientes eléctricas I

K: constante magnética, K=10^{-7}Tm/A.

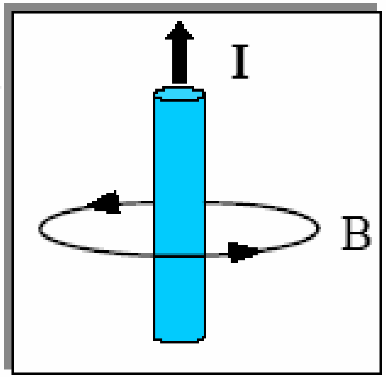
μ_0: permeabilidad magnética del vacío, $\mu_0=4\pi\cdot10^{-7}$Tm/A

(caracteriza el comportamiento del medio frente al campo magnético)

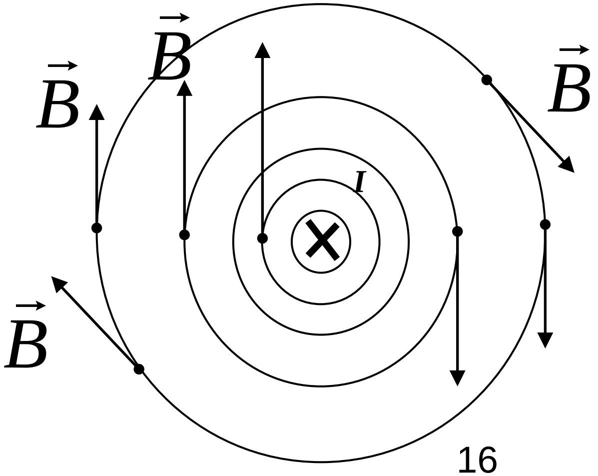
Ejemplo 1: Determinar la inducción magnética en el aire (μ_0), en un punto a 6 cm de un conductor rectilíneo por el que circula una intensidad de corriente de 2 A.

(hay que calcular el modulo, la dirección y el sentido los puedes expresar con palabras o mediante un dibujo)

Solución:



$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi d} = 0{,}66\cdot10^{-5}T$$



Campo magnético creado por corrientes eléctricas I

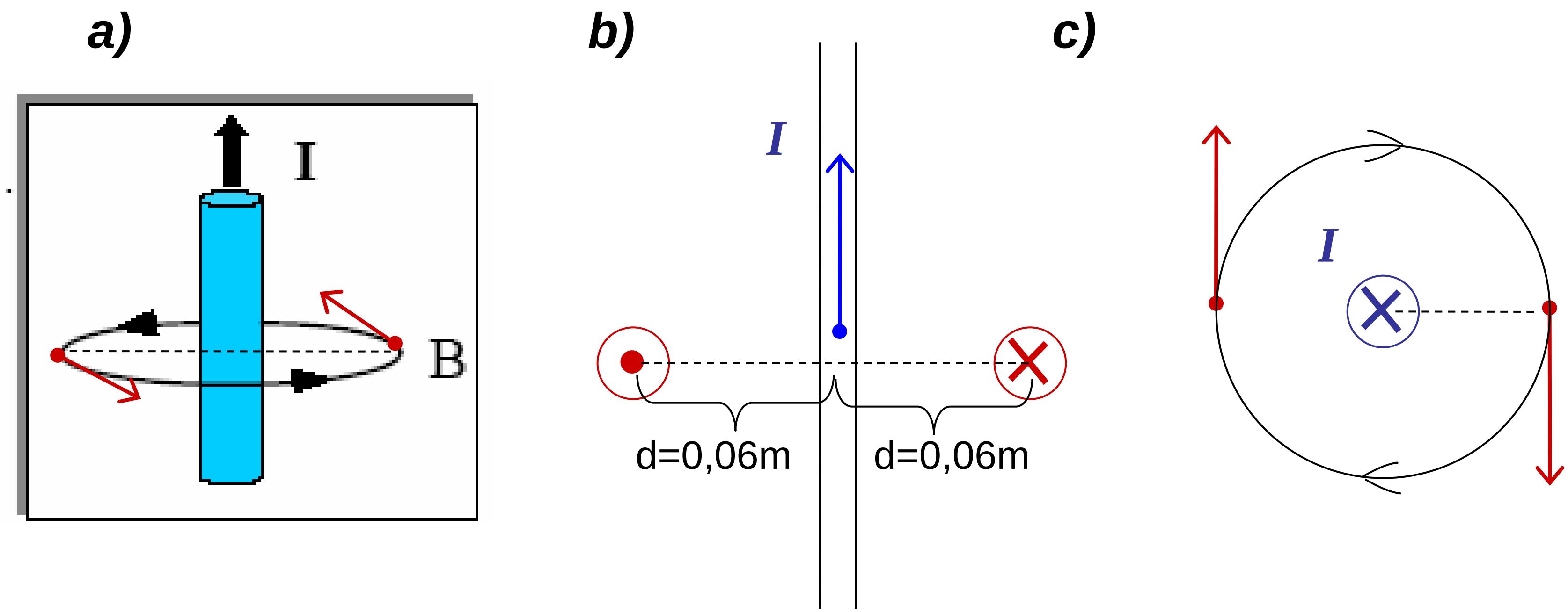


Figura 1: Distintos puntos de vista de un conductor rectilíneo del problema 1. a) 3D b) Vista lateral c) Vista "vertical" (**desde abajo**).

Campo magnético creado por corrientes eléctricas I

Ejemplo 2: Dos largos conductores paralelos están separados 10 cm. Por uno (A) pasa una corriente de 30 A y por el otro, B, pasa una corriente de 40 A ambas con sentidos opuestos. Calcula el campo resultante en un punto del plano de los dos conductores situado en:

a) Un punto medio entre los dos conductores (punto A en figura).

b) A 10cm a la izquierda del conductor situado a la izq. (punto B en figura).

c) A 10cm a la derecha del conductor situado a la der. (punto C en figura).

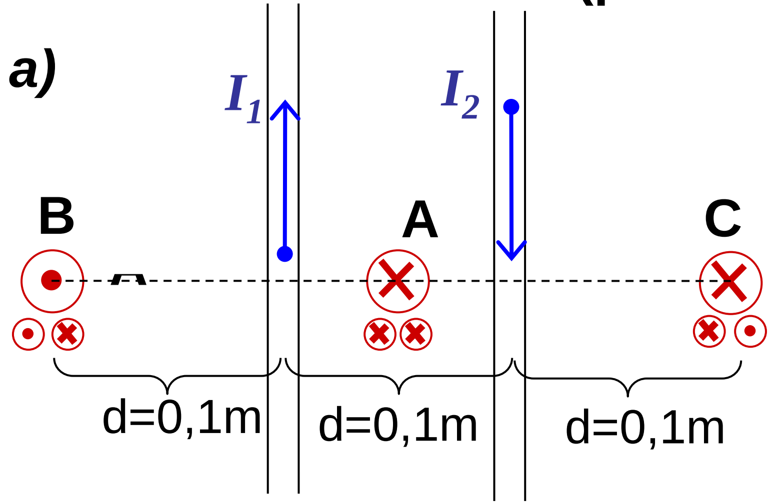
(el modulo, la dirección y el sentido los puedes expresar con palabras o mediante un dibujo)

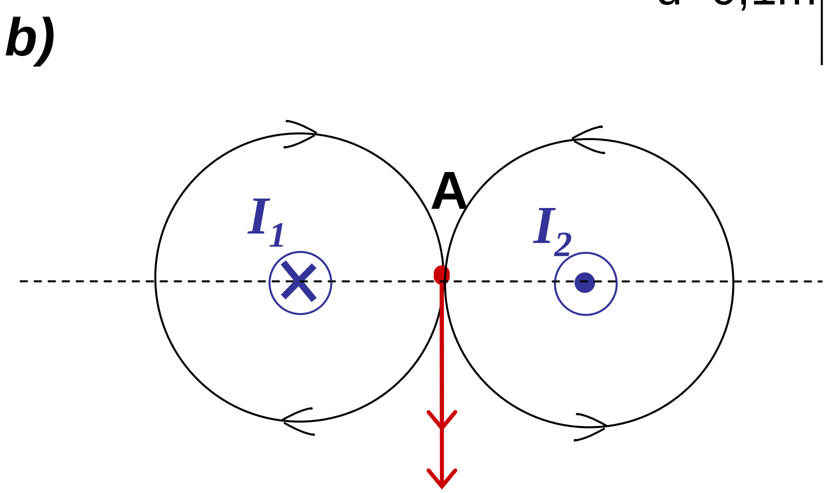
Campo magnético creado por corrientes eléctricas I

a) Un punto medio entre los dos conductores (punto A en figura).

$$B_1 = \frac{2K_m I_1}{d} = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 30}{2\pi \cdot 0{,}05}$$

$$= \frac{6}{5} \cdot 10^{-4} T = 1{,}2 \cdot 10^{-4} T$$





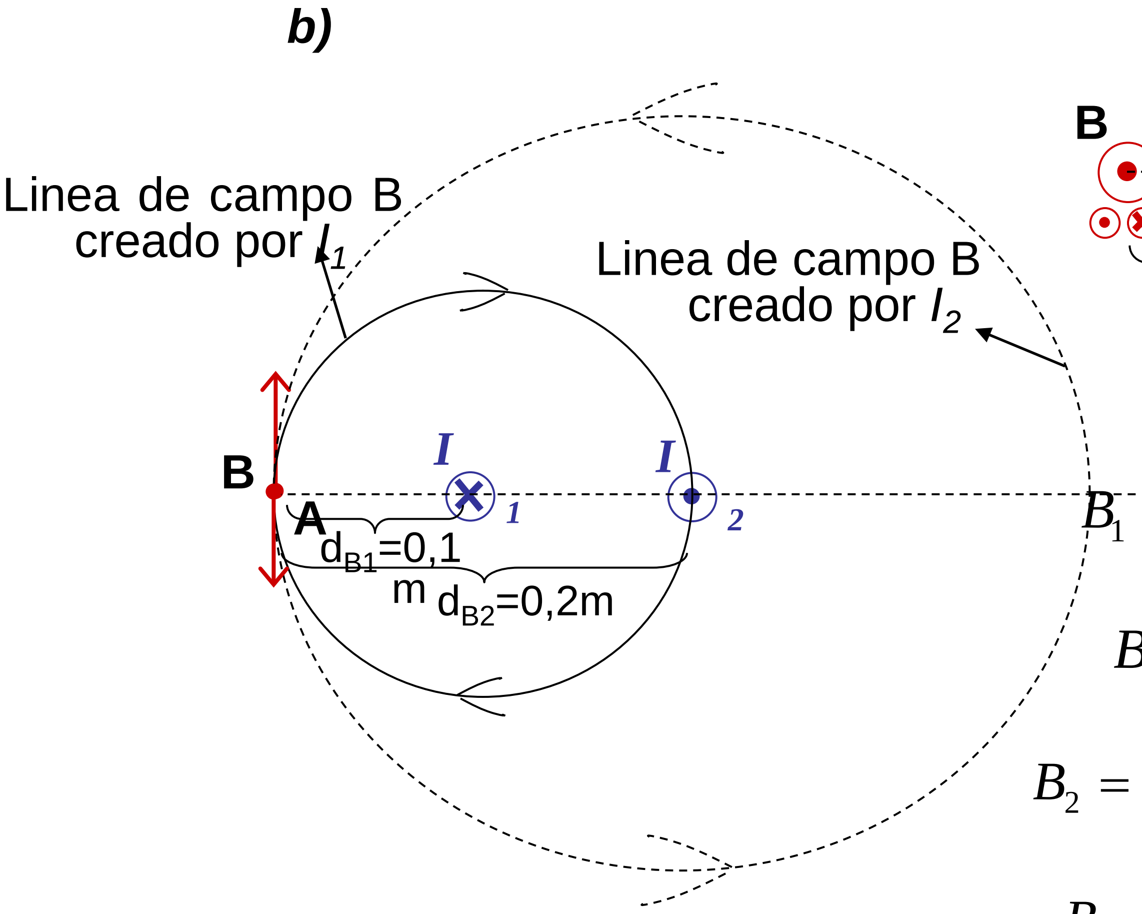
$$B_2 = \frac{2K_m I_2}{d} = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi d} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 40}{2\pi \cdot 0{,}05}$$

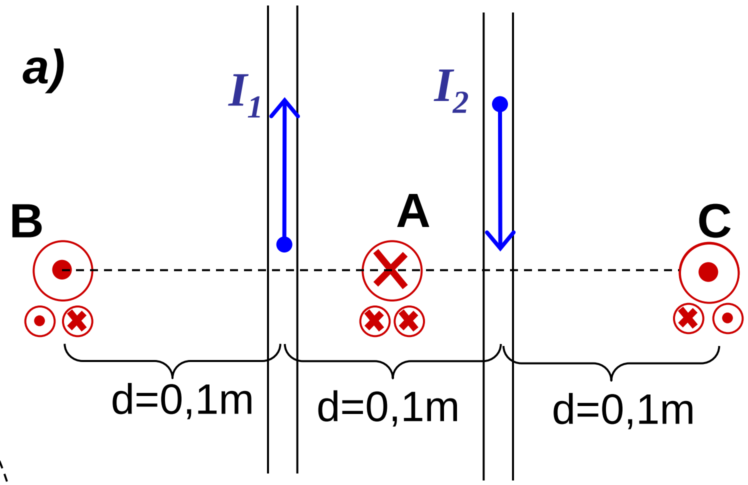
$$= \frac{8}{5} \cdot 10^{-4} T = 1{,}6 \cdot 10^{-4} T$$

Figura 2: Distintos puntos de vista de los dos conductores rectilíneos del problema 3, para el calcular B en el pto. A. a) Vista lateral b)Vista “vertical” **(desde abajo)**.

Campo magnético creado por corrientes eléctricas I

b) A 10cm a la izquierda del conductor situado a la izq. (punto B en figura).





$$B_1 = \frac{2K_m I_1}{d} = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 30}{2\pi \cdot 0{,}1} =$$

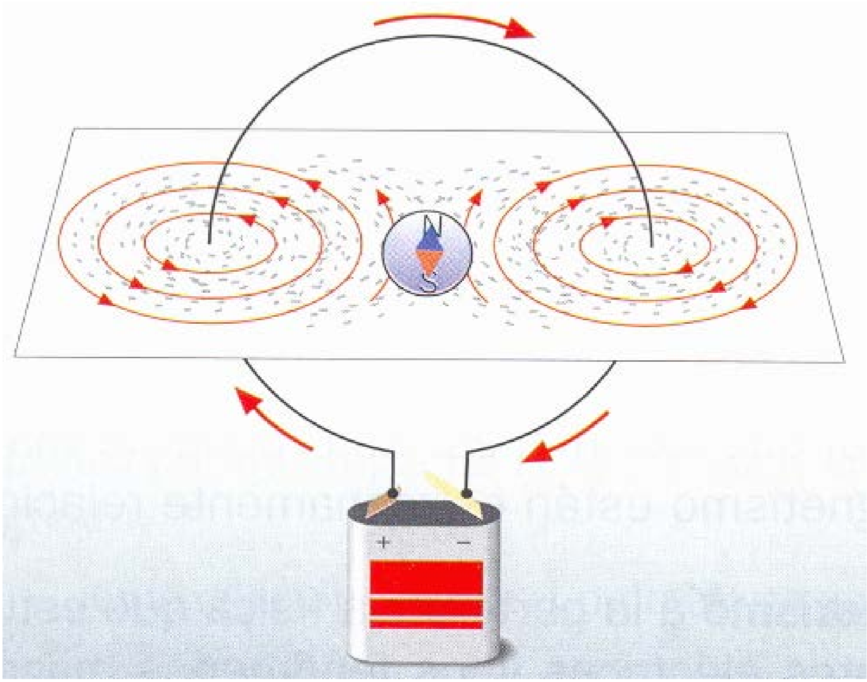
$$B_1 = 6 \cdot 10^{-5} T$$

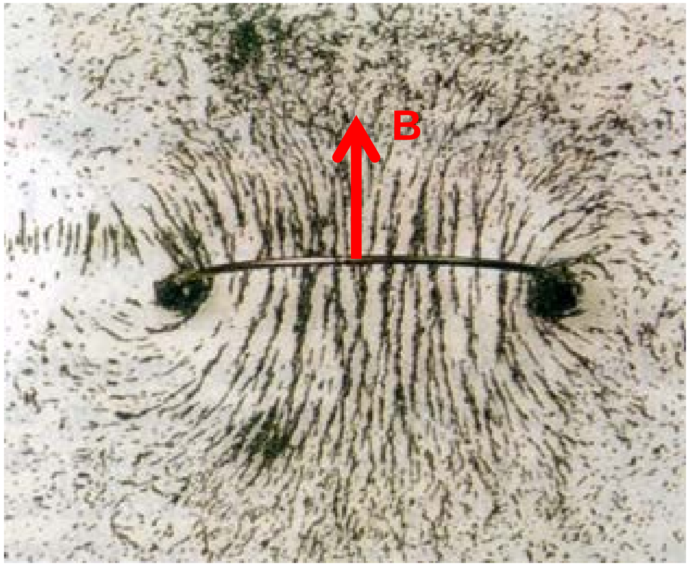
$$B_2 = \frac{2K_m I_2}{d} = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi d} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 40}{2\pi \cdot 0{,}2} =$$

$$B_2 = 4 \cdot 10^{-5} T$$

Campo magnético creado por corrientes eléctricas II

Caso 2: Campo magnético creado por un conductor circular por el que circula una corriente eléctrica I (espira de corriente)..





→**Módulo en el centro de la espira:** $$B = \frac{2\pi K_m I}{r} = \frac{\mu_0 I}{2r}$$

→ **Dirección: perpendicular al plano de la espira .**

→**Sentido: Regla de la mano derecha**

Campo magnético creado por corrientes eléctricas I

Ejemplo 3: ¿Cuál es el valor de la inducción magnética en el centro de una espira por la cuál circula una corriente de 1 A, si está en el aire y su radio es de 11 cm?

(hay que calcular el modulo, la dirección y el sentido los puedes expresar con palabras o mediante un dibujo)

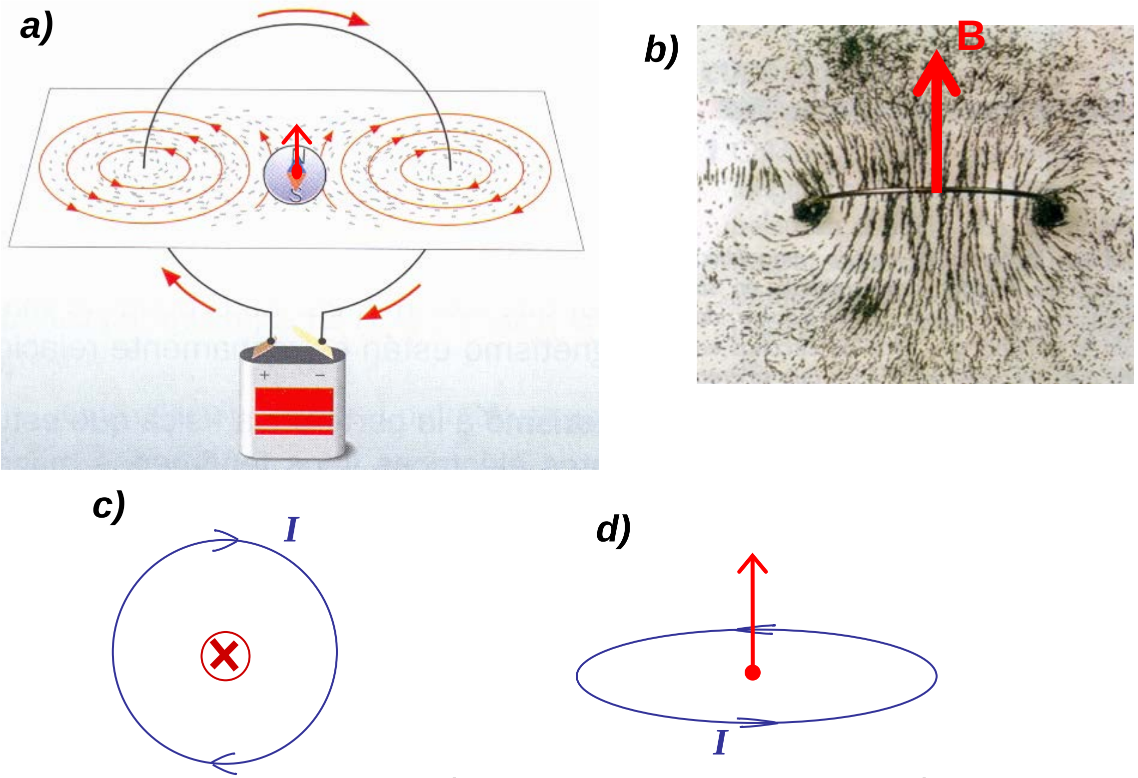


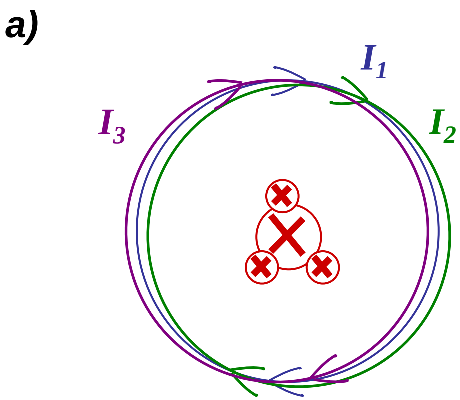
Figura 5. Campo magnético creadas por una corriente eléctrica circular (espira) en su centro. Distintos puntos de vista: a) circuito y lineas de campo visto por abajo b) vista lateral c) esquema "vista desde abajo" d)esquema "vista en perspectiva 3D".

Campo magnético creado por corrientes eléctricas I

Ejemplo 4: Se situan 3 espiras como las del ejercicio anterior muy pegadas una sobre otra. Calcula el valor de la inducción magnética en el centro de las espiras en los siguientes casos:

- La corriente en las tres espiras tiene el mismo sentido
- En una de las espiras la corriente va en sentido contrario.

(hay que calcular el modulo, la dirección y el sentido los puedes expresar con palabras o mediante un dibujo)



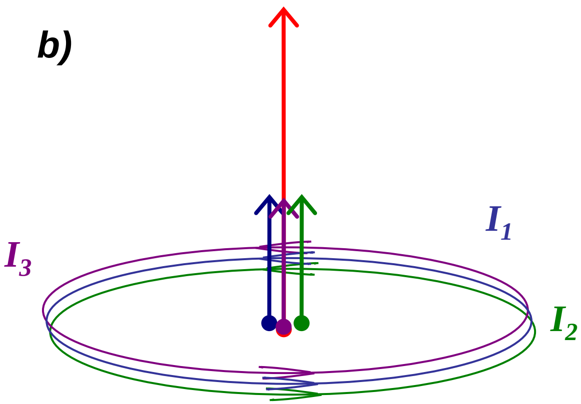
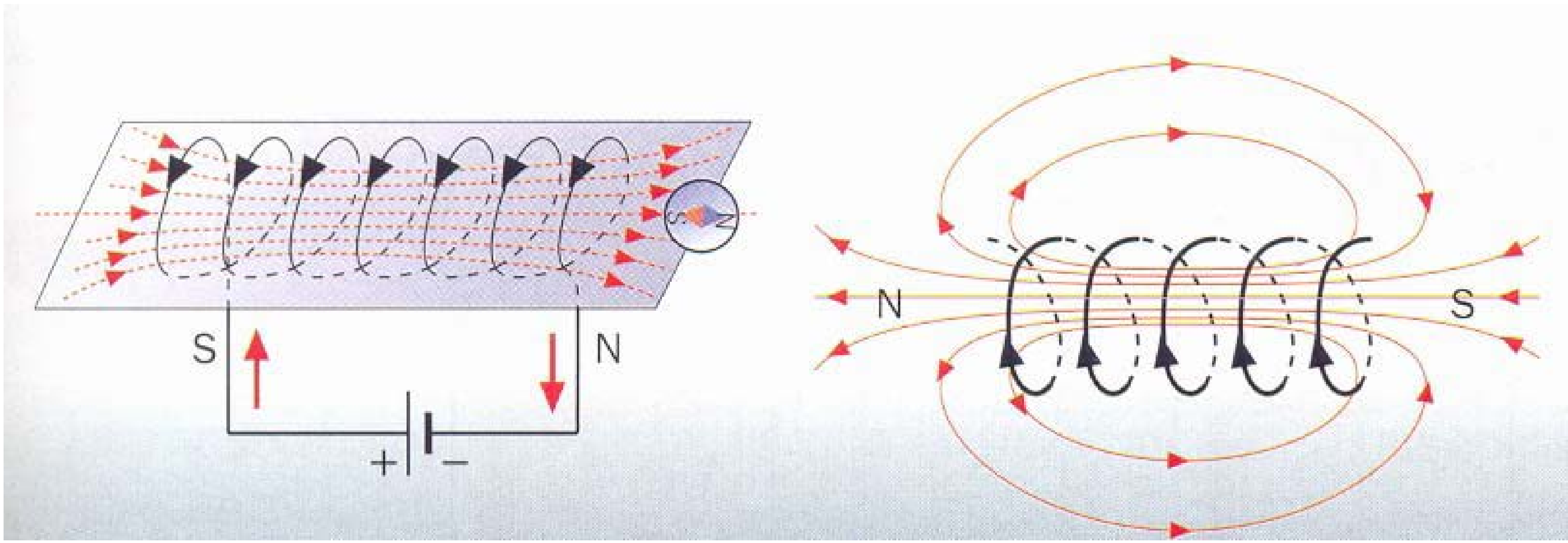


Figura 6. Campo magnético creadas por 3 corrientes eléctricas circulares (espiras) -con el mismo sentido- en su centro. Distintos puntos de vista: a) esquema “vista desde abajo” b)esquema “vista en perspectiva 3D”.

Campo magnético creado por corrientes eléctricas I

Caso3: *Campo magnético creado por un SOLENOIDE*



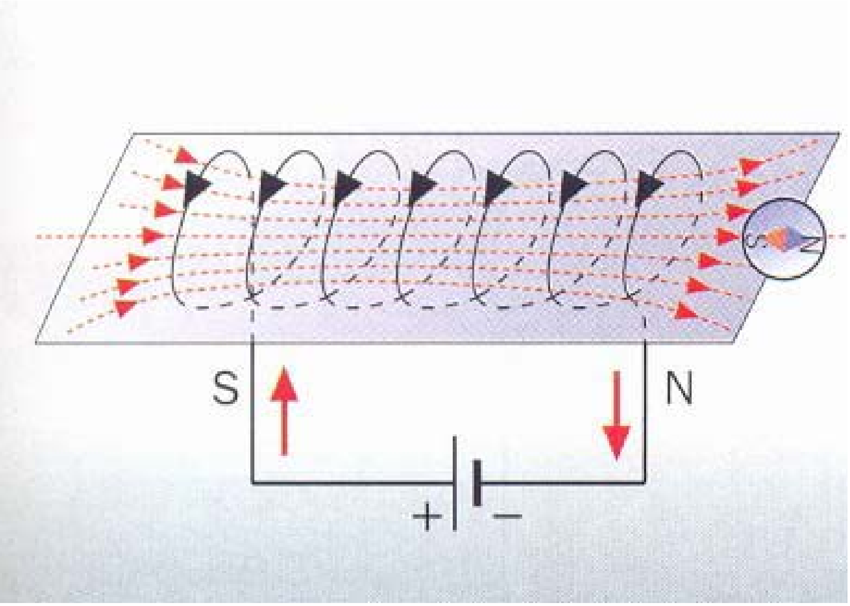
→ **Módulo:** $B = \frac{\mu_0 NI}{l}$ **(En el interior de la bobina el campo es aproximadamente uniforme).**

→ **Dirección: Recta tangente a las líneas de campo.**

→ **Sentido: Regla de la mano derecha**

Campo magnético creado por corrientes eléctricas I

Ejemplo 5: ¿Cuál es el valor de la inducción magnética en el interior de una bobina de 10cm de longitud y 500 espiras (vueltas) por la cuál circula una corriente de 1A?



$$B_0 = \frac{\mu_0 NI}{l} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 500 \cdot 1}{10^{-1}} =$$

$$B_0 = 2\pi \cdot 10^{-3} = 6{,}28 \cdot 10^{-3} T$$

Calcula el campo en el interior del solenoide si se introduce un cilindro de hierro (μr=350) dulce en él.

$$B = \frac{\mu NI}{l} = \frac{\mu_r \cdot \mu_0 NI}{l} = \mu_r B_0 = 350 \cdot B_0 = 2{,}20 T$$

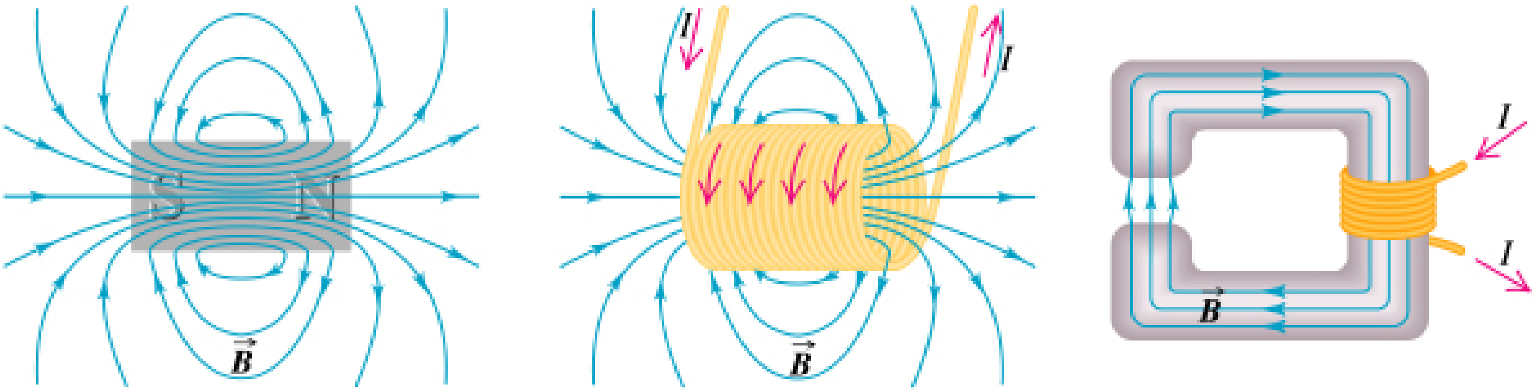
Por este motivo los electroimanes se fabrican introduciendo un pieza de hierro o acero, denominada núcleo, en el interior de la bobina

Magentismo IV: Campo magnético, líneas de campo

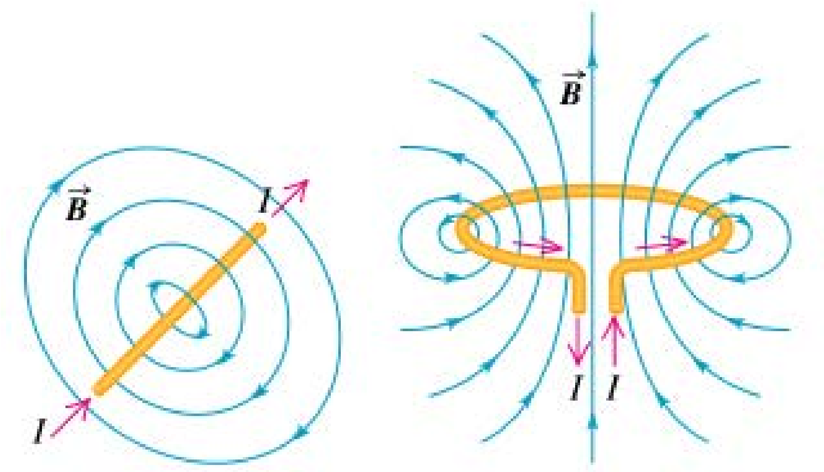
→ **Ejemplos de lineas de campo magnético en distintos sitemas:**

a) Imán   b) solenoide (bobina)   c) Electroimán (bobina con núcleo de hierro)

d) Hilo conductor (rectilíneo)   e) espira

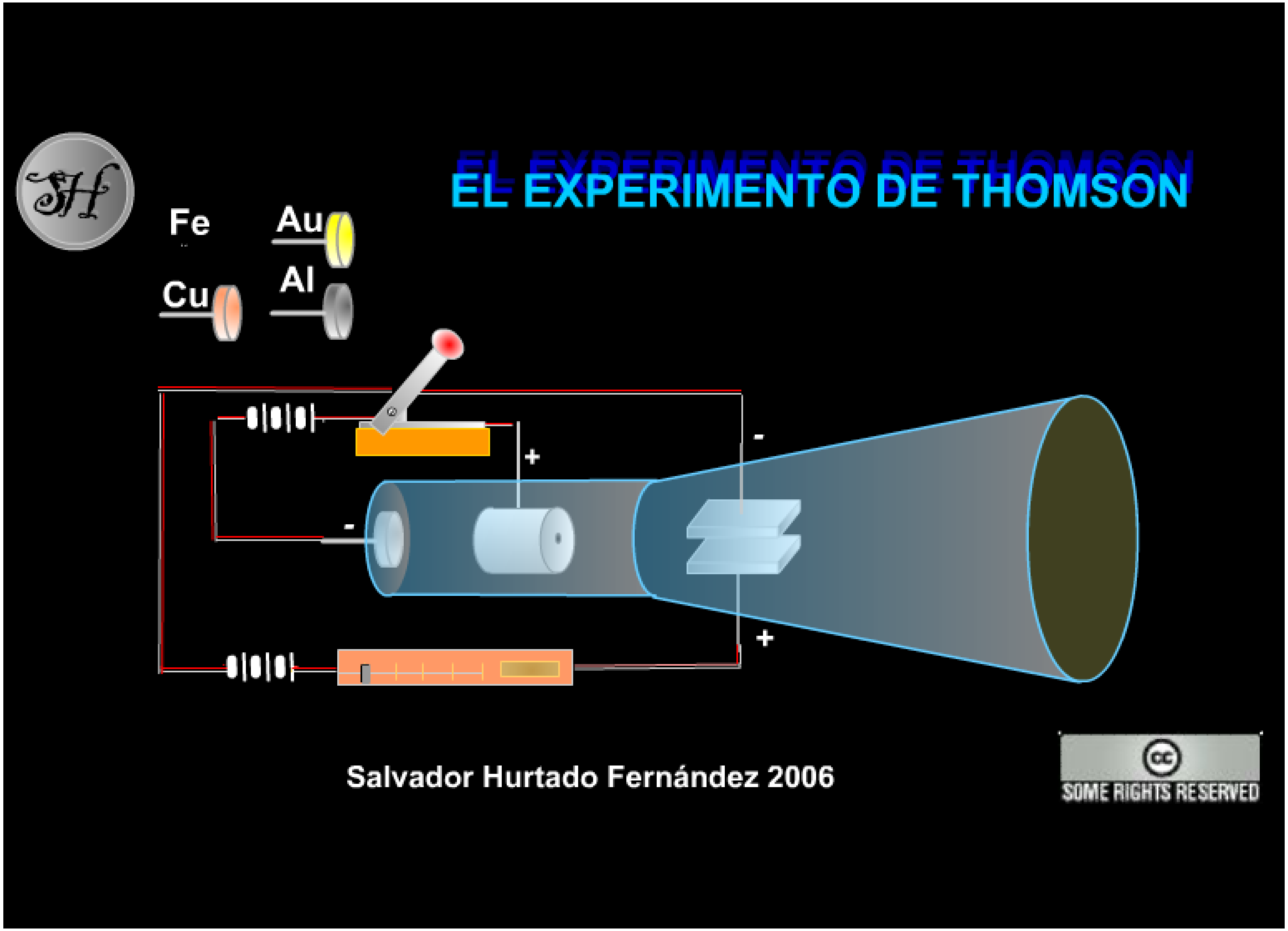


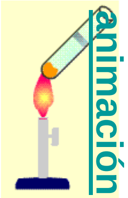
(a)   (b)   (c)

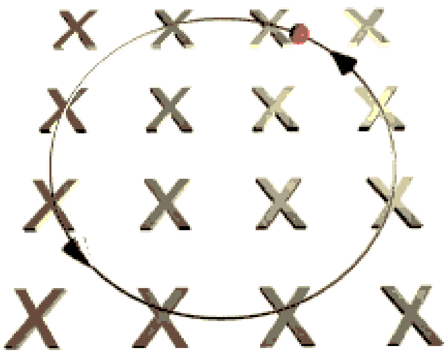


(d)   (e)

Magnetismo: Fuerzas sobre cargas en movimiento





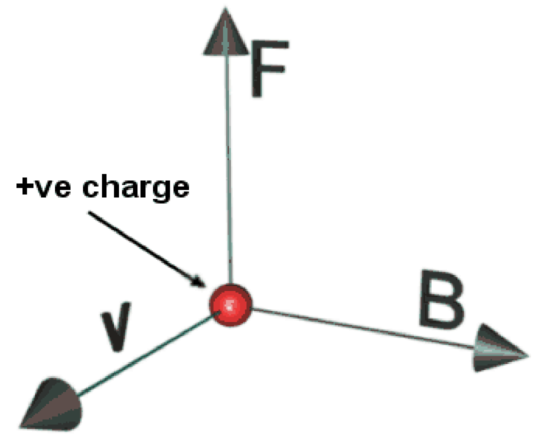


→ **Observaciones experimentales:**

- $\left|\vec{F}\right| \propto q\,,\left|\vec{v}\right|\,,\left|\vec{B}\right|$
- $\vec{F}$ depende de la dirección de **v** y de **B**
- Cuando una partícula se mueve en dirección paralela al vector campo magnético → F=0.
- **F** es perpendicular al plano formado por **v** y de **B**
- La fuerza magnética sobre una carga positiva tiene sentido opuesto a la fuerza que actúa sobre una carga negativa que se mueva en la misma dirección.
- Si el vector velocidad hace un ángulo θ con el campo magnético: $\left|\vec{F}\right| \propto \operatorname{sen}\theta$

Magnetismo: Fuerzas sobre cargas en movimiento

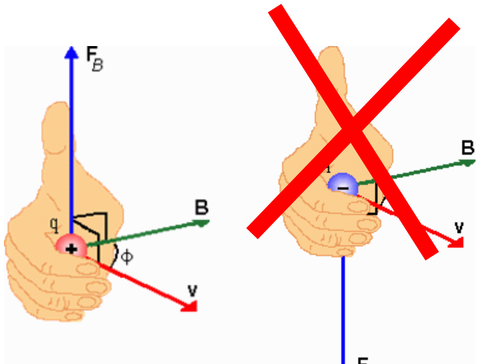
→ **Fuerza de Lorentz:** $$\boxed{\vec{F} = q\left(\vec{v} \times \vec{B}\right)}$$



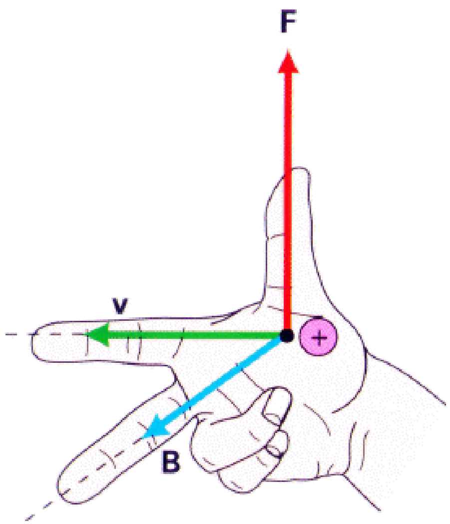
- **Módulo:** $\boxed{F = q \cdot v \cdot B \cdot \mathrm{sen}\,\theta}$

  (θ es el ángulo formado por v y B)
- **Dirección:** perpendicular al plano de **v** y **B**
- **Sentido:** regla de la mano derecha

→ Regla de la mano derecha:



Fuerza magnética y regla de la mano derecha.



Nota importante: $\vec{F} \perp \vec{v}$ La fuerza de Lorentz no realiza trabajo y por tanto no cambia la celeridad

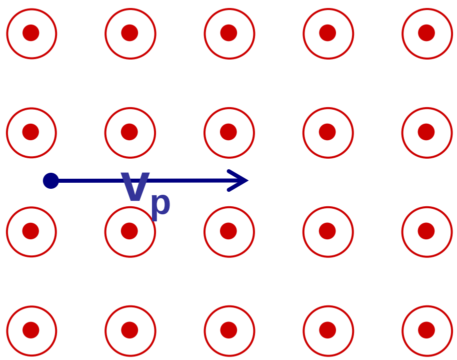
Magnetismo: Fuerzas sobre cargas en movimiento

→ Fuerza de Lorentz: Ejemplos:

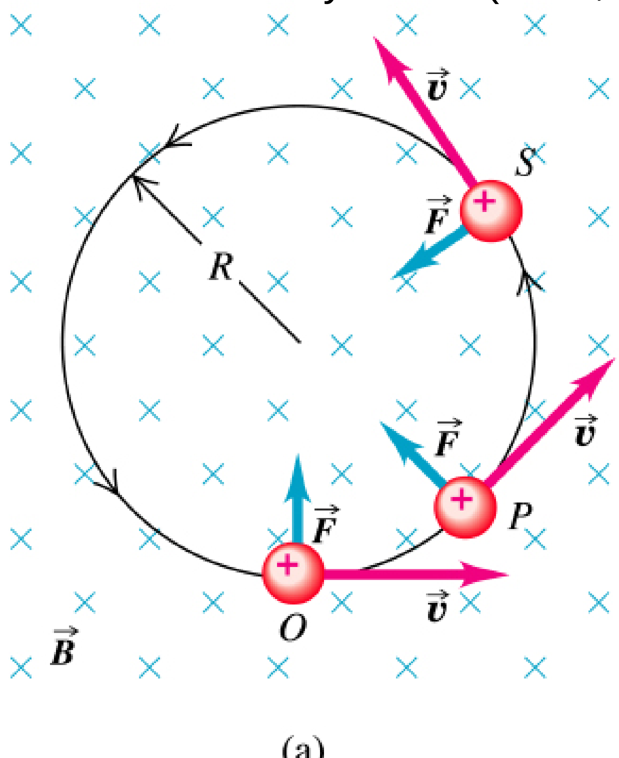
Animación

Ejemplo1: (Prob 7) Un protón penetra perpendicularmente a un campo magnético uniforme de 1,5 T. Si el protoń se mueve con una velocidad de modulo $v=3{,}1\times10^{7}$ m/s Calcular:

- Fuerza que ejerce el campo sobre el protón
- Aceleración de protón debido a la fuerza magnética.
- Tipo de trayectoria que describiría el proton. Caracterísiticas de esta trayectoria (radio, periodo de las revoluciones...)



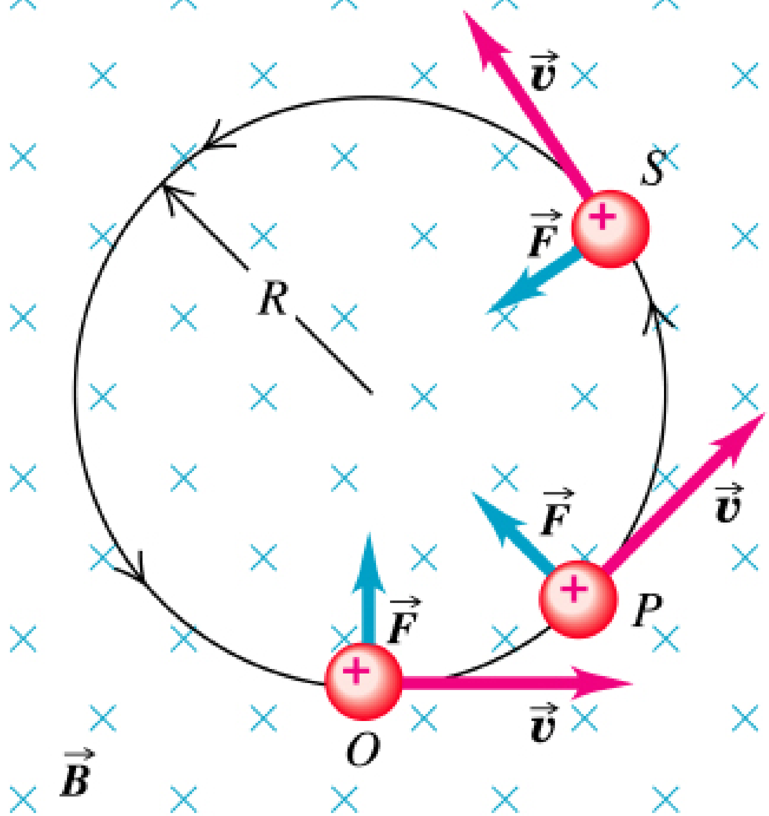
$$\left.\begin{aligned} F &= qvB \\ F &= m\frac{v^2}{r} \end{aligned}\right\} \Rightarrow r = \frac{mv}{qB}$$



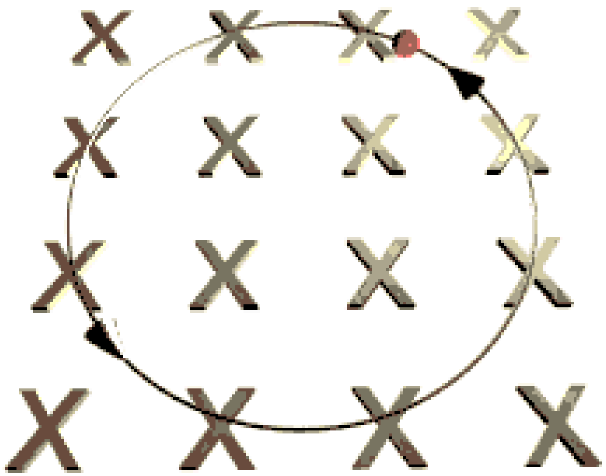
(a)

Magnetismo: Fuerzas sobre cargas en movimiento

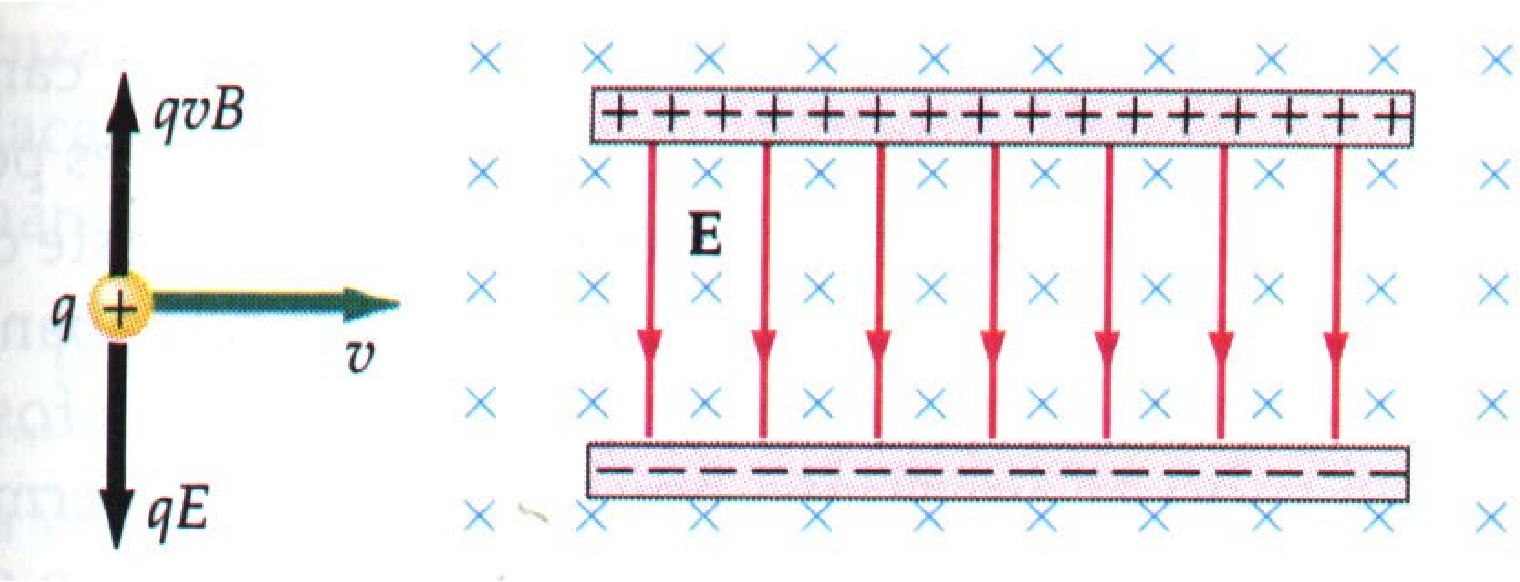
- **Aplicaciones de la fuerza de Lorentz:** Animación
  - Aceleradores de partículas Ciclotrón
  - Espectometro de masas
  - Auroras boreales



(a)



→ Selector de velocidades:



$$V = \frac{E}{B}$$

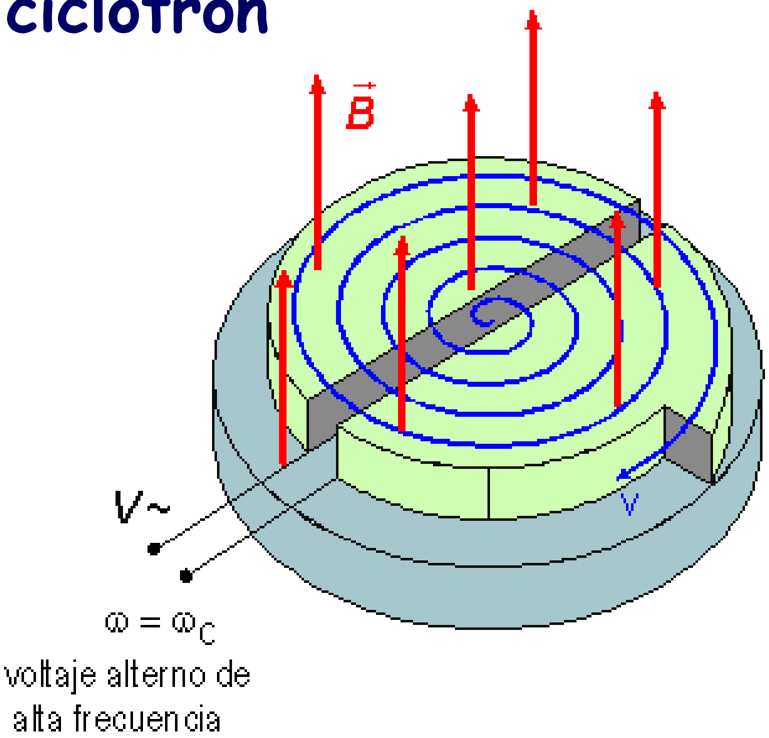
¿Cómo se desviara la partícula si su velocidad es mayor? ¿y si es menor?

Magnetismo: Fuerzas sobre cargas en movimiento

→ Aceleradores de particulas: El ciclotron

$$\left.\begin{aligned} F &= qvB \\ F &= m\frac{v^2}{r} \end{aligned}\right\} \Rightarrow r = \frac{mv}{qB}$$

$$\left.\begin{aligned} v &= \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{2\pi r}{T} \\ r &= \frac{mv}{qB} \end{aligned}\right\} \Rightarrow r = \frac{m \cdot 2\pi r}{qBT} \Rightarrow \left\{\begin{aligned} T &= \frac{2\pi m}{qB} \\ \omega &= \frac{qB}{m} \end{aligned}\right.$$



$$\boxed{v_{Salida} = \frac{qBr_{max}}{m}}$$

Video 1 (explicacion),
Video 2(aplicaciones),
http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/elecmagnet/ciclotron/ciclo.html

Magnetismo: Fuerzas sobre cargas en movimiento

Ejemplo: Un ciclotrón que acelera protones posee un campo magnético de 1,5 T y un radio máximo de 0,5 m.

a -) ¿Cuál es la frecuencia del ciclotrón?

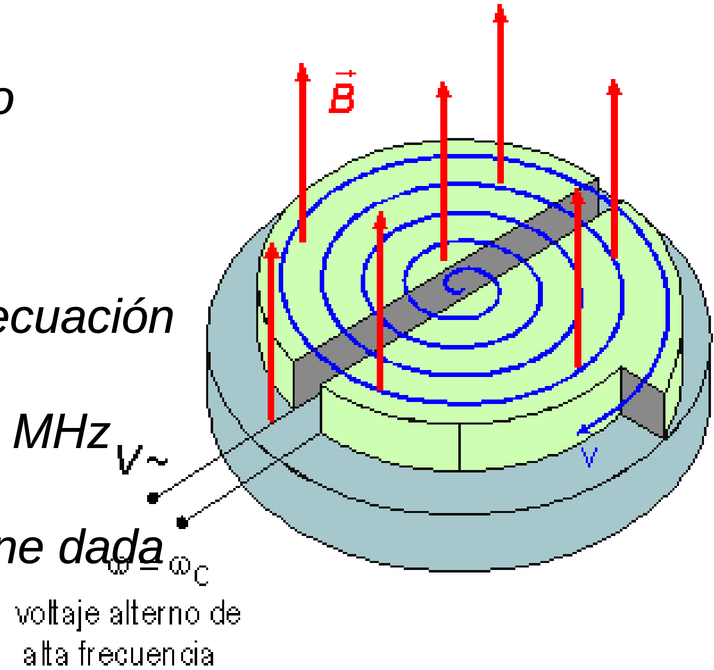
b-) Determinar la energía cinética con que emergen los protones (en eV).

(a) El periodo de una partícula en un campo magnético constante viene dado por

$T = 2 \cdot \pi m / q B$

por tanto la frecuencia del ciclotrón viene dada por la ecuación

$f = q B / 2 \pi m =$ *(sustituyendo directamente)* $= 22{,}9$ *MHz*



b-)La energía cinética de los protones emergentes viene dada por la ecuación

$E\ cinetica = ½\, mv^2 = ½\, (q^2 B^2 / m)\, r_{max}^2$

$E\ cinetica = 4{,}31 \cdot 10^{-12}$ *Julios*

Las energías de los protones y otras partículas elementales se expresan usualmente en electrónvoltios (eV).

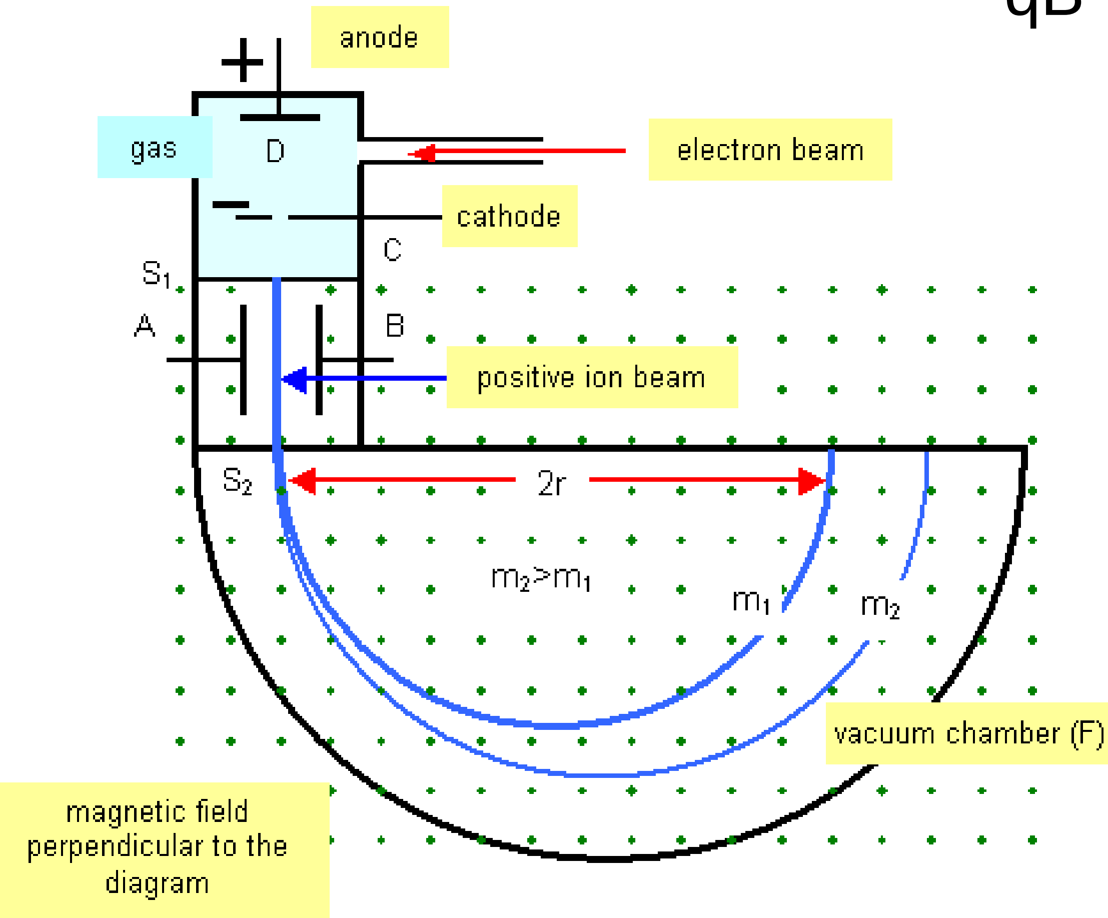
Como $1\ eV = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ *Julios , resulta*

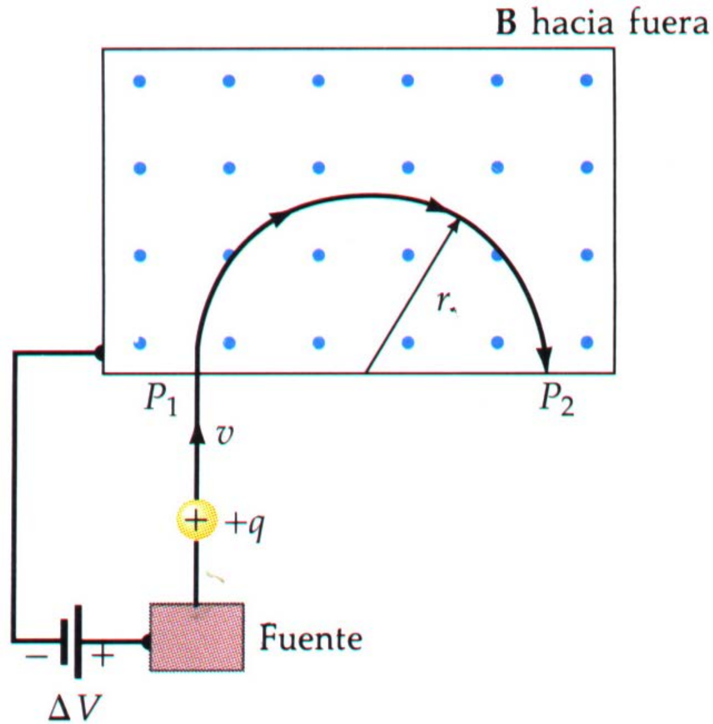
$E\ cinetica = 26{,}9$ *MeV (Millones de electrónvoltios)*

Magnetismo: Fuerzas sobre cargas en movimiento

→ **Espectrometro de masas**

$$r = \frac{mv}{qB}$$





$$\frac{1}{2}mv^2 = q\Delta V$$

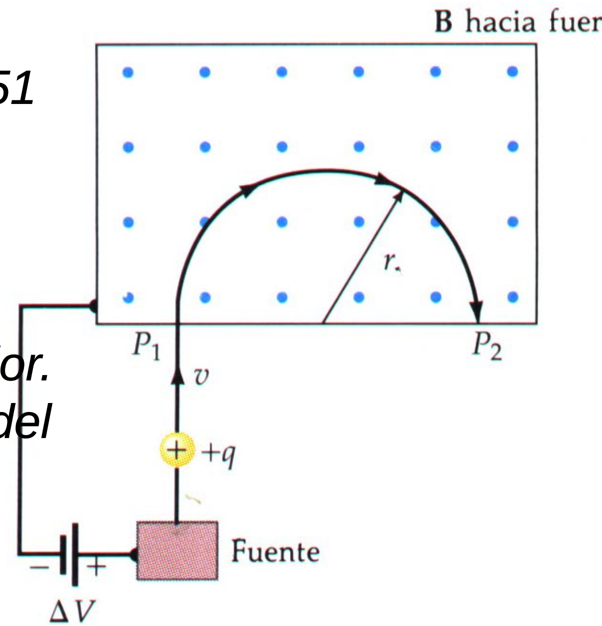
$$\boxed{\frac{m}{q} = \frac{B^2 r^2}{2\Delta V}}$$

http://newton.cnice.mec.es/materiales_didacticos/espectrometro/applet.html

Un ion de ^{58}Ni de carga + *e* y masa 9,62 ·10^{-26} Kg se acelera a través de una diferencia de potencial de 3 kV y se desvía en un campo magnético de 0,12 T.

a -) Determinar el radio de curvatura de la órbita del ion.

b -) Determinar la diferencia que existe entre los radios de curvatura de los iones ^{58}Ni y ^{60}Ni.



De la ecuación ultima se obtiene $r^2 = 2 \cdot m \cdot \Delta V / q \cdot B^2 = 0{,}251$

$r = 0{,}501$ m

b-) El radio de la órbita de un ion en un determinado campo magnético es proporcional a la raíz cuadrada de su masa para un determinado voltaje acelerador.

Si r_1, es el radio de la órbita del ion 58Ni y r_2 el de la órbita del ion 60Ni, la relación de los radios es $r_2 / r_1 = (m_2 / m_1)$ ½

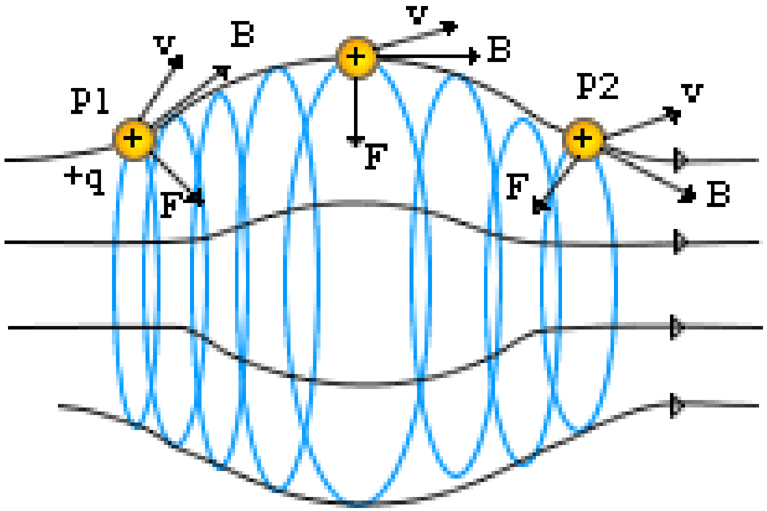
Por tanto, el radio de la órbita del ion 60Ni es $r_2 = (60 / 58)^{1/2} = 0{,}510$ m

La diferencia entre los radios de las órbitas es
$r_2 - r_1 = 0{,}510$ m $- 0{,}501$ m $= 0{,}009$ m $= 9$ mm

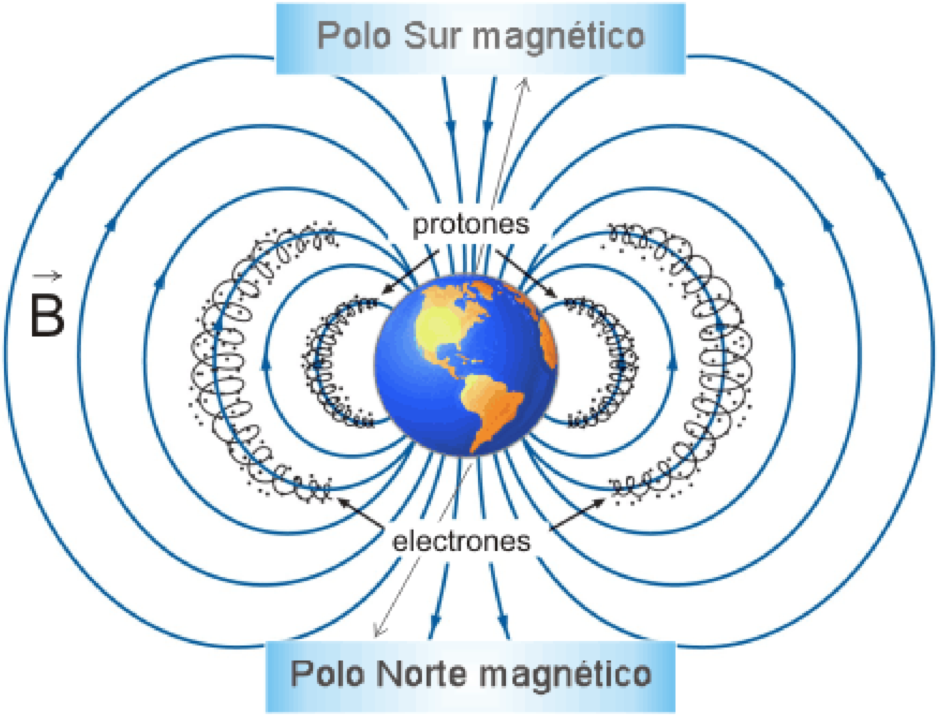
Magnetismo: Fuerzas sobre cargas en movimiento

→ **Auroras Boreales:**

[Video 1](), [Video 2(explicac),]()



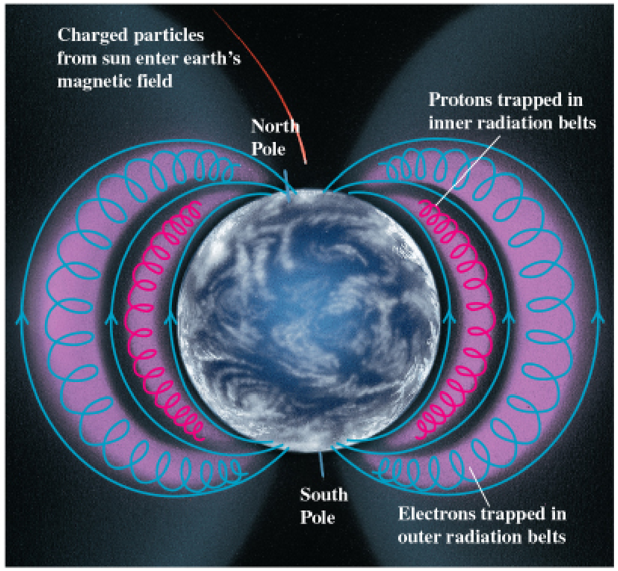
Botella magnetica



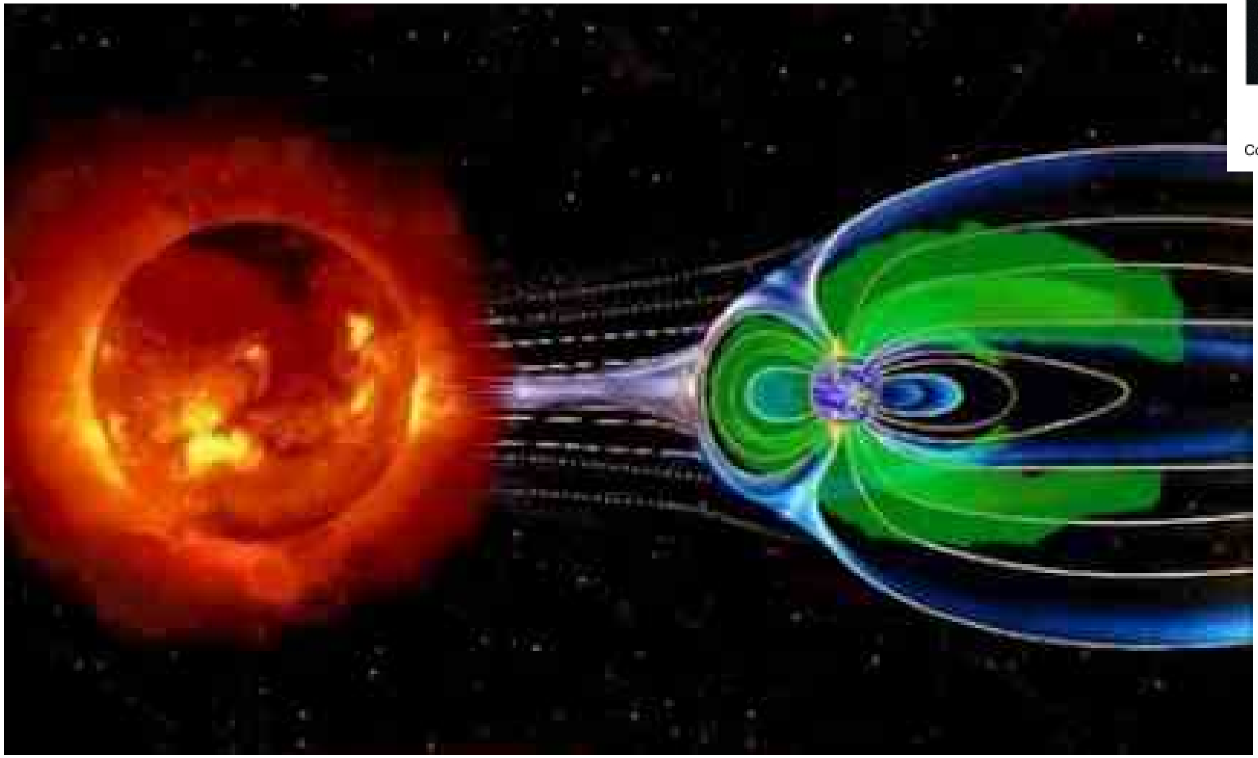
Cinturones de Van Allen

→ Auroras Boreales:

Video 1, Video 2(explicac),



(a)



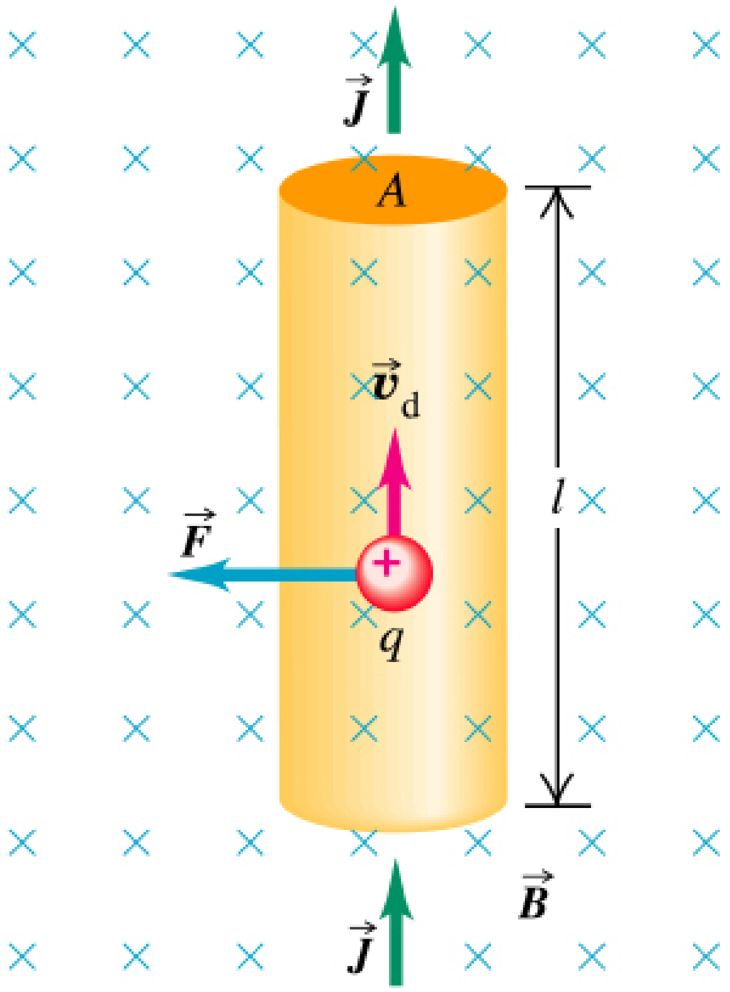
Magnetismo: Fuerzas sobre corrientes

$$\vec{F} = I(\vec{l} \times \vec{B})$$

$$F = \sum_{i=1}^{N} f_i = \sum_{i=1}^{N} q_i v_d B = N q v_d B$$

$$F = N q v_d B = N q \frac{l}{\Delta t} \cdot B = \frac{Nq}{\Delta t} l \cdot B = \frac{\Delta Q}{\Delta t} l \cdot B$$

$$F = I \cdot l \cdot B$$



→ **Animaciones:**
- →[Fuerzas sobre corrientes](#) **(Walter Fendt)**
- →[Motores](#) **(Walter Fendt)**

Ejemplo: Calcular la corriente que circula por un alambre recto sobre el que se ejerce una fuerza de 11.7 x 10^{-4} N al ser introducido perpendicularmente a un campo magnético de 0.03 T, si se sumergen 2 cm del alambre.

Solución: I=1,95A

<u>Datos:</u>

F=11,7·10^{-4} N

B=0,03 T

l=2cm=0,02m

$$\vec{F} = I(\vec{l} \times \vec{B})$$

$$F = I \cdot l \cdot B \cdot sen(\vec{l}, \vec{B}) = I \cdot l \cdot B sen(90)$$

$$F = I \cdot l \cdot B \quad \Rightarrow \quad I = \frac{F}{lB}$$

$$I = \frac{F}{lB} = \frac{11{,}7 \cdot 10^{-4}}{0{,}02 \cdot 0{,}03} = 1{,}95 A$$

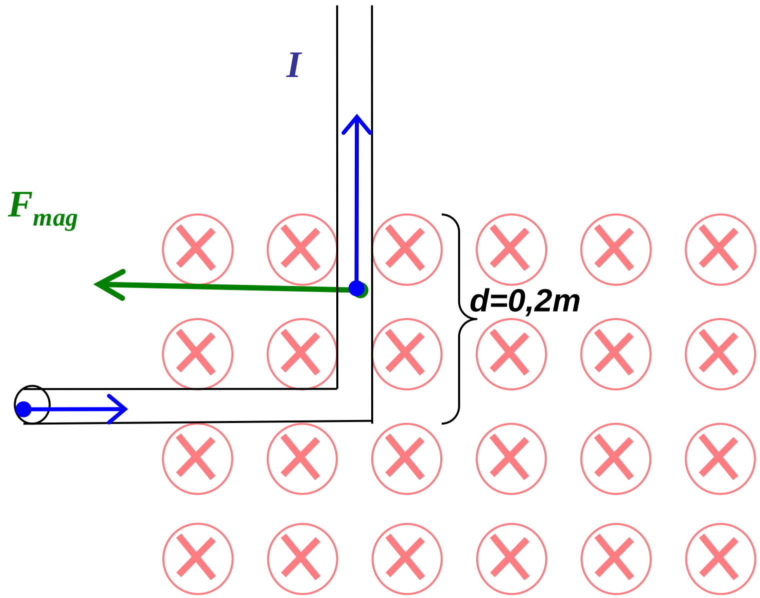


Figura 8. Fuerza magnética sobre un conductor rectilíneo.

Magnetismo: Fuerzas sobre corrientes

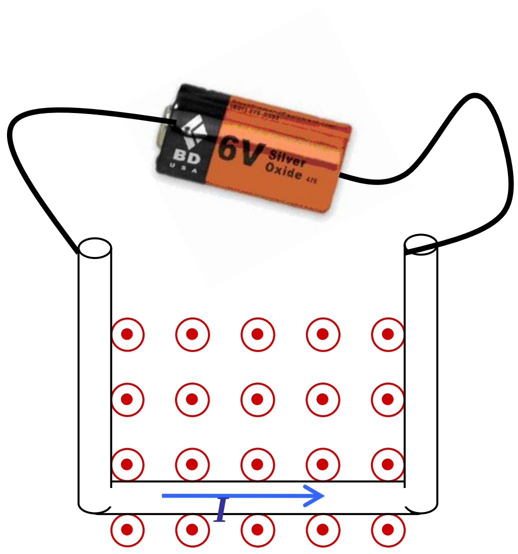
a) Tenemos un conductor rectilíneo de 2Ω de resistencia si se conecta a una batería de 4,5V. ¿Que fuerza magnética sufrirá si se introduce en un campo magnético de 0,4T tal y como muestra en la figura a?

b) Si conectamos dos pilas de 4,5 en serie, tal y como muestra la figura b) y el conductor de la figura tiene una resistencia de 1 Ω ¿Cuanto valdrá la fuerza?

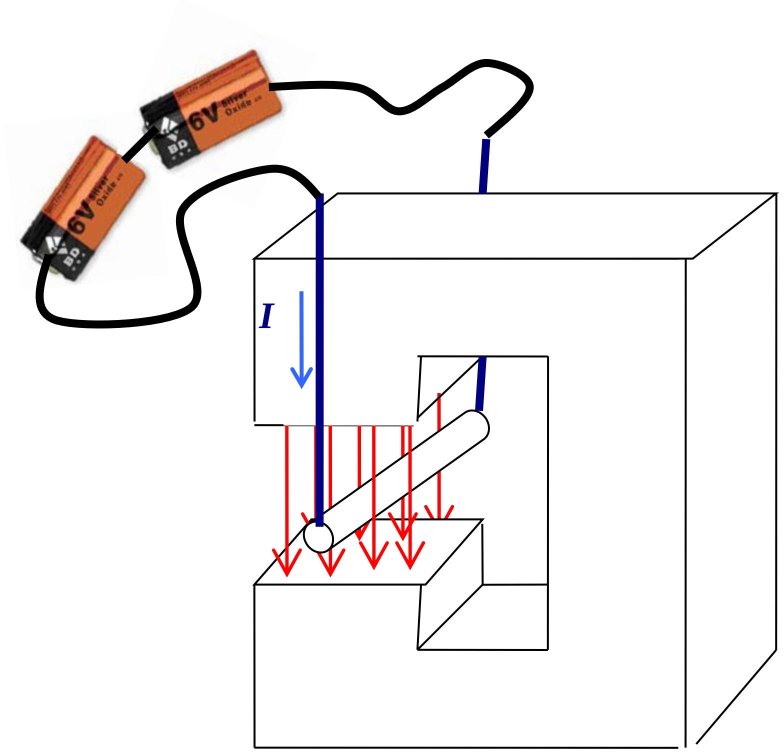
En ambos casos indica (dibuja) la dirección y sentido de la fuerza.

Nota: La parte de conductor dentro del campo magnético mide 20cm.

a)



b)



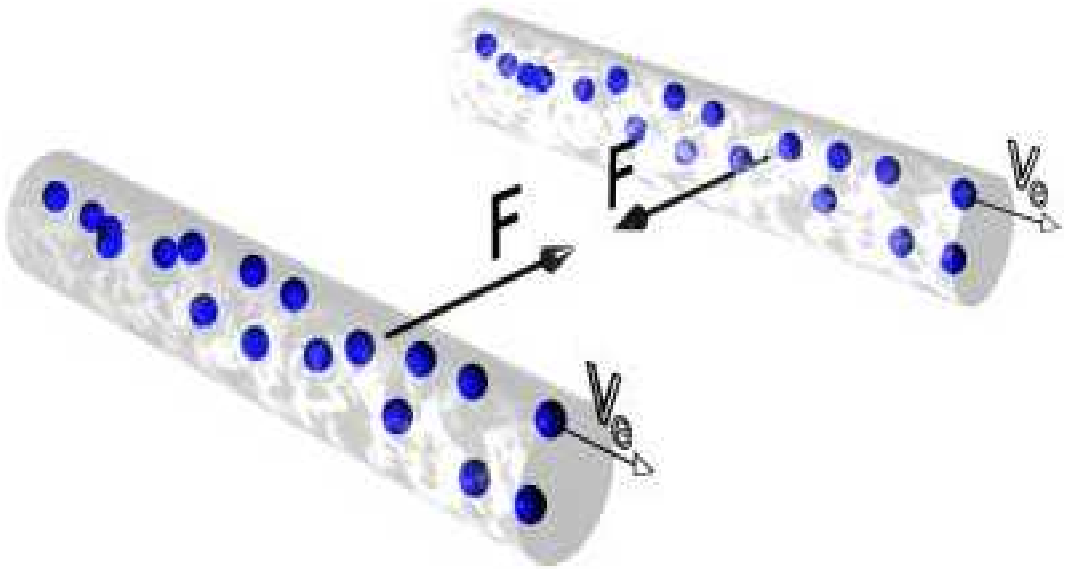
Solución: a) F=0,18N (hacia abajo) b) F=0,72N (hacia la izquierda del papel)

Magnetismo: Fuerzas entre corrientes paralelas

$$\vec{F}_i = I_i(\vec{l} \times \vec{B}_j)$$

$$B_i = \frac{\mu I_j}{2\pi d_{ij}}$$

$$\boxed{F = \frac{\mu I_1 I_2 \, l}{2\pi d}}$$



→ **Animaciones:**

→**Fuerzas sobre corrientes (Walter Fendt)**

→**Motores (Walter Fendt)**

Ejemplo 8 pag. 209): Dos conductores rectilíneos y paralelos de gran longitud, están separados en el aire 10 cm. Por ellos circulan unas intensidades de 6A y 4A respectivamente. Calcula la fuerza por unidad de longitud que actúa sobre cada uno de ellos.

a) Si las corrientes tienen el mismo sentido

b) Si tienen sentidos contrarios

Solución: a) F(por unidad de long)=$4{,}8\cdot10^{-5}$*N/m de atracción b) Igual pero de repulsión*.

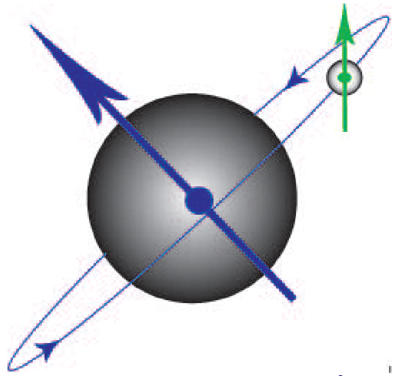
Añadir motores eléctricos

Magnetismo en la materia: Origen del magnetismo

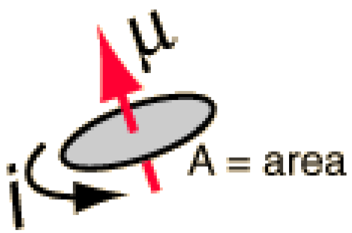
Origen del magnetismo:

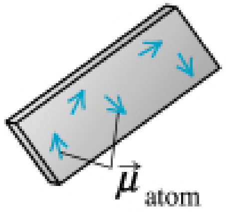
→Sabemos que una corriente eléctrica genera un campo magnético a su alrededor.

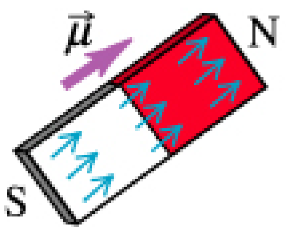
→En el interior de la materia existen pequeñas corrientes cerradas debidas al movimiento de los electrones que contienen los átomo.



→Cada una de ellas origina un microscópico imán o dipolo. Se dice también que tienen un "momento dipolar magnetico"







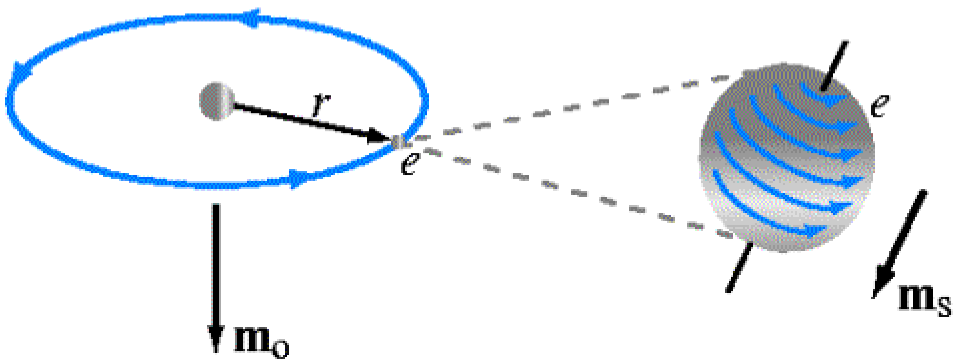
(b)

Magnetismo en la materia: Origen del magnetismo

Las principales contribuciones a este momento magnético son:

→El momento magnético orbital (orbita de los electrones)

→El momento magnético de spin (el electrón gira sobre si mismo)



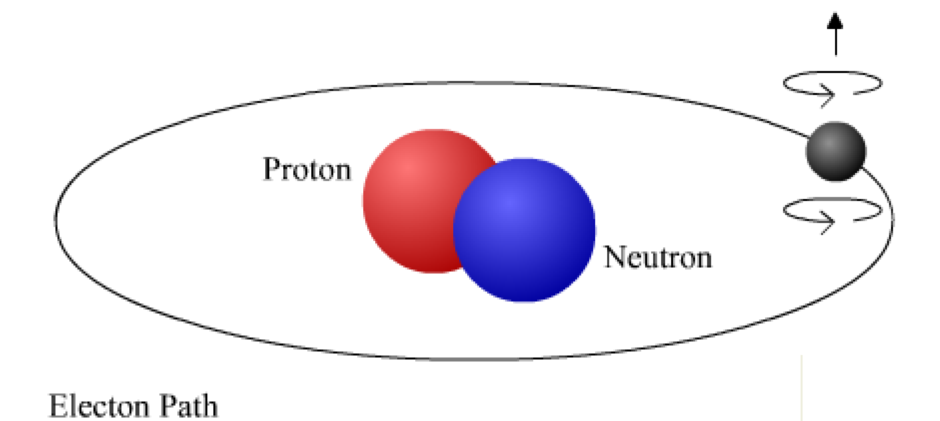
(a) Orbiting electron (b) Spinning electron

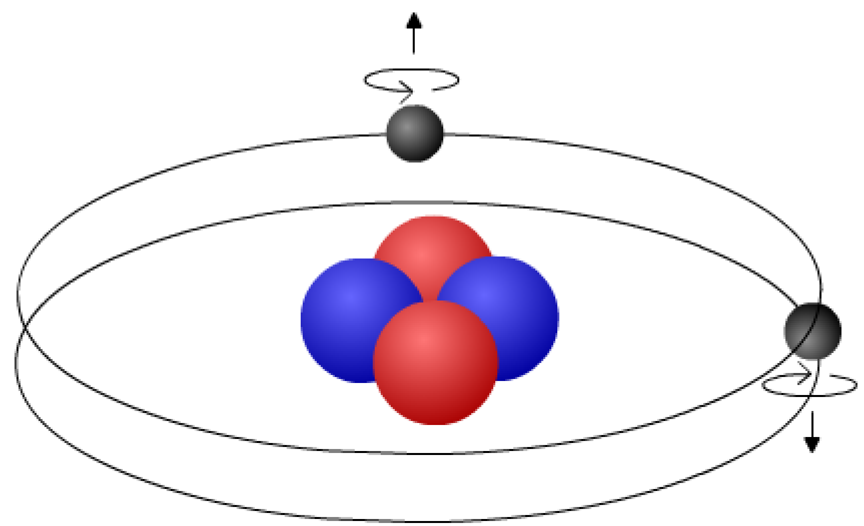
Animaciones:

→[Spin y momento orbital]

→[Spines apareados]

Magnetismo en la materia: Origen del magnetismo





Animaciones:

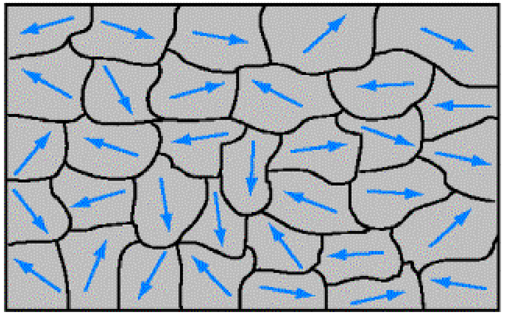
→ Spin y momento orbital

→ Spines apareados

Magnetismo en la materia: Origen del magnetismo

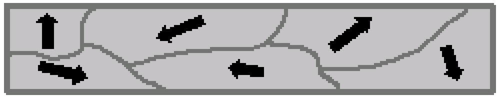
Origen del magnetismo:

→Desde el punto de vista magnético, los materiales están divididos en pequeñas regiones, denominadas dominios magnéticos, donde estos microscópicos dipolos están alineados formando pequeños imanes.

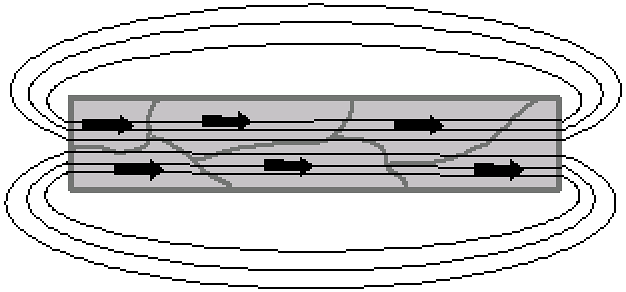


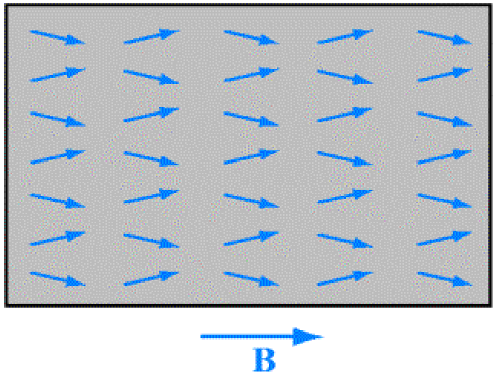
(a) Unmagnetized domains

→ Cuando estos pequeños imanes están orientados en todas direcciones (al azar) sus efectos se anulan mutuamente y el material no presenta propiedades magnéticas



→ en cambio si todos los imanes se alinean actúan como un único imán y en ese caso decimos que la sustancia se ha magnetizado.

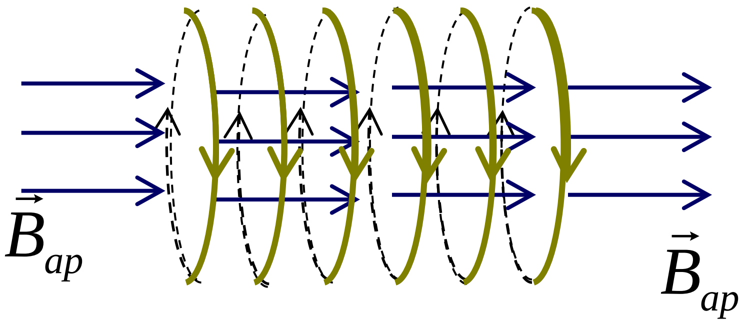




(b) Magnetized domains

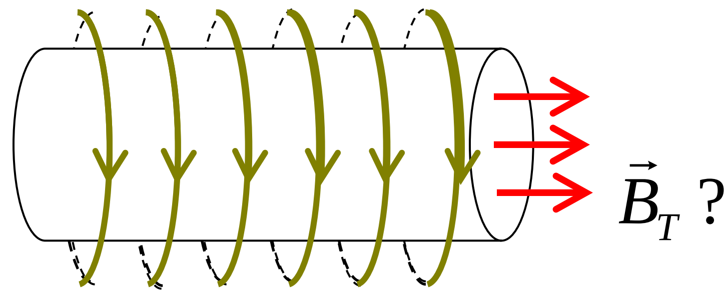
Magnetismo en la materia

Los materiales magnéticos se caracterizan por su **permeabilidad μ**, que es la relación entre el campo de inducción magnética (**B**) y el campo magnético dentro del material (**H**):



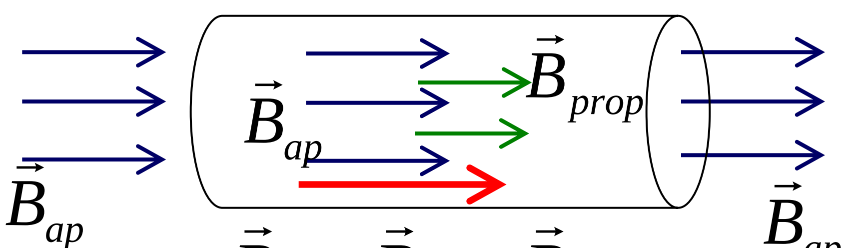
$$\vec{B}_{ap} = \mu_0 \vec{H} \text{ (en el vacio)}$$

Bobina creando un campo $\vec{B}_{ap}$



$$\vec{B}_{Total} = \mu \vec{H} \text{ (en el material)}$$

Bobina con un material en su interior, el campo total será la suma del campo creado por la bobina + el campo creado por los dipolos del material



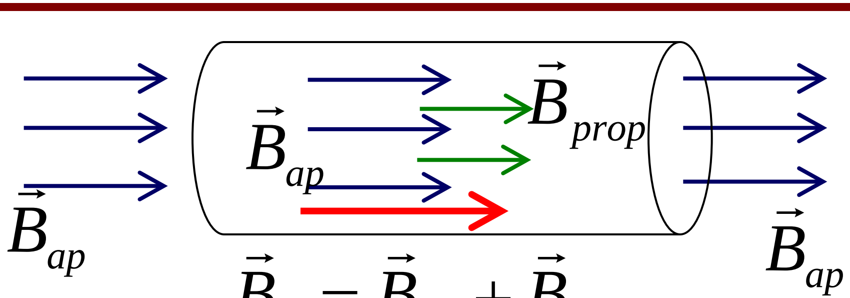
$$\vec{B}_T = \vec{B}_{ap} + \vec{B}_{prop}$$

$\vec{B}_{ext}$: campo aplicado externamente

$\vec{B}_{prop}$: campo propio del material creado por los dipolos

$\vec{B}_{Total}$: campo total en el interior del material (la suma de los 2 anteriores)

Magnetismo en la materia



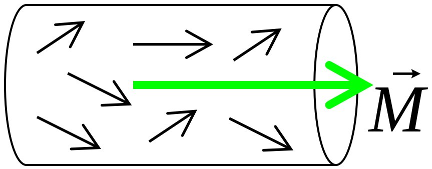
$$\vec{B}_T = \vec{B}_{ap} + \vec{B}_{prop}$$

$\vec{B}_{ext}$: campo aplicado externamente

$\vec{B}_{prop}$: campo propio del material creado por los dipolos

$\vec{B}_{Total}$: campo total en el interior del material (la suma de los 2 anteriores)

Por efecto del campo externo aplicado los dipolos de l material se alinean (más o menos). La suma de todos los momentos magnéticos de cada uno de estos dipolos produce un momento dipolar total llamado ***Magnetización (M)***



Esta ***Magnetización (M) depende del campo aplicado (es proporcional) y del tipo de material***

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} = \chi_m \left(\frac{\vec{B}_{apl}}{\mu_0} \right)$$

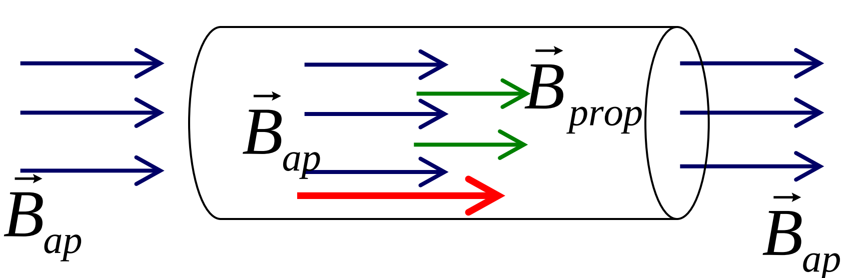
Donde X_m es una constante denominada ***susceptibilidad magnética*** *y depende del tipo de material*

M *produce un campo propio del material que se sumara al efecto del campo externo aplicado:*

$$\vec{B}_{prop} = \mu_0 \vec{M} = \mu_0 \left(\chi_m \vec{H} \right) = \mu_0 \chi_m \cdot \frac{\vec{B}_{apl}}{\mu_0} = \chi_m \cdot \vec{B}_{apl}$$

$$\boxed{\vec{B}_{Total} = \vec{B}_{ap} + \vec{B}_{prop} = \left(1 + \chi_m\right) \vec{B}_{ap}}$$

Magnetismo en la materia



$\vec{B}_{ext}$: campo aplicado externamente

$\vec{B}_{prop}$: campo propio del material creado por los dipolos

$\vec{B}_{Total}$: campo total en el interior del material (la suma de los 2 anteriores)

$$\boxed{\vec{B}_{Total} = \vec{B}_{ap} + \vec{B}_{prop} = (1+\chi_m)\vec{B}_{ap}}$$

Teniendo en cuenta que $\vec{B}_{ap} = \mu_0 \vec{H} \Rightarrow$ $\boxed{\vec{B}_{Total} = \mu_0 (1+\chi_m)\vec{H}}$

Comparando con:

$$\mathbf{B} = \mu\, \mathbf{H} \qquad \mu = \mu_r \mu_0 = \mu_0 (1 + \chi_m)$$

donde μ_r **es la permeabilidad magnética relativa** y χ_m **la susceptibilidad magnética** del material.

Así dependiendo de que:

$$\chi_m \gtreqless 0 \qquad \mu \gtreqless \mu_0 \qquad \mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \gtreqless 1$$

El campo magnético total dentro del material será mayor, menor o igual que el que habría en el vació

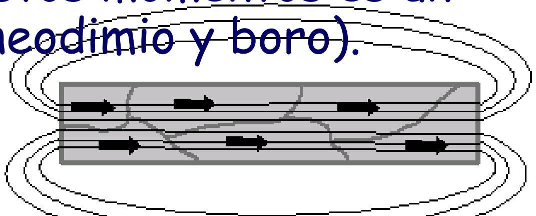
Magnetismo en la materia: Clasificación de los materiales

1. Materiales paramagnéticos:

- Los materiales también son atraídos por los imanes, pero de forma muy débil (imantación débil), excepto a muy bajas temperaturas.
- Es posible imantarlos (muy débilmente) si se los sitúa junto a un imán, pero pierden rápidamente esta característica una vez que se ha retirado el imán.
- Poseen un momento dipolar magnético neto no nulo (electrones desapareados)
- Tienen:
  - Una suceptibilidad magnética pequeña y positiva ($X>0$)
  - Una permeabilidad magnética (μ) ligeramente > μ_0
  - Una permeabilidad magnética relativa(μ_r) ligeramente >1
- Esto se debe a que la alineación de los dipolos magnéticos es muy débil.
- Algunos materiales paramagnéticos son: el aire, aluminio, magnesio, titanio, wolframio, manganeso, paladio, el oxígeno.
- Las líneas de campo magnético "penetran" con "facilidad" en estos materiales de forma que el campo total en su interior es ligeramente mayor que el externo

1. Materiales ferromagnéticos:

- Muestran un comportamiento similar al del hierro, es decir, son atraídos intensamente por los imanes.
- En estos materiales los dominios magnéticos están orientados al azar, pero en presencia de un campo magnético externo éstos se orientan en la misma dirección y sentido que el campo externo quedando imantados.
- Pueden mantener esta alineación de los dipolos y por tanto las característi-cas que posee un imán natural después del proceso de imantación.
- Tienen:
  - Una suceptibilidad magnética grande y positiva (X>>0)
  - Una permeabilidad magnética (μ) mucho mayor que μ_0 (μ>> μ_0)
  - Una permeabilidad magnética relativa(μ_r) l mayor que ›1 (μ_r>> 1)
- Esto se debe a que la alineación de los dipolos magnéticos es muy débil.
- Algunos materiales ferromagnéticos son: el hierro (Fe), el cobalto (Co), el gadolinio (Gd), el níquel (Ni), el calcio (Ca) y compuestos de estos, de los cuales uno de los más conocidos es la magnetita (Fe_3O_4) o el acero.
- Actualmente los imanes más potentes se fabrican con Neodimio (Nd) (Uno de los mejores imanes permanentes conocidos en estos momentos es un compuesto ferromagnético hecho de gadolinio, neodimio y boro).



1. Materiales ferromagnéticos:

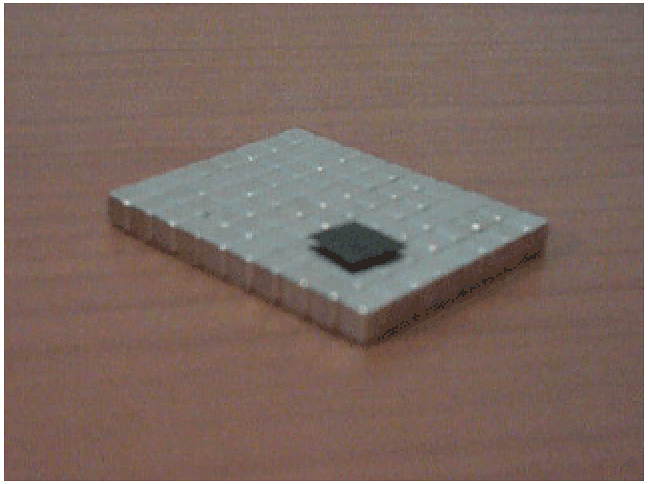
- Los imanes permanentes pueden perder su imanación si los calentamos suficientemente.
- La temperatura a la que esto ocurre se llama temperatura de Curie (T_C)
- Esto se debe a que al calentar el imán sus dipolos microscópicos vibran cada vez con más energía de forma que terminan perdiendo la orientación y vuelven a orientarse de forma aleatoria.

Material	Curie temp. (K)
Co	1388
Fe	1043
$FeOFe_2O_3$ *	858
$NiOFe_2O_3$ *	858
$CuOFe_2O_3$ *	728
$MgOFe_2O_3$ *	713
MnBi	630
Ni	627
MnSb	587
$MnOFe_2O_3$ *	573
$Y_3Fe_5O_{12}$ *	560
CrO_2	386
MnAs	318
Gd	292
Dy	88
EuO	69

Magnetismo en la materia: Clasificación de los materiales

3. Los materiales diamagnéticos

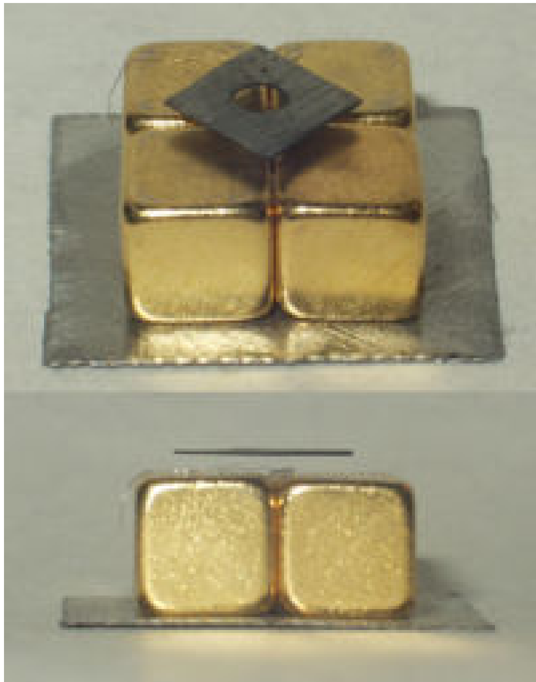
- Son repelidos débilmente por imanes o campos magnéticos externos.
- Una vez que desaparece el campo mag. externo no mantienen estas propiedades magnéticas
- Tiene una suceptibilidad magnética pequeña y negativa ($X<0$) y la permeabilidad magnética (μ)<1
- Esto se debe a que algunos dipolos magnéticos se orientan en sentido contrario al campo magnético externo.
- Algunos materiales diamagnéticos son el diamante, el bismuto, el cobre, el mercurio y el agua.



Videos:

Video1, Video 2

Video3, Video 4



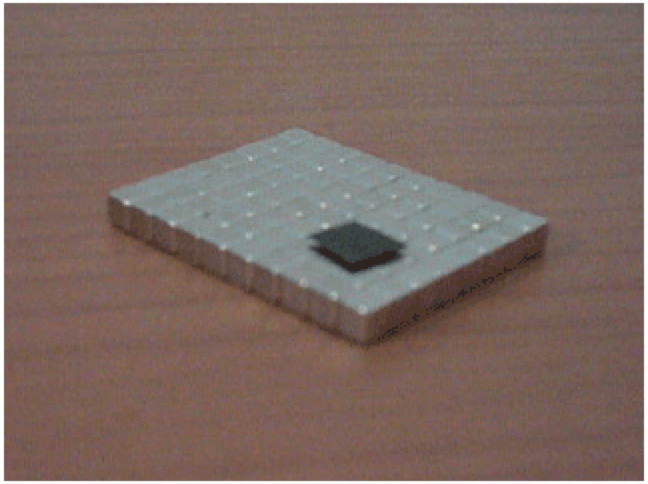
Magnetismo en la materia

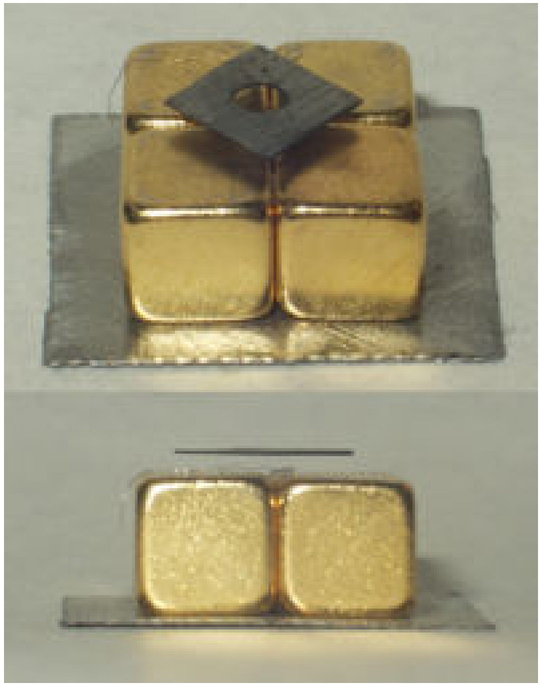
3. Los materiales diamagnéticos

- En lugar de "absorber" las líneas de fuerzas magnéticas (como las ferromagnéticas), estos materiales las expulsan.
- Son sólidos con todos sus electrones apareados, por lo que no tienen momento magnético neto por átomo.
- Muchos de los elementos en la tabla periodica, incluyendo el cobre, la plata, el oro y el carbono (grafito).
- Los materiales diamagnéticos más comunes son: bismuto metálico, hidrógeno, helio y los demás gases nobles, cloruro de sodio, cobre, oro, silicio, germanio, grafito, bronce y azufre. Bismuto (Bi), Plata (Ag), Plomo (Pb), Agua.

Magentismo: Origen del Magnetismo

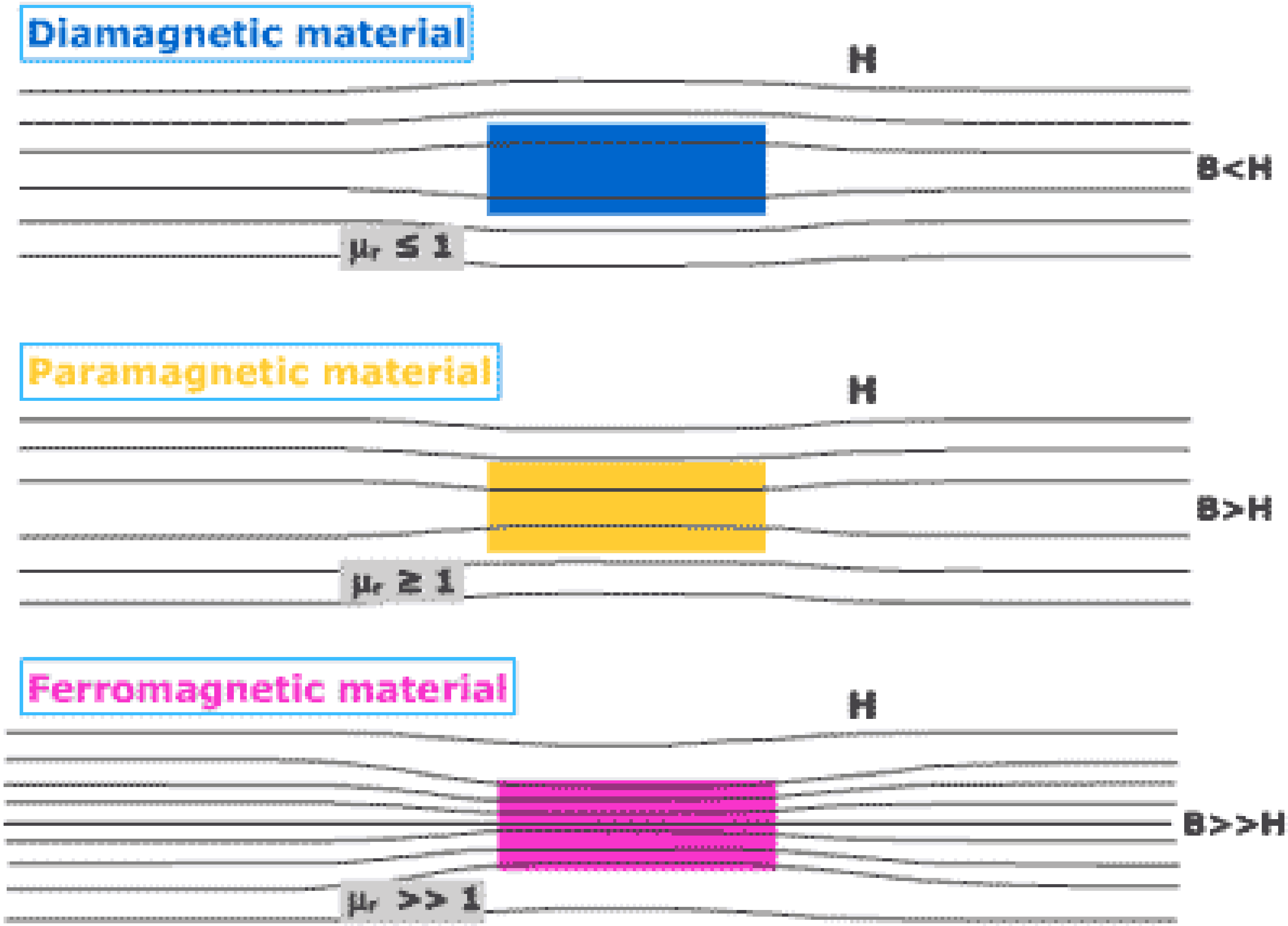
→ **Diamagnetismo:**

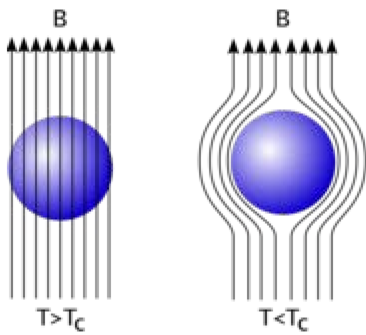




→ **Video**

Magnetismo en la materia





Superconductor

Magnetismo en la materia

Tabla de susceptibilidades magnéticas χ_m a T ambiente y a 1 atmósfera			
Paramagnéticos (+)		**Diamagnéticos (-)**	
Oxigeno	1.94×10^{-6}	Hidrógeno	-2.08×10^{-9}
Sodio	8.4×10^{-6}	Nitrógeno	-6.7×10^{-9}
Magnesio	1.2×10^{-5}	CO_2	-1.19×10^{-8}
Aluminio	2.1×10^{-5}	Alcohol	-0.75×10^{-5}
Tungsteno	7.6×10^{-5}	Agua	-0.91×10^{-5}
Titanio	1.8×10^{-4}	Cobre	-0.98×10^{-5}
Platino	2.93×10^{-4}	Plata	-2.64×10^{-5}
		Oro	-3.5×10^{-5}

Capítulo 24 – Campo eléctrico

Presentación PowerPoint de

Paul E. Tippens, Profesor de Física

Southern Polytechnic State University

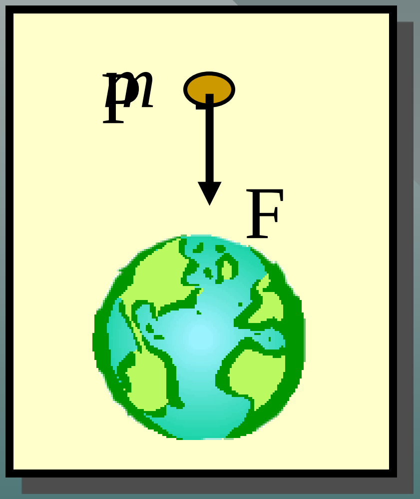
Objetivos: Después de terminar esta unidad deberá:

- Definir el campo eléctrico y explicar qué determina su magnitud y dirección.
- Escribir y aplicar fórmulas para la intensidad del campo eléctrico a distancias conocidas desde cargas puntuales.

- Discutir las líneas de campo eléctrico y el significado de la permitividad del espacio.
- Escribir y aplicar la ley de Gauss para campos en torno a superficies con densidades de carga conocidas.

El concepto de campo

Un campo se define como una propiedad del espacio en el que un objeto material experimenta una fuerza.



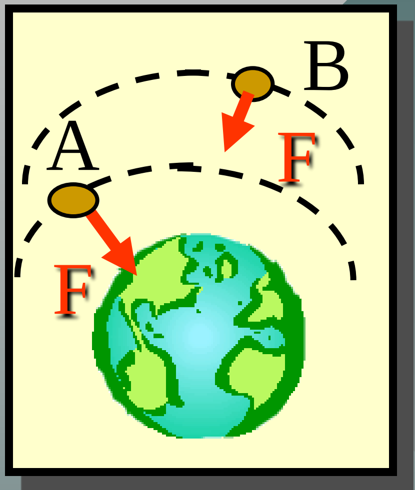
Sobre la Tierra, se dice que existe un campo gravitacional en P.

Puesto que una masa *m* experimenta una fuerza descendente en dicho

¡**No** hay fuerza, no hay campo; no hay campo, no hay fuerza!

La dirección del campo está determinada por la fuerza.

El campo gravitacional



Note que la fuerza F es real, pero el campo sólo es una forma conveniente de describir el espacio.

Considere los puntos A y B sobre la superficie de la Tierra, sólo puntos en el espacio.

El campo en los puntos A o B se puede encontrar de:

$$g = \frac{F}{m}$$

Si g se conoce en cada punto sobre la Tierra, entonces se puede encontrar la fuerza F sobre una masa dada.

La magnitud y dirección del campo g depende del peso, que es la fuerza F.

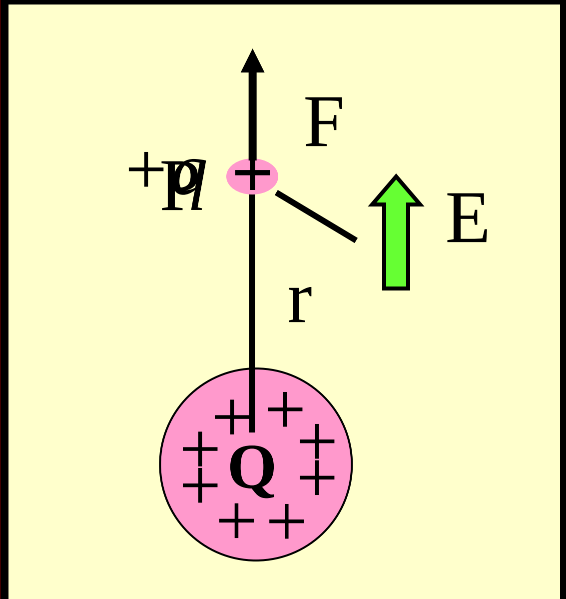
El campo eléctrico

1. Ahora, considere el punto P a una distancia *r* de +Q.

2. En P existe un campo eléctrico E si una carga de prueba +q tiene una fuerza F en dicho punto.

3. La dirección del E es igual que la dirección de una fuerza sobre la carga + (pos).

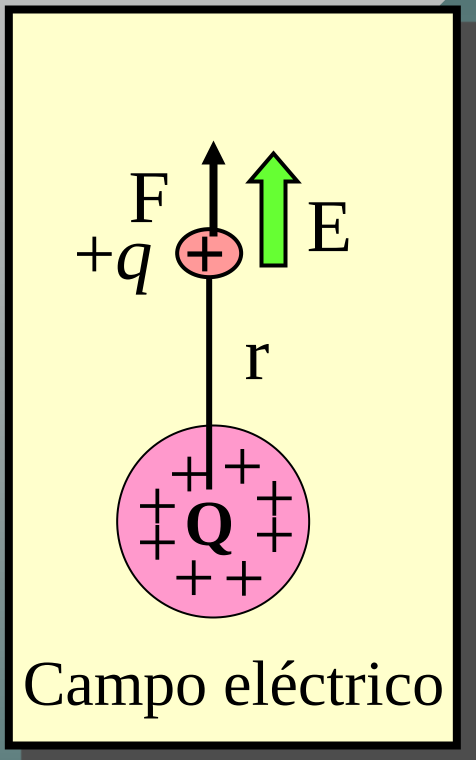
4. La magnitud de E está dada por la fórmula:



Campo eléctrico

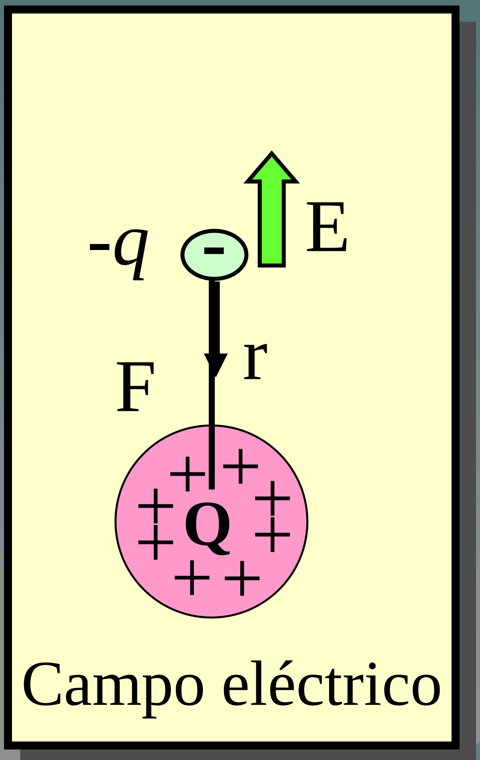
$$E = \frac{F}{q}; \quad \text{unidades} \quad \frac{N}{C}$$

El campo es propiedad del espacio



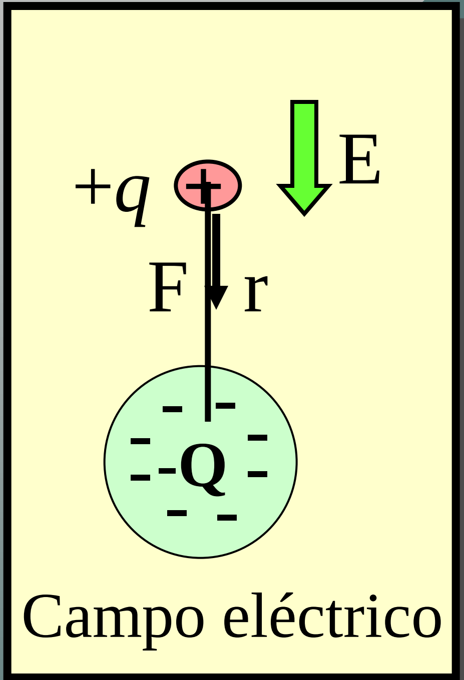
La fuerza sobre +q está en dirección del campo.

La fuerza sobre -q está contra la dirección del campo.



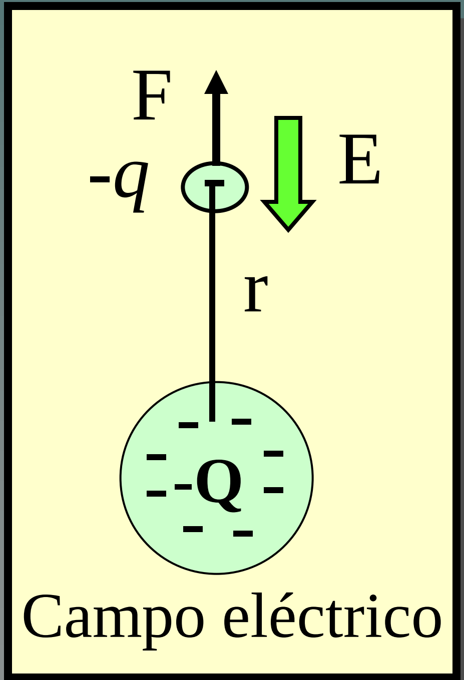
En un punto existe un campo E ya sea que en dicho punto haya o no una carga. La dirección del campo es alejándose de la carga +Q.

Campo cerca de una carga negativa



La fuerza sobre +q está en dirección del campo.

La fuerza sobre -q está contra la dirección del campo.



Note que el campo E en la vecindad de una carga negativa –Q es hacia la carga, la dirección en que se movería una carga de prueba +q.

La magnitud del campo E

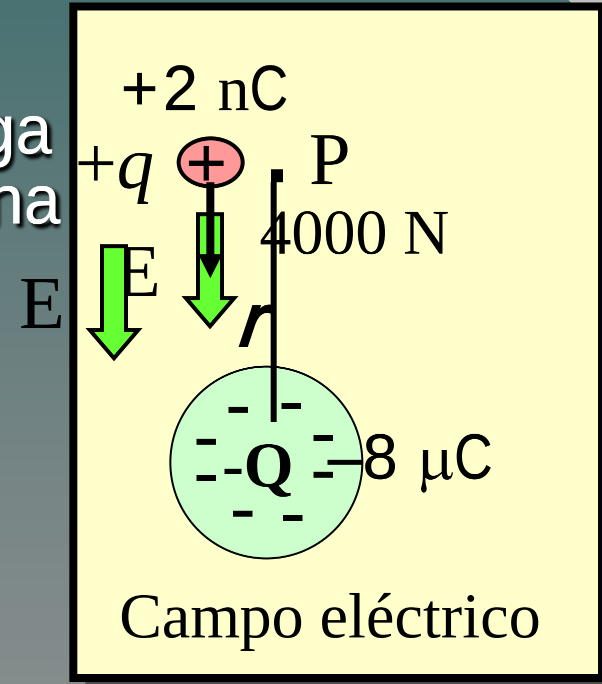
La magnitud de la intensidad del campo eléctrico en un punto en el espacio se define como la fuerza por unidad de carga (N/C) que experimentaría cualquier carga de prueba que se coloque en dicho punto.

Intensidad de campo eléctrico E

$$E = \frac{F}{q}; \quad \text{unidades} \quad \frac{N}{C}$$

La dirección de E en un punto es la misma que la dirección en que se movería una carga positiva SI se colocara en dicho punto.

Ejemplo 1. Una carga de +2 nC se coloca a una distancia r de una carga de –8 μC. Si la carga experimenta una fuerza de 4000 N, ¿cuál es la intensidad del campo eléctrico E en dicho punto P?



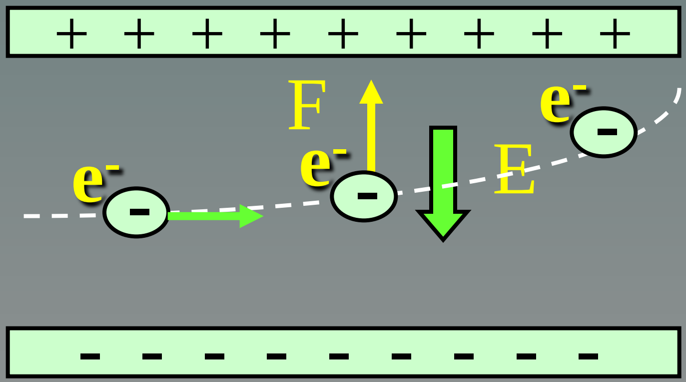
Primero, note que la dirección de E es hacia –Q (abajo).

$$E = \frac{F}{q} = \frac{4000\ \mathrm{N}}{2 \times 10^{-9}\mathrm{C}}$$

E = 2 x 10^{12} N/C hacia abajo

Nota: El campo E sería el mismo para cualquier carga que se coloque en el punto P. Es una propiedad de dicho espacio.

Ejemplo 2. Un campo constante E de 40,000 N/C se mantiene entre las dos placas paralelas. ¿Cuáles son la magnitud y dirección de la fuerza sobre un electrón que pasa horizontalmente entre las placas?



El campo E es hacia abajo, y la fuerza sobre e^- es arriba.

$$E = \frac{F}{q}; \quad F = qE$$

$$F = qE = (1.6 \text{ x } 10^{-19}\text{C})(4 \text{ x } 10^{4} \tfrac{N}{C})$$

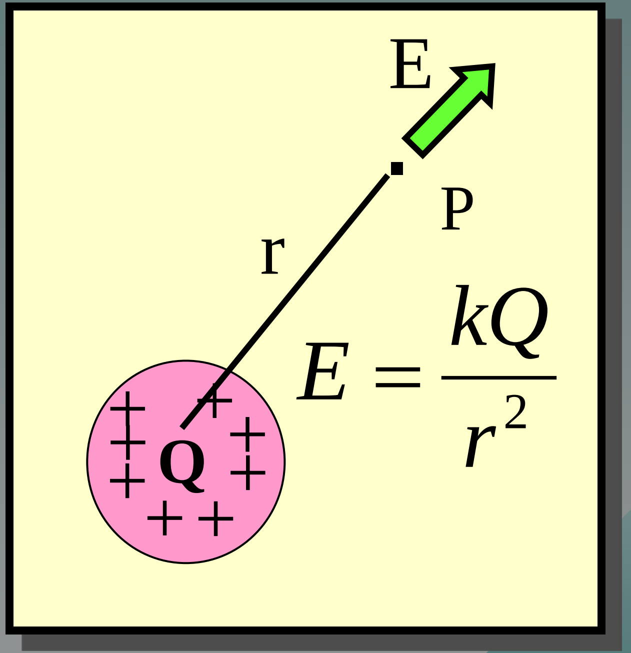
$$\boxed{F = 6.40 \text{ x } 10^{-15} \text{ N, hacia arriba}}$$

Campo E a una distancia r desde una sola carga Q

Considere una carga de prueba +q colocada en P a una distancia r de Q.

La fuerza hacia afuera sobre +q es:

$$F = \frac{kQq}{r^2}$$

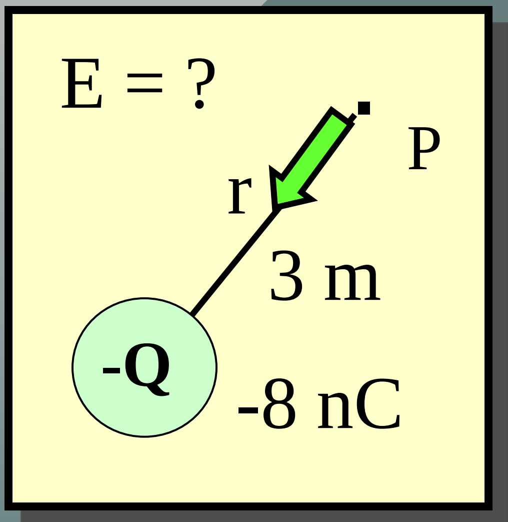


Por tanto, el campo eléctrico E es:

$$E = \frac{F}{q} = \frac{kQ\cancel{q}/r^2}{\cancel{q}}$$

$$\boxed{E = \frac{kQ}{r^2}}$$

Ejemplo 3. ¿Cuál es la intensidad del campo eléctrico E en el punto P, a una distancia de 3 m desde una carga negativa de –8 nC?



Primero, encuentre la magnitud:

$$E = \frac{kQ}{r^2} = \frac{(9 \text{ x } 10^9 \ \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2})(8 \text{ x } 10^{-9}\text{C})}{(3 \text{ m})^2}$$

$$\boxed{E = 8.00 \text{ N/C}}$$

La dirección es la misma que la fuerza sobre una carga positiva si se colocase en el punto P: hacia –Q.

$$\boxed{E = 8.00 \text{ N, hacia -Q}}$$

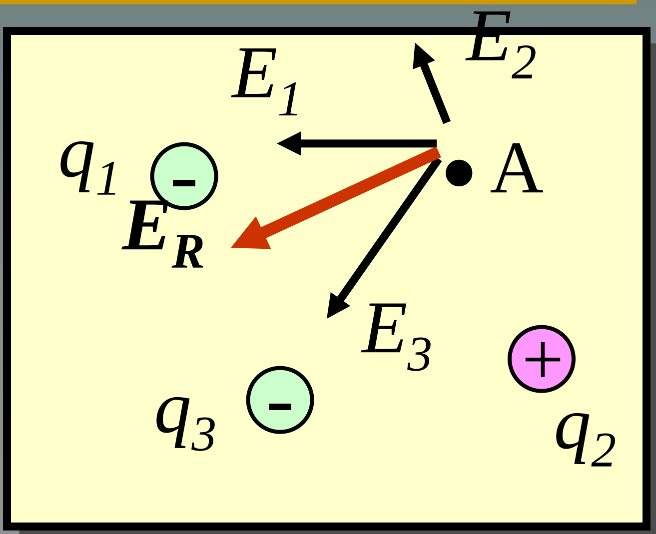
El campo eléctrico resultante

El campo resultante E en la vecindad de un número de cargas puntuales es igual a la suma vectorial de los campos debidos a cada carga tomada individualmente.

Considere E para cada carga.

Suma vectorial:

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{E_1} + \boldsymbol{E_2} + \boldsymbol{E_3}$$

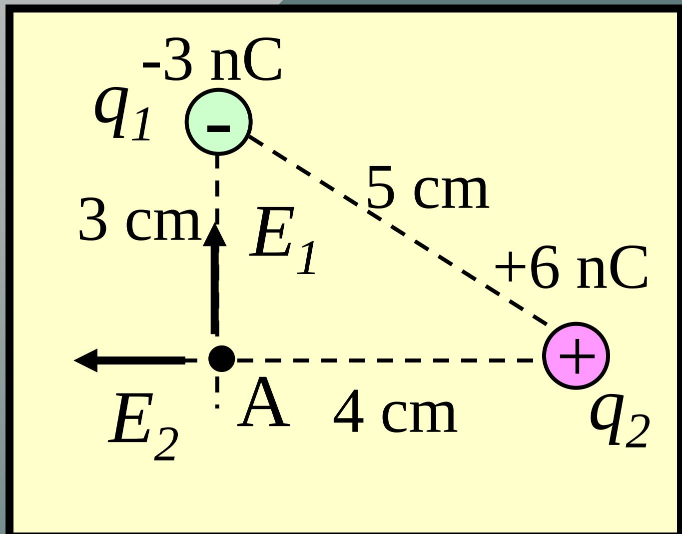


Magnitudes a partir de:

$$E = \frac{kQ}{r^2}$$

Las direcciones se basan en carga de prueba positiva.

Ejemplo 4. Encuentre el campo resultante en el punto A debido a las cargas de –3 nC y +6 nC ordenadas como se muestra.



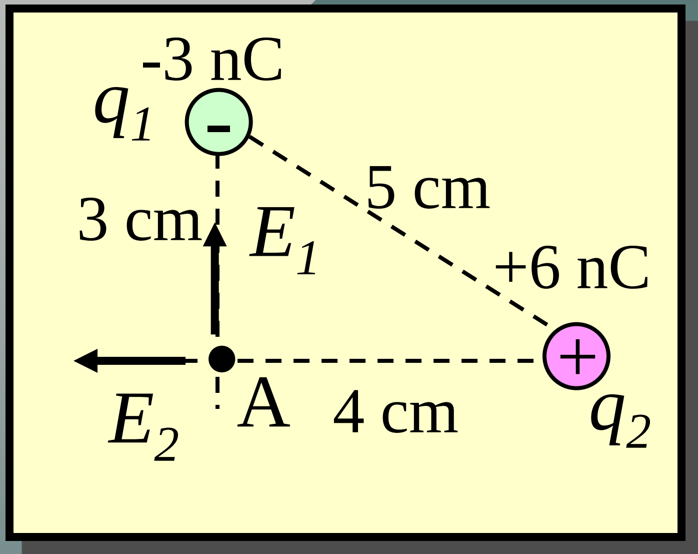
E para cada q se muestra con la dirección dada.

$$E_1 = \frac{kq_1}{r_1^2}; \quad E_2 = \frac{kq_2}{r_2^2}$$

$$E_1 = \frac{(9 \text{ x } 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2})(3 \text{ x } 10^{-9}\text{C})}{(3 \text{ m})^2} \qquad E_2 = \frac{(9 \text{ x } 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2})(6 \text{ x } 10^{-9}\text{C})}{(4 \text{ m})^2}$$

Los signos de las cargas sólo se usan para encontrar la dirección de E

Ejemplo 4. (Cont.) Encuentre el campo resultante en el punto A. Las magnitudes son:



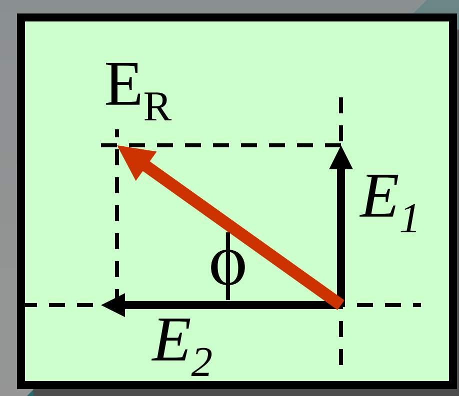
$$E_1 = \frac{(9 \text{ x } 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2})(3 \text{ x } 10^{-9}\text{C})}{(3 \text{ m})^2}$$

$$E_2 = \frac{(9 \text{ x } 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2})(6 \text{ x } 10^{-9}\text{C})}{(4 \text{ m})^2}$$

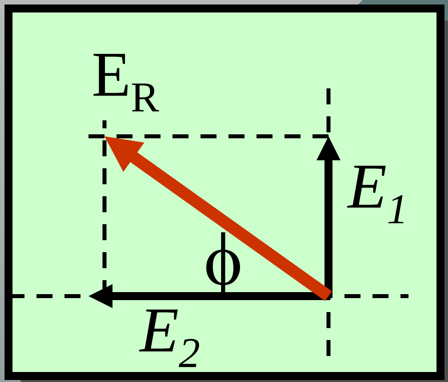
E_1 = 3.00 N, oeste $\quad$ E_2 = 3.38 N, norte

A continuación, encuentre el vector resultante E_R

$$E_R = \sqrt{E_2^2 + R_1^2}; \quad \tan\phi = \frac{E_1}{E_2}$$



Ejemplo 4. (Cont.) Encuentre el campo resultante en el punto A con matemáticas vectoriales.



E_1 = 3.00 N, oeste

E_2 = 3.38 N, norte

Encuentre el vector resultante E_R

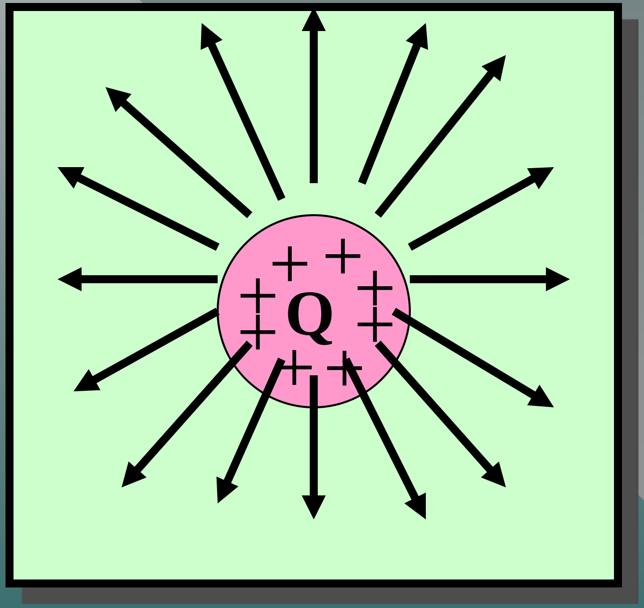
$$E = \sqrt{(3.00\text{ N})^2 + (3.38\text{ N})^2} = 4.52\text{ N};\qquad \tan\phi = \frac{3.38\text{ N}}{3.00\text{ N}}$$

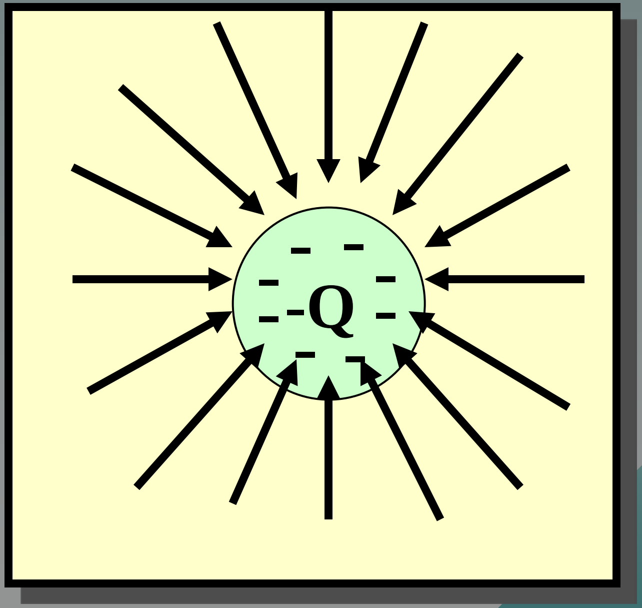
$\phi = 48.4^0$ N de O; o $\theta = 131.6^0$

Campo resultante: $E_R = 4.52$ N; 131.6^0

Líneas de campo eléctrico

Las líneas de campo eléctrico son líneas imaginarias que se dibujan de tal forma que su dirección en cualquier punto es la misma que la dirección del campo en dicho punto.

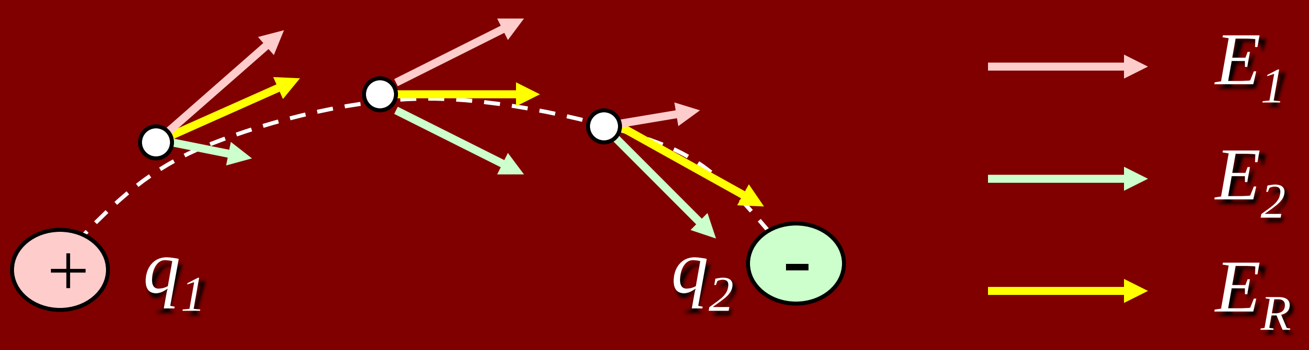




Las líneas de campo se alejan de las cargas positivas y se acercan a las cargas negativas.

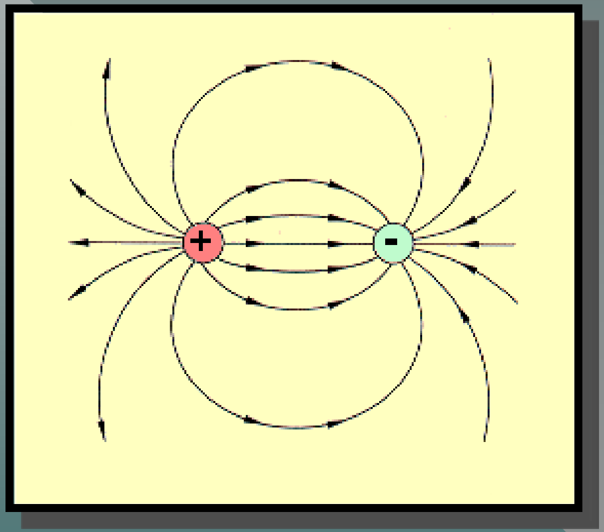
Reglas para dibujar líneas de campo

1. La dirección de la línea de campo en cualquier punto es la misma que el movimiento de +q en dicho punto.
2. El espaciamiento de las líneas debe ser tal que estén cercanas donde el campo sea intenso y separadas donde el campo sea débil.

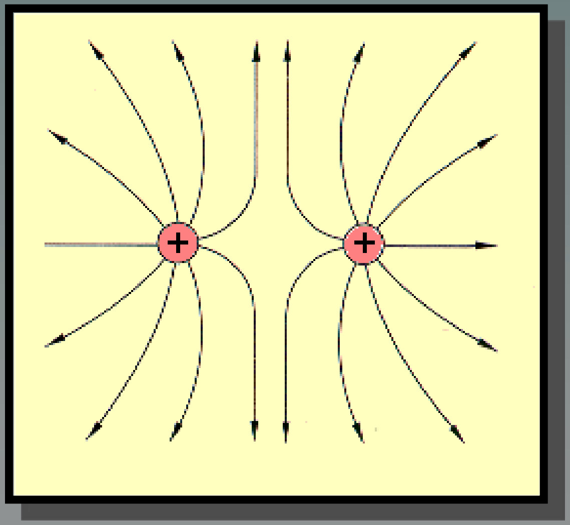


Ejemplos de líneas de campo E

Dos cargas iguales pero opuestas.



Dos cargas idénticas (ambas +).

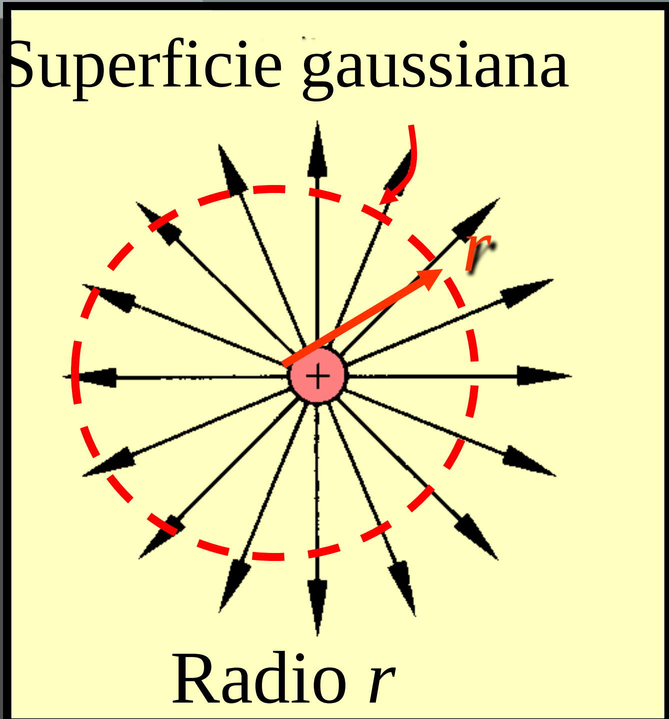


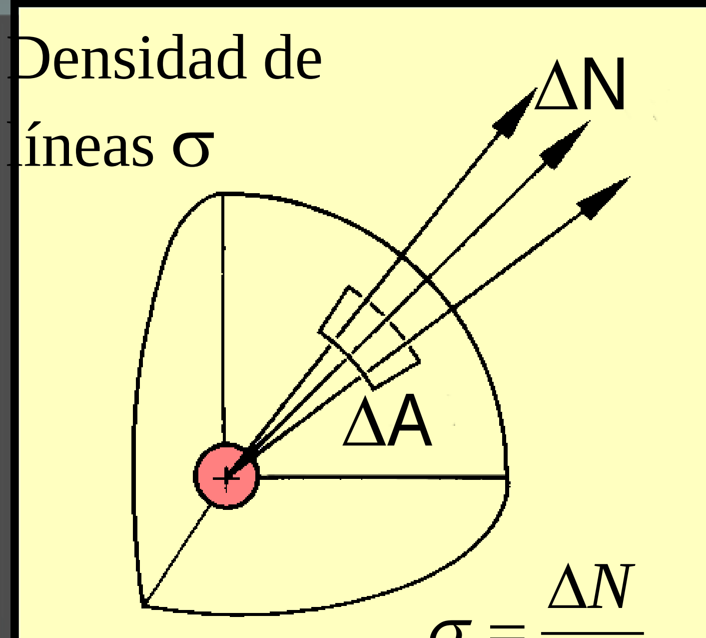
Note que las líneas salen de las cargas + y entran a las cargas -.

Además, E es más intenso donde las líneas de campo son más densas.

Densidad de las líneas de campo

<u>Ley de Gauss:</u> El campo E en cualquier punto en el espacio es proporcional a la densidad de líneas σ en dicho punto.



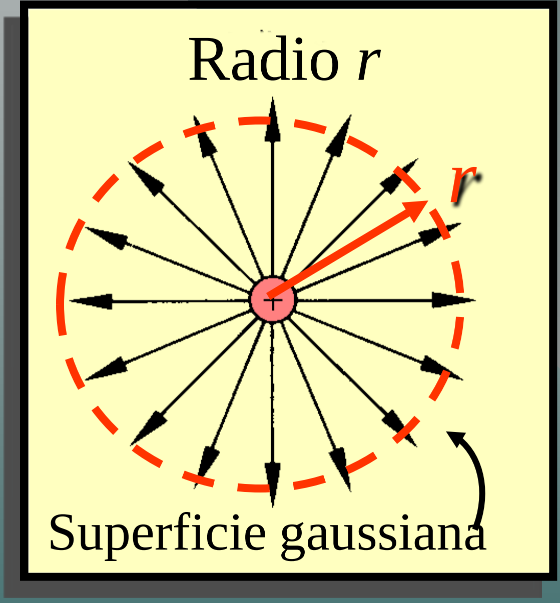


$$\sigma = \frac{\Delta N}{\Delta A}$$

Densidad de líneas y constante de espaciamiento

Considere el campo cerca de una carga positiva q:

Luego, imagine una superficie (radio r) que rodea a q.



E es proporcional a $\Delta N/\Delta A$ y es igual a kq/r^2 en cualquier punto.

$$\frac{\Delta N}{\Delta A} \propto E; \qquad \frac{kq}{r^2} = E$$

ε_0 se define como constante de espaciamiento. Entonces:

$$\frac{\Delta N}{\Delta A} = \varepsilon_0 E$$

Donde ε_0 es :

$$\boxed{\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi k}}$$

Permitividad del espacio libre

La constante de proporcionalidad para la densidad de líneas se conoce como permitividad ε_o y se define como:

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8.85 \text{ x } 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N}\cdot\text{m}^2}$$

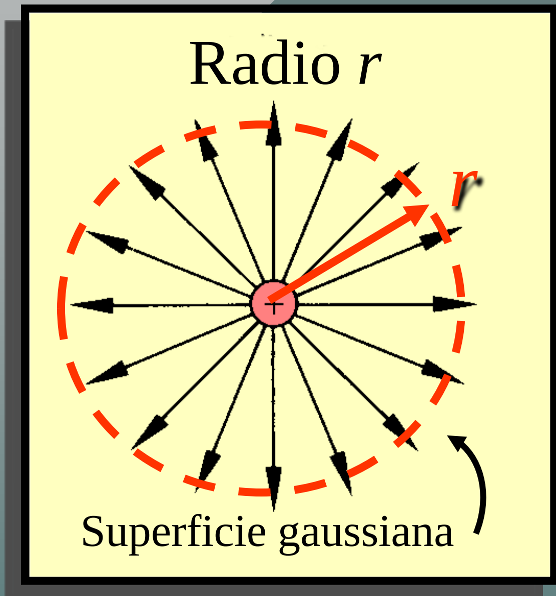
Al recordar la relación con la densidad de líneas se tiene:

$$\frac{\Delta N}{\Delta A} = \varepsilon_0 E \quad or \quad \Delta N = \varepsilon_0 E \Delta A$$

Sumar sobre toda el área A da las líneas totales como:

$$\boxed{N = \varepsilon_o EA}$$

Ejemplo 5. Escriba una ecuación para encontrar el número total de líneas *N* que salen de una sola carga positiva *q*.



Dibuje superficie gaussiana esférica:

$$\Delta N = \varepsilon_0 E \Delta A \quad \text{y} \quad N = \varepsilon_0 E A$$

Sustituya E y A de:

$$E = \frac{kq}{r^2} = \frac{q}{4\pi r^2}; \quad A = 4\pi r^2$$

$$N = \varepsilon_0 E A = \varepsilon_0 \left(\frac{q}{\cancel{4\pi r^2}} \right) (\cancel{4\pi r^2})$$

$$\boxed{N = \varepsilon_o q A = q}$$

El número total de líneas es igual a la carga encerrada q.

Ley de Gauss

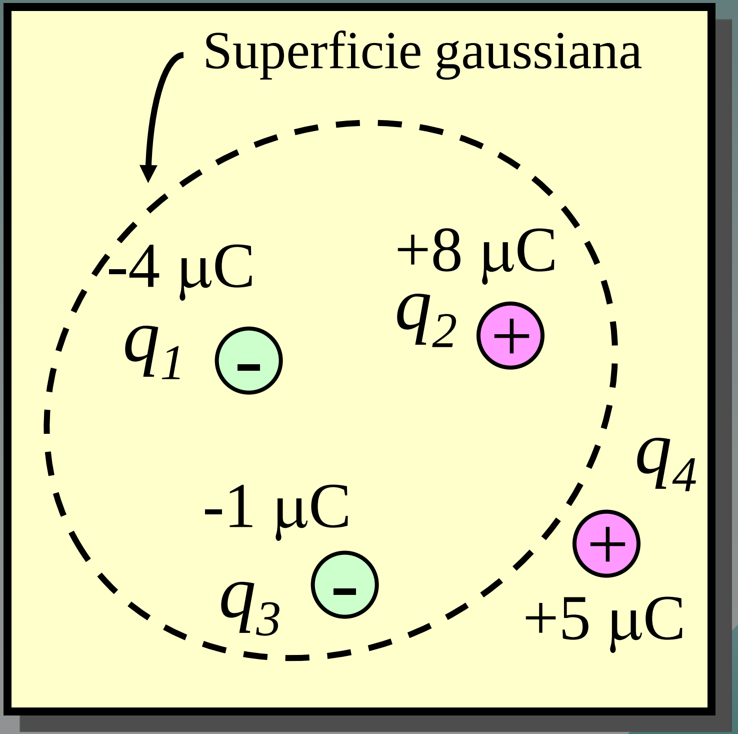
Ley de Gauss: El número neto de líneas de campo eléctrico que cruzan cualquier superficie cerrada en una dirección hacia afuera es numéricamente igual a la carga neta total dentro de dicha superficie.

$$N = \Sigma \varepsilon_0 EA = \Sigma q$$

Si q se representa como la carga positiva neta encerrada, la ley de Gauss se puede rescribir como:

$$\Sigma EA = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

Ejemplo 6. ¿Cuántas líneas de campo eléctrico pasan a través de la superficie gaussiana dibujada abajo?



Primero encuentre la carga NETA Σq encerrada por la superficie:

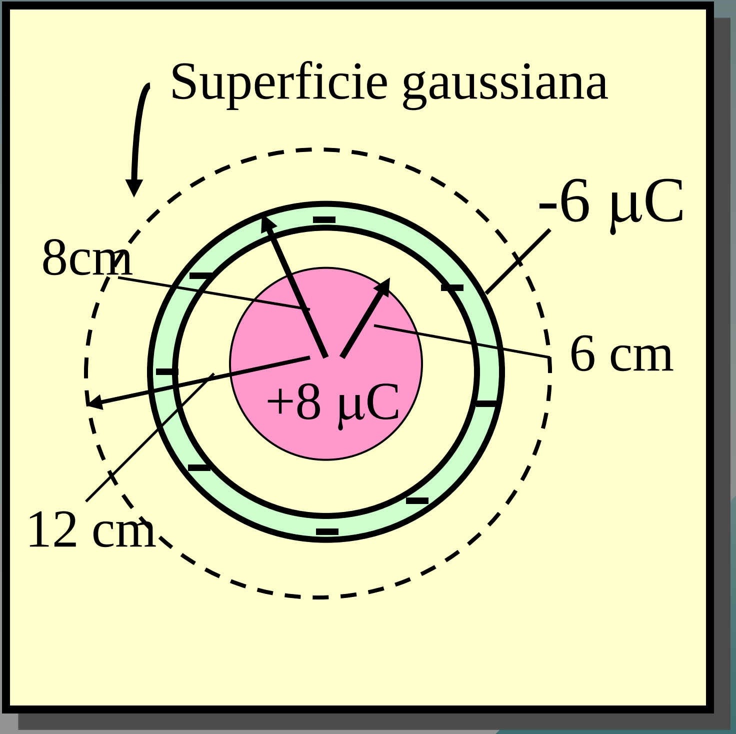
$$\Sigma q = (+8 - 4 - 1) = +3\ \mu C$$

$$N = \Sigma \varepsilon_0 EA = \Sigma q$$

N = +3 μC = +3 x 10^{-6} líneas

Ejemplo 6. Una esfera sólida (R = 6 cm) con una carga neta de +8 μC está adentro de un cascarón hueco (R = 8 cm) que tiene una carga neta de–6 μC. ¿Cuál es el campo eléctrico a una distancia de 12 cm desde el centro de la esfera sólida?

Dibuje una esfera gaussiana a un radio de 12 cm para encontrar E.



$$N = \Sigma \varepsilon_0 EA = \Sigma q$$

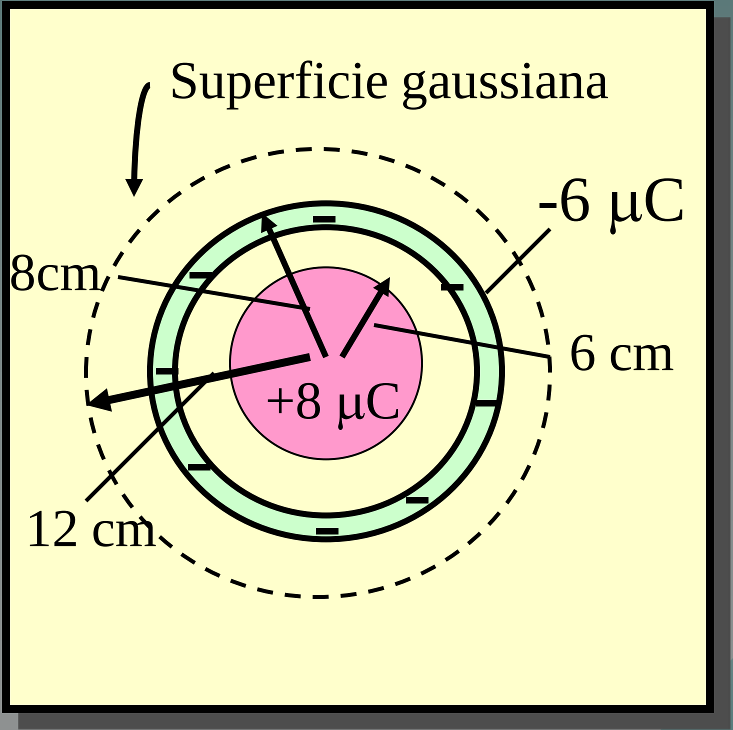
$$\Sigma q = (+8 - 6) = +2\ \mu C$$

$$\varepsilon_0 AE = q_{net}; \; E = \frac{\Sigma q}{\varepsilon_0 A}$$

$$E = \frac{\Sigma q}{\varepsilon_0 (4\pi r^2)} = \frac{+2 \times 10^{-6} C}{(8.85 \times 10^{-12}\ \frac{Nm^2}{C^2})(4\pi)(0.12\ m)^2}$$

Ejemplo 6 (Cont.) ¿Cuál es el campo eléctrico a una distancia de 12 cm desde el centro de la esfera sólida?

Dibuje una esfera gaussiana a un radio de 12 cm para encontrar E.



$$N = \Sigma \varepsilon_0 EA = \Sigma q$$

$$\Sigma q = (+8 - 6) = +2\ \mu C$$

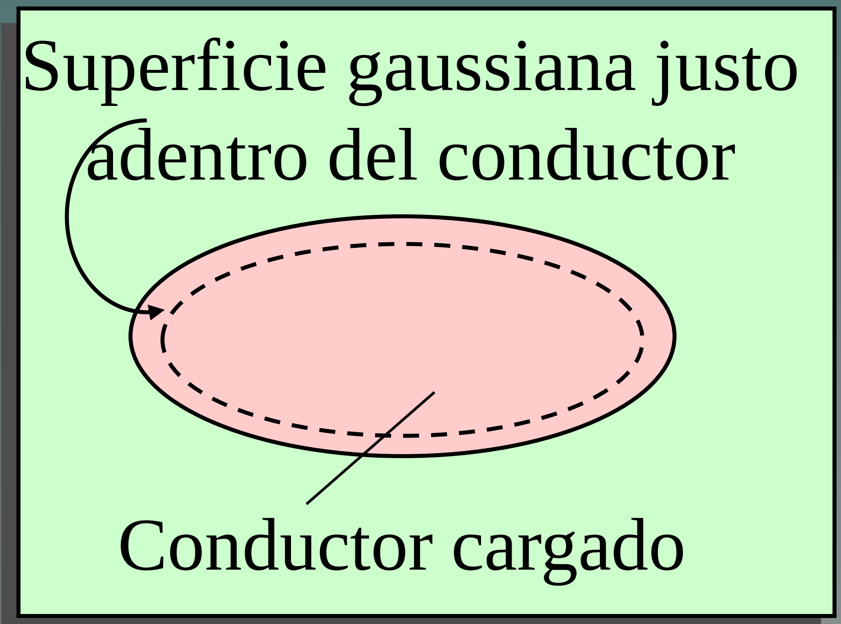
$$\varepsilon_0 AE = q_{net};\ E = \frac{\Sigma q}{\varepsilon_0 A}$$

$$E = \frac{+2\ \mu C}{\varepsilon_0 (4\pi r^2)} = 1.25 \times 10^6\ \mathrm{N/C}$$

$$\boxed{E = 1.25\ \mathrm{MN/C}}$$

Carga sobre la superficie de un conductor

Dado que cargas iguales se repelen, se esperaría que toda la carga se movería hasta llegar al reposo. Entonces, de la ley de Gauss. . .



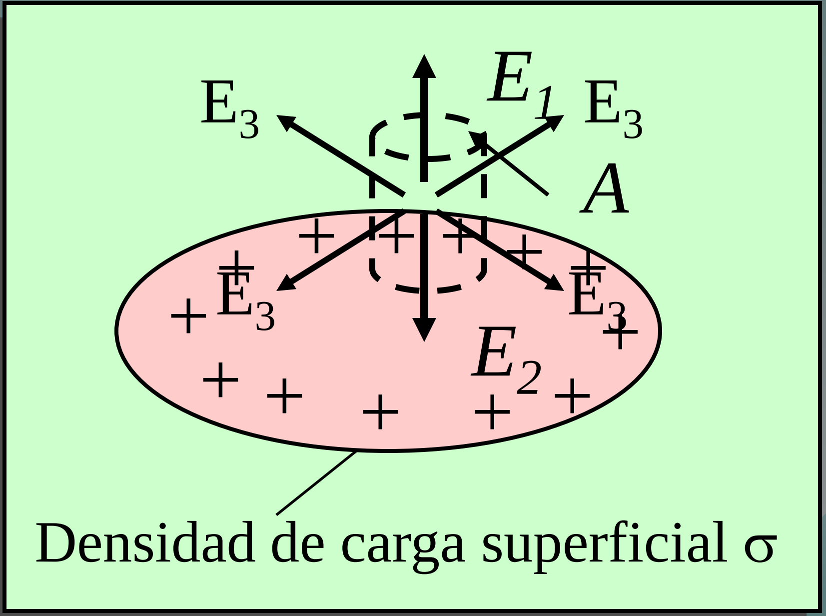
Como las cargas están en reposo, E = 0 dentro del conductor, por tanto:

$$N = \Sigma \varepsilon_0 EA = \Sigma q \quad \text{or} \quad 0 = \Sigma q$$

Toda la carga está sobre la superficie; nada dentro del conductor

Ejemplo 7. Use la ley de Gauss para encontrar el campo E justo afuera de la superficie de un conductor. Densidad de carga superficial: $\sigma = q/A$.

Considere q adentro de la caja. Las líneas de E a través de todas las áreas son hacia afuera.



$$\Sigma \varepsilon_0 AE = q$$

Las líneas de E a través de los lados se cancelan por simetría.

El campo es cero dentro del conductor, así que $E_2 = 0$

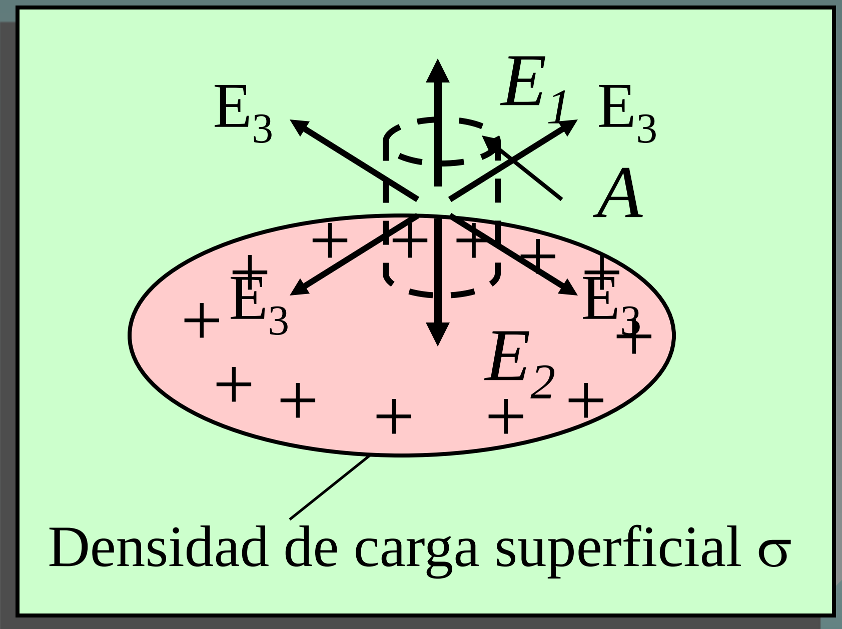
$$\varepsilon_0 E_1 A + \underbrace{\cancel{\varepsilon_0 E_2 A}}_{0} = q$$

$$\boxed{E = \frac{q}{\varepsilon_0 A} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}}$$

Ejemplo 7 (Cont.) Encuentre el campo justo afuera de la superficie si $\sigma = q/A = +2\ \mathrm{C/m^2}$.

Recuerde que los campos laterales se cancelan y el campo interior es cero, de modo que

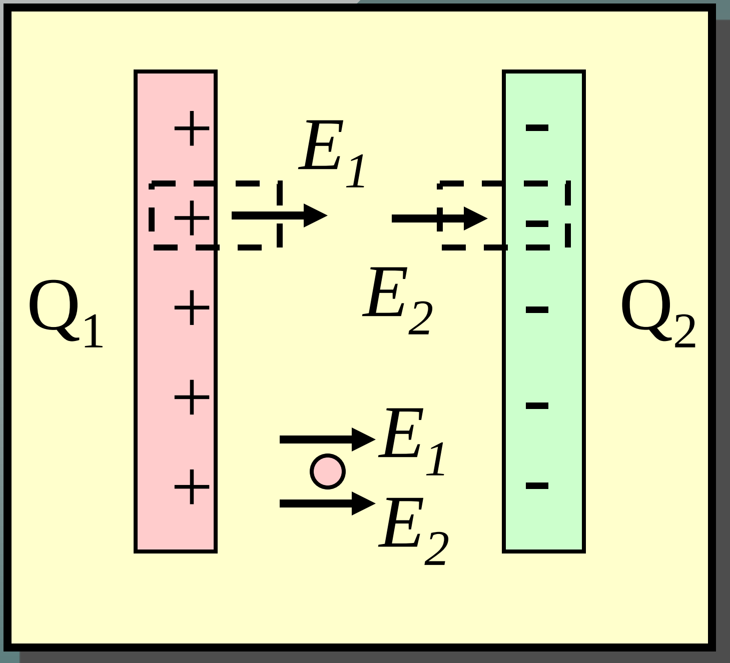
$$\boxed{E_1 = \frac{q}{\varepsilon_0 A} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}}$$



$$E = \frac{+2 \text{ x } 10^{-6}\,\mathrm{C/m^2}}{8.85 \text{ x } 10^{-12}\ \mathrm{Nm^2/C^2}}$$

$$\boxed{E = 226{,}000\ \mathrm{N/C}}$$

Campo entre placas paralelas



Cargas iguales y opuestas.

Campos E_1 y E_2 a la derecha.

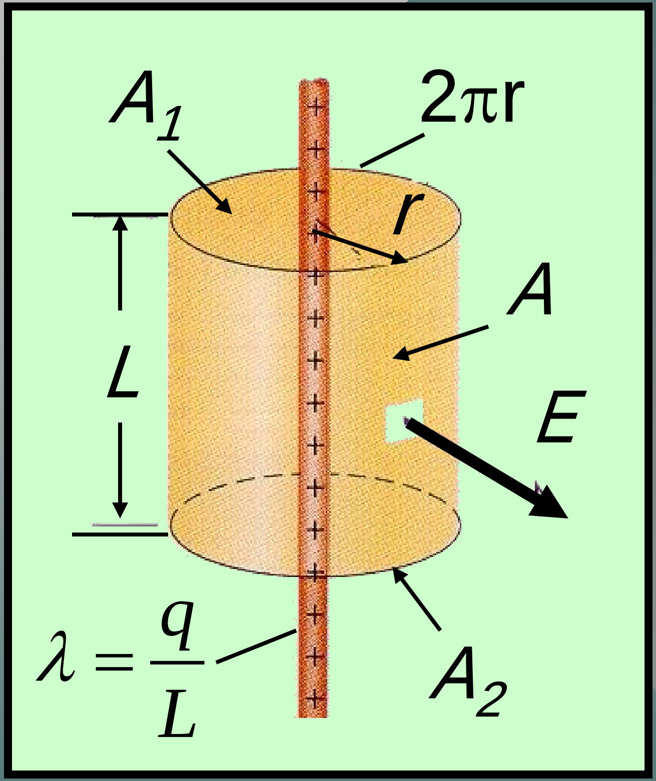
Dibuje cajas gaussianas en cada superficie interior.

La ley de Gauss para cualquier caja da el mismo campo ($E_1 = E_2$).

$$\Sigma \varepsilon_0 AE = \Sigma q$$

$$\boxed{E = \frac{q}{\varepsilon_0 A} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}}$$

Línea de carga



Los campos debidos a A_1 y A_2 se cancelan debido a simetría.

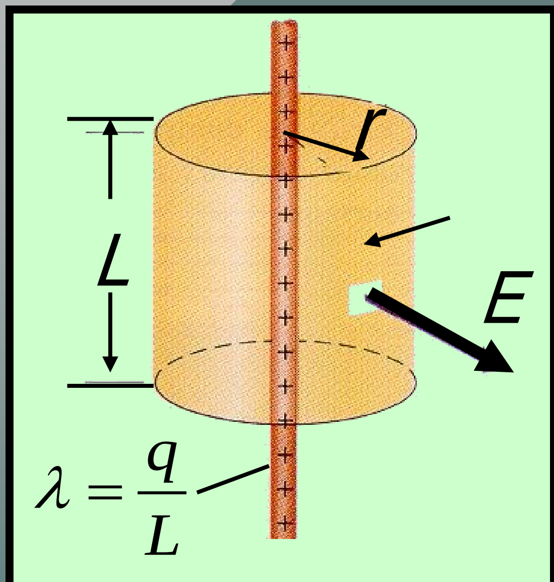
$$\Sigma \varepsilon_0 AE = q$$

$$EA = \frac{q}{\varepsilon_0}; \; A = (2\pi r)L$$

$$E = \frac{q}{2\pi\varepsilon_0 rL}; \quad \lambda = \frac{q}{L}$$

$$\boxed{E = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 r}}$$

Ejemplo 8: El campo eléctrico a una distancia de 1.5 m de una línea de carga es 5 x 10^4 N/C. ¿Cuál es la densidad lineal de la línea?



$$\boxed{E = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 r}}$$

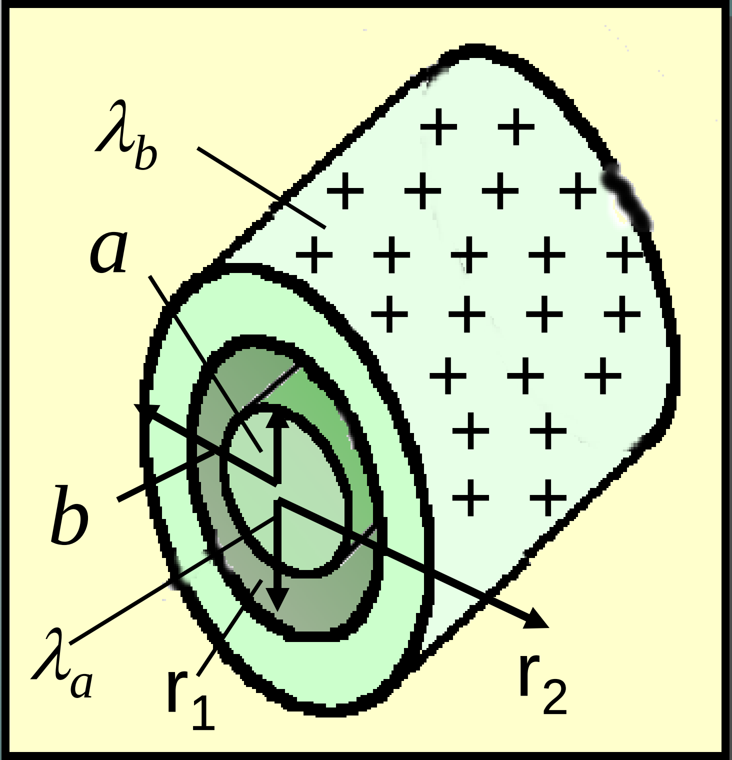
$$\lambda = 2\pi\varepsilon_0 r E$$

E = 5 x 10^4 N/C   r = 1.5 m

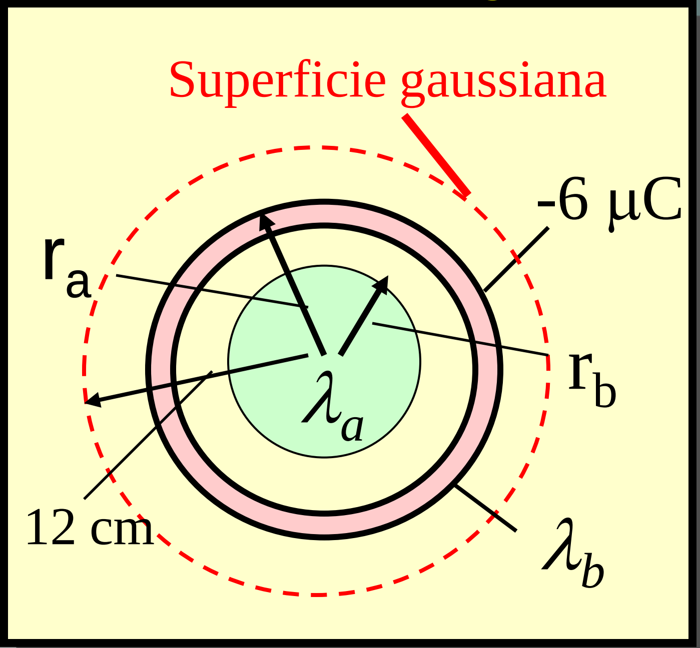
$$\lambda = 2\pi(8.85 \text{ x } 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{Nm}^2})(1.5 \text{ m})(5 \text{ x } 10^4 \text{N/C})$$

$$\boxed{\lambda = 4.17\ \mu\text{C/m}}$$

Cilindros concéntricos



Afuera es como un largo alambre cargado:



Para $r > r_b$

$$E = \frac{\lambda_a + \lambda_b}{2\pi\varepsilon_0 r}$$

Para $r_b > r > r_a$

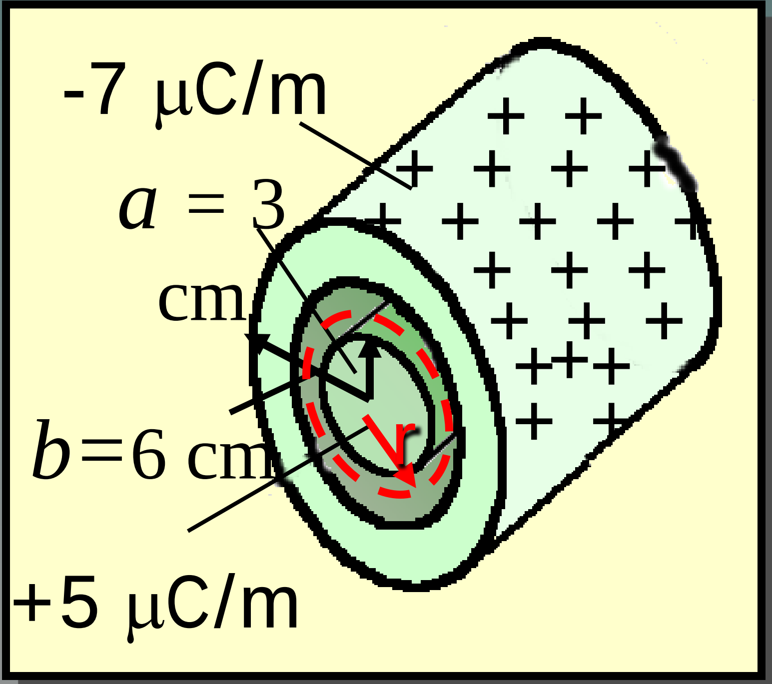
$$E = \frac{\lambda_a}{2\pi\varepsilon_0 r}$$

Ejemplo 9. Dos cilindros concéntricos de radios 3 y 6 cm. La densidad de carga lineal interior es de +3 μC/m y la exterior es de -5 μC/m. Encuentre E a una distancia de 4 cm desde el centro.

Dibuje una superficie gaussiana entre los cilindros.

$$E = \frac{\lambda_b}{2\pi\varepsilon_0 r}$$

$$E = \frac{+3\mu\text{C/m}}{2\pi\varepsilon_0(0.04\text{ m})}$$



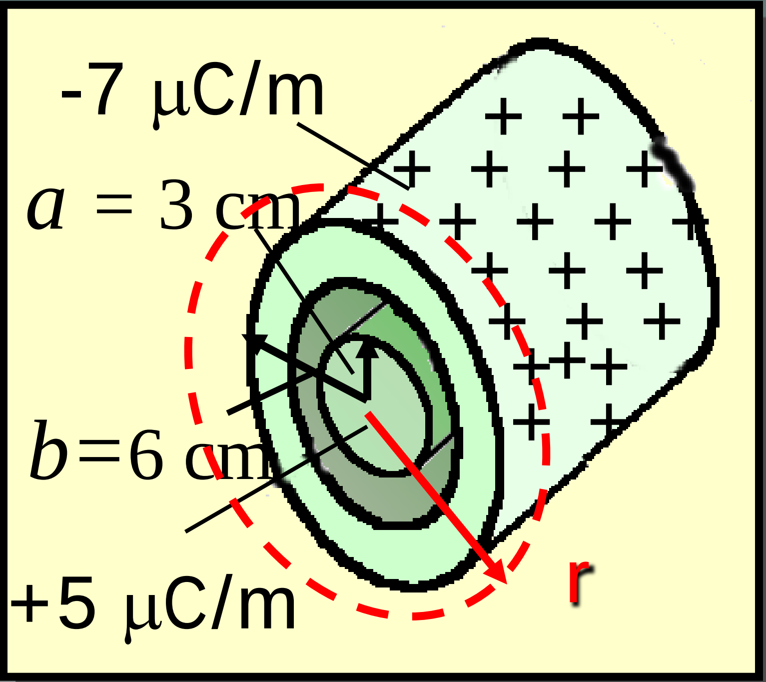
E = 1.38 x 10^6 N/C, radialmente hacia afuera

Ejemplo 8 (Cont.) A continuación, encuentre E a una distancia de 7.5 cm desde el centro (afuera de ambos cilindros)

Gaussiana afuera de ambos cilindros.

$$E = \frac{\lambda_a + \lambda_b}{2\pi\varepsilon_0 r}$$

$$E = \frac{(+3-5)\mu\text{C/m}}{2\pi\varepsilon_0(0.075\text{ m})}$$



E = 5.00 x 10^5 N/C, radialmente hacia adentro

Resumen de fórmulas

Intensidad de campo eléctrico *E*:

$$E = \frac{F}{q} = \frac{kQ}{r^2} \qquad \text{Unidades} \quad \frac{N}{C}$$

Campo eléctrico cerca de muchas cargas:

$$E = \sum \frac{kQ}{r^2} \qquad \text{Suma vectorial}$$

Ley de Gauss para distribuciones de carga.

$$\Sigma \varepsilon_0 EA = \Sigma q; \qquad \sigma = \frac{q}{A}$$

CONCLUSIÓN: Capítulo 24
El campo eléctrico

Tema EM1- CAMPO ELÉCTRICO

1 Introducción.

2 Carga eléctrica.

3 Ley de Coulomb.

4 Campo eléctrico y principio de superposición.

5 Líneas de campo eléctrico.

6 Flujo eléctrico.

7 Teorema de Gauss. Aplicaciones.

Bibliografía

-Tipler. "Física". Cap. 18 y 19. Reverté.

-Gettys; Keller; Skove. "Física clásica y moderna". Cap. 20 y 21. McGraw-Hill.

-Serway. "Física". Cap. 23 y 24. McGraw-Hill.

1. INTRODUCCIÓN HISTÓRICA

- ✓Gilbert (1540-1603) descubrió que la electrificación era un fenómeno de carácter general.

- ✓En 1729, Stephen Gray demuestra que la electricidad tiene existencia por sí misma y no es una propiedad impuesta al cuerpo por rozamiento.

- ✓Franklin (1706-1790) demuestra que existen dos tipos de electricidad a las que llamó **positiva** y **negativa**.

- ✓Coulomb (1736-1806) encontró la ley que expresa la fuerza que aparece entre cargas eléctricas.

- ✓En 1820 Oersted observó una relación entre electricidad y magnetismo consistente en que cuando colocaba la aguja de una brújula cerca de un alambre por el que circulaba corriente, ésta experimentaba una desviación. Así nació el **Electromagnetismo**.

- ✓Faraday (1791-1867) introdujo el concepto de **Campo Eléctrico**.

- ✓Maxwell (1831-1879) estableció las **Leyes del Electromagnetismo**, las cuales juegan el mismo papel en éste área que las Leyes de Newton en Mecánica.

2. CARGA ELÉCTRICA

Es una magnitud fundamental de la física, responsable de la interacción electromagnética.

En el S.I. La unidad de carga es el **Culombio (C)** que se define como la cantidad de carga que fluye por un punto de un conductor en un segundo cuando la corriente en el mismo es de 1 A.

Submúltiplos del Culombio

$$\begin{cases} 1\ nC = 10^{-9}\ C \\ 1\ \mu C = 10^{-6}\ C \\ 1\ mC = 10^{-3}\ C \end{cases}$$

➢Características de la carga

i) **Dualidad de la carga:** Todas las partículas cargadas pueden dividirse en positivas y negativas, de forma que las de un mismo signo se repelen mientras que las de signo contrario se atraen.

ii) **Conservación de la carga:** En cualquier proceso físico, la carga total de un sistema aislado se conserva. Es decir, la suma algebraica de cargas positivas y negativas presente en cierto instante no varía.

iii) **Cuantización de la carga:** La carga eléctrica siempre se presenta como un múltiplo entero de una carga fundamental, que es la del electrón.

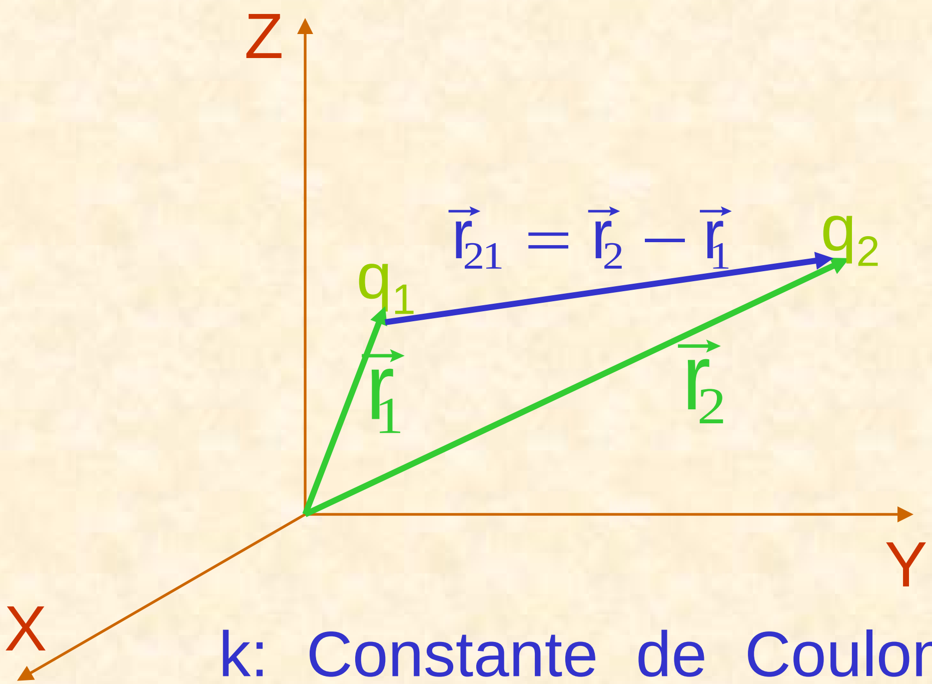
3. LEY DE COULOMB

A lo largo de este tema estudiaremos procesos en los que la carga no varía con el tiempo. En estas condiciones se dice que el sistema está en **Equilibrio Electrostático**.

Enunciado de la Ley de Coulomb

La fuerza ejercida por una carga puntual sobre otra está dirigida a lo largo de la línea que las une. Es repulsiva si las cargas tienen el mismo signo y atractiva si tienen signos opuestos. La fuerza varía inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que separa las cargas y es proporcional al valor de cada una de ellas.

➢Expresión vectorial de la Ley de Coulomb



$$\vec{F}_{12} = k\,\frac{q_1 q_2}{r_{12}^2}\,\vec{u}_r$$

k: Constante de Coulomb, cuyo valor depende del sistema de unidades y del medio en el que trabajemos.

En el vacío

- S.I. $\longrightarrow$ $k = 9 \cdot 10^9$ N m^2/C^2
- C.G.S. $\longrightarrow$ $k = 1$ dyna $cm^2/u.e.e^2$

$1\ C = 3 \cdot 10^9$ u.e.e.

Constantes auxiliares

Permitividad del Vacío (ε_o): Se define de forma que

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}$$

$$\varepsilon_o = 8.85\cdot 10^{-12}\ C^2/N\ m^2$$

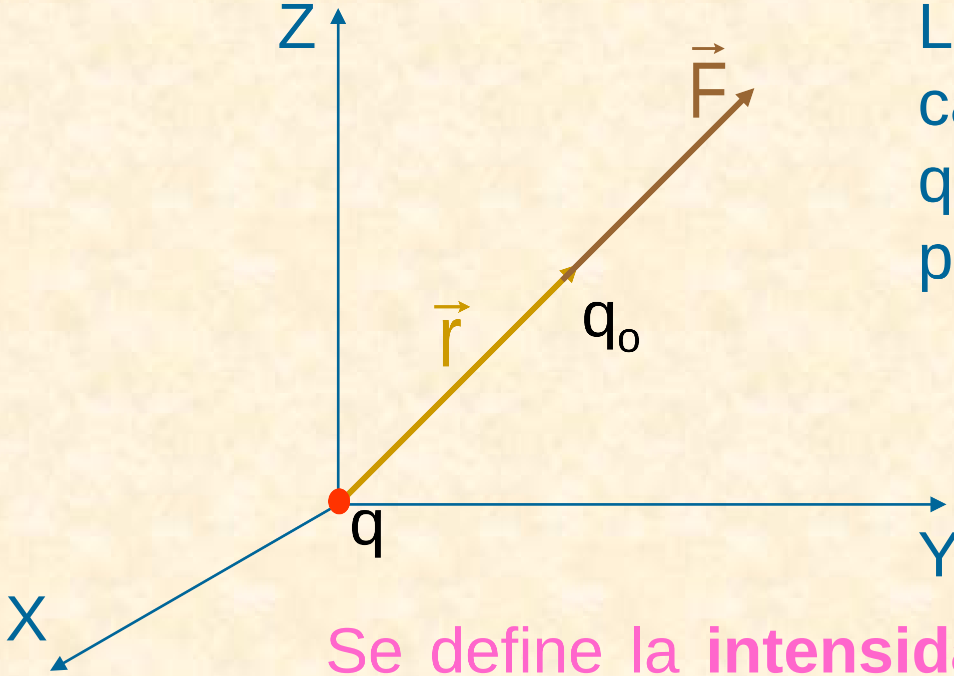
Si el medio en el que se encuentran las cargas es distinto al vacío, se comprueba que la fuerza eléctrica es **κ** veces menor, de esta forma se define la **Permitividad del Medio** como $\varepsilon = \kappa\ \varepsilon_o$. Siendo **$\kappa$** la **Constante Dieléctrica del Medio** Así,

$$k' = \frac{1}{4\pi\varepsilon}$$

4. CAMPO ELÉCTRICO. PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN

La interacción entre cargas eléctricas no se produce de manera instantánea. El intermediario de la fuerza mutua que aparece entre dos cargas eléctricas es el **Campo Eléctrico**.

La forma de determinar si en una cierta región del espacio existe un campo eléctrico, consiste en colocar en dicha región una **carga de prueba, q_o** (carga positiva puntual) y comprobar la fuerza que experimenta.



La fuerza eléctrica entre la carga q y la carga de prueba q_o es repulsiva, y viene dada por

$$\vec{F}_{qq_o} = k\frac{qq_o}{r_{12}^2}\vec{u}_r$$

Se define la **intensidad de campo eléctrico** en un punto como la fuerza por unidad de carga positiva en ese punto.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_o} \Longrightarrow \vec{E} = k\frac{q}{r^2}\vec{u}_r$$

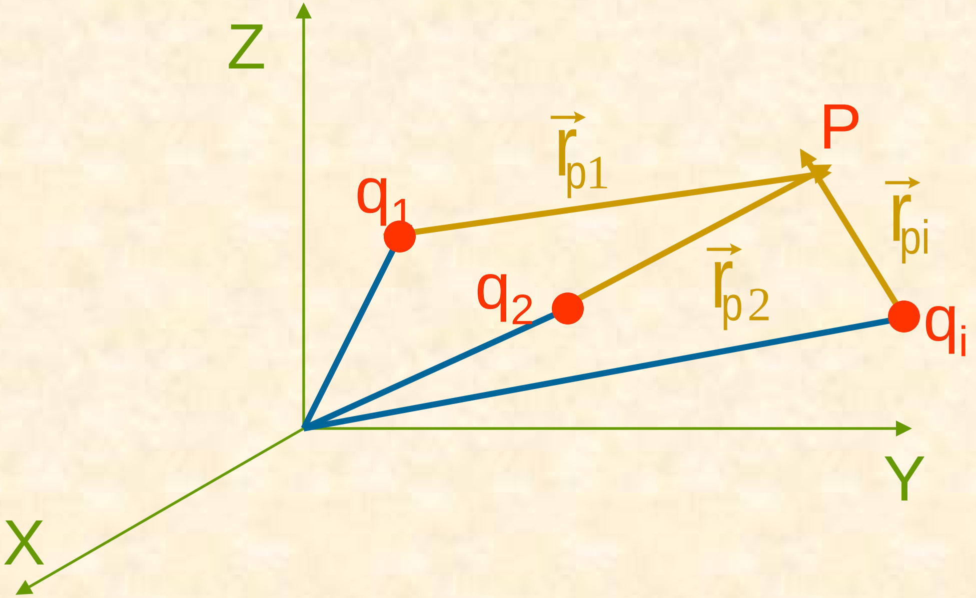
La dirección y sentido del campo eléctrico coincide con el de la fuerza eléctrica.

PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN

A la hora de aplicar el principio de superposición debemos tener en cuenta dos casos:

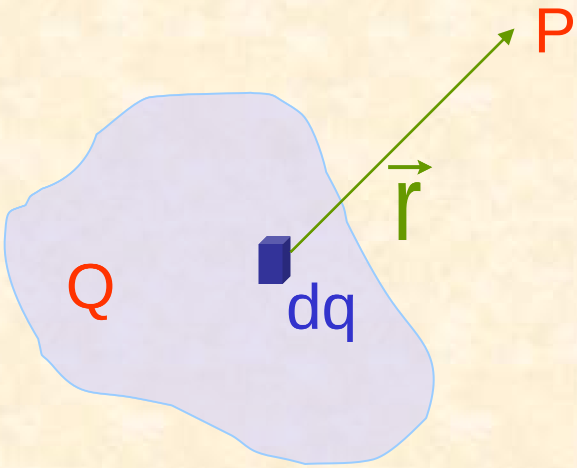
I) Campo eléctrico creado por una distribución discreta de carga en un punto:

En este caso se calcula el campo eléctrico sumando vectorialmente los campos eléctricos creados por cada una de las cargas puntuales en el punto elegido.



$$\vec{E} = \sum_i k \frac{q_i}{r_{pi}^2} \vec{u}_r$$

II) Campo eléctrico creado por una distribución continua de carga en un punto:



En este caso dividimos la distribución en pequeños elementos diferenciales de carga, dq, de forma que la diferencial de campo eléctrico que crea cada una de ellas es

$$d\vec{E} = k\frac{dq}{r^2}\vec{u}_r$$

El campo eléctrico total para toda la distribución será

$$\vec{E} = \int k\frac{dq}{r^2}\vec{u}_r$$

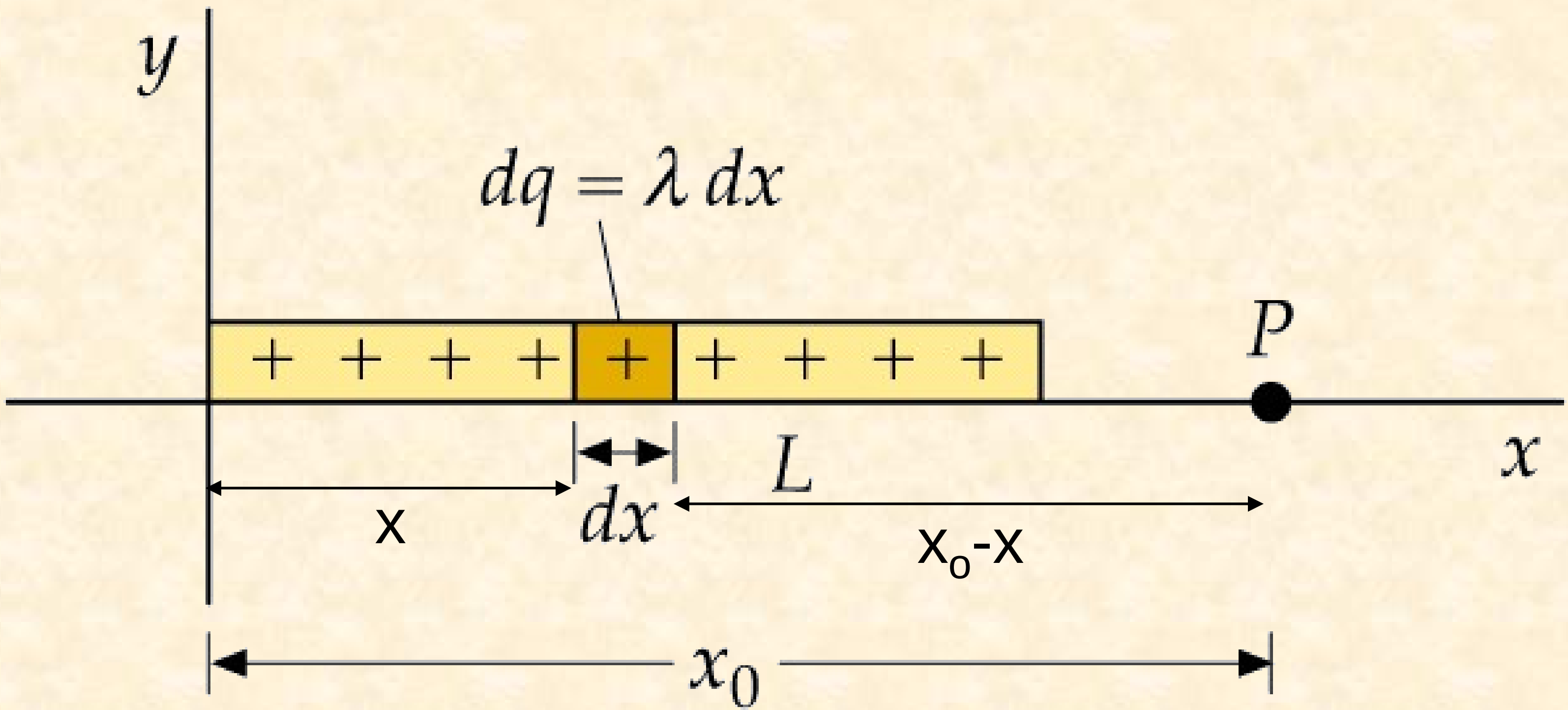
Dependiendo de la forma de la distribución, se definen las siguientes distribuciones de carga

Lineal	Superficial	Volumétrica
$\lambda = \frac{dq}{dl}$	$\sigma = \frac{dq}{ds}$	$\rho = \frac{dq}{dv}$

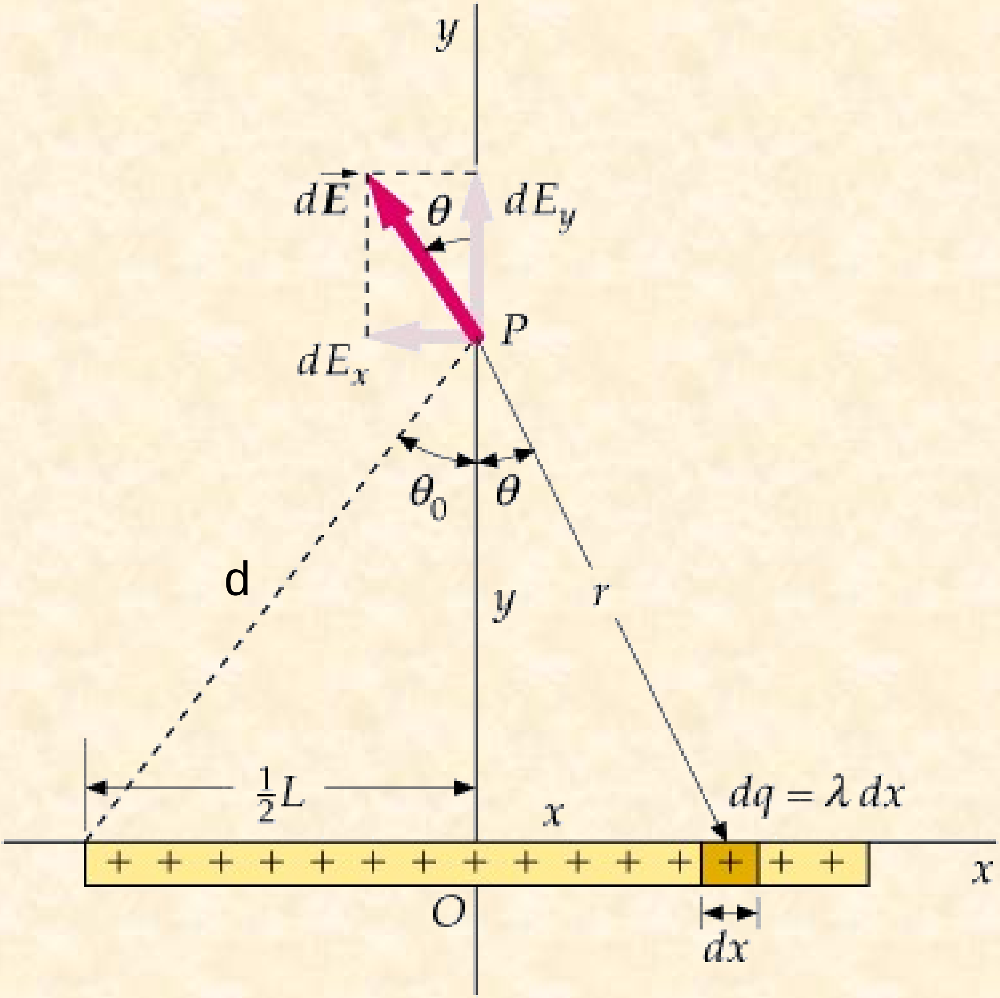
Cálculo del campo eléctrico en cada caso:

$$\vec{E} = \int_L k\,\lambda\,\frac{dl}{r^2}\,\vec{u}_r \qquad \vec{E} = \int_S k\,\sigma\,\frac{ds}{r^2}\,\vec{u}_r \qquad \vec{E} = \int_V k\,\rho\,\frac{dv}{r^2}\,\vec{u}_r$$

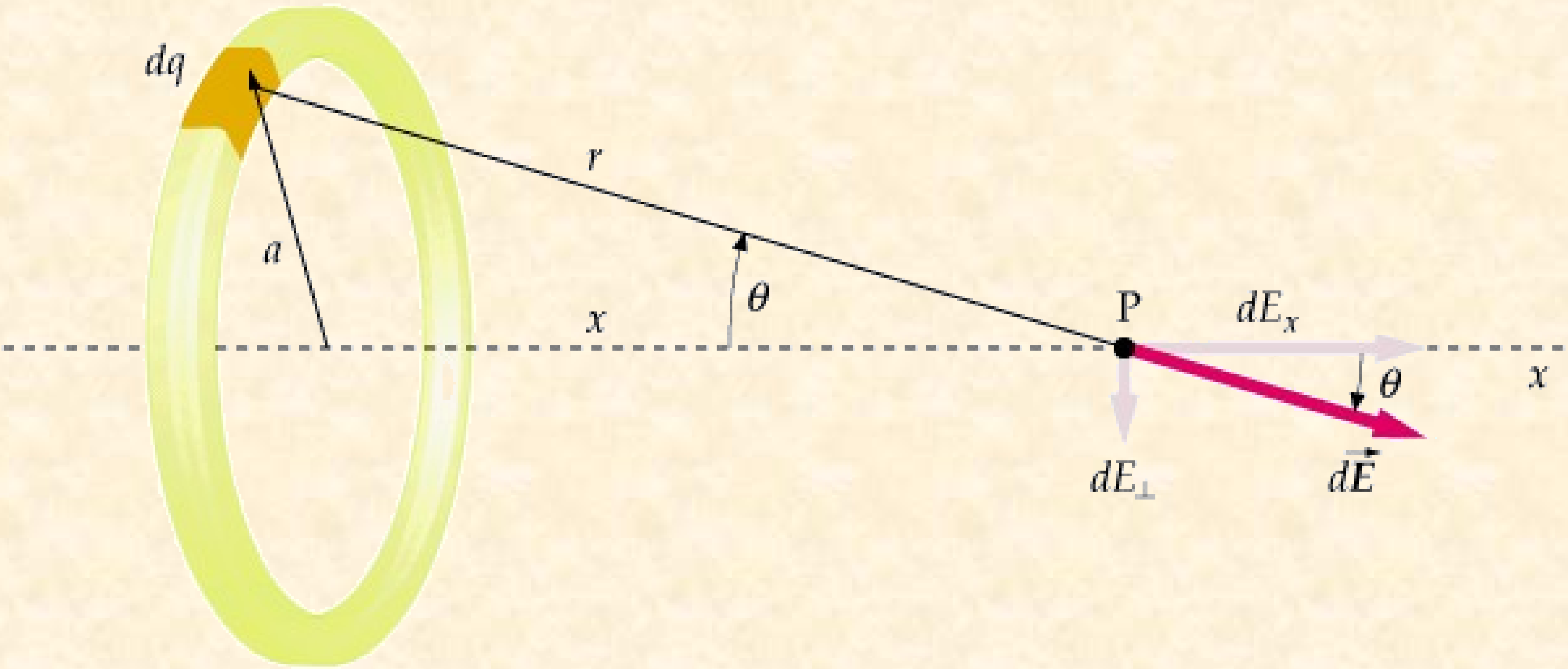
Ejemplo 1: Campo eléctrico sobre el eje de una carga lineal finita.



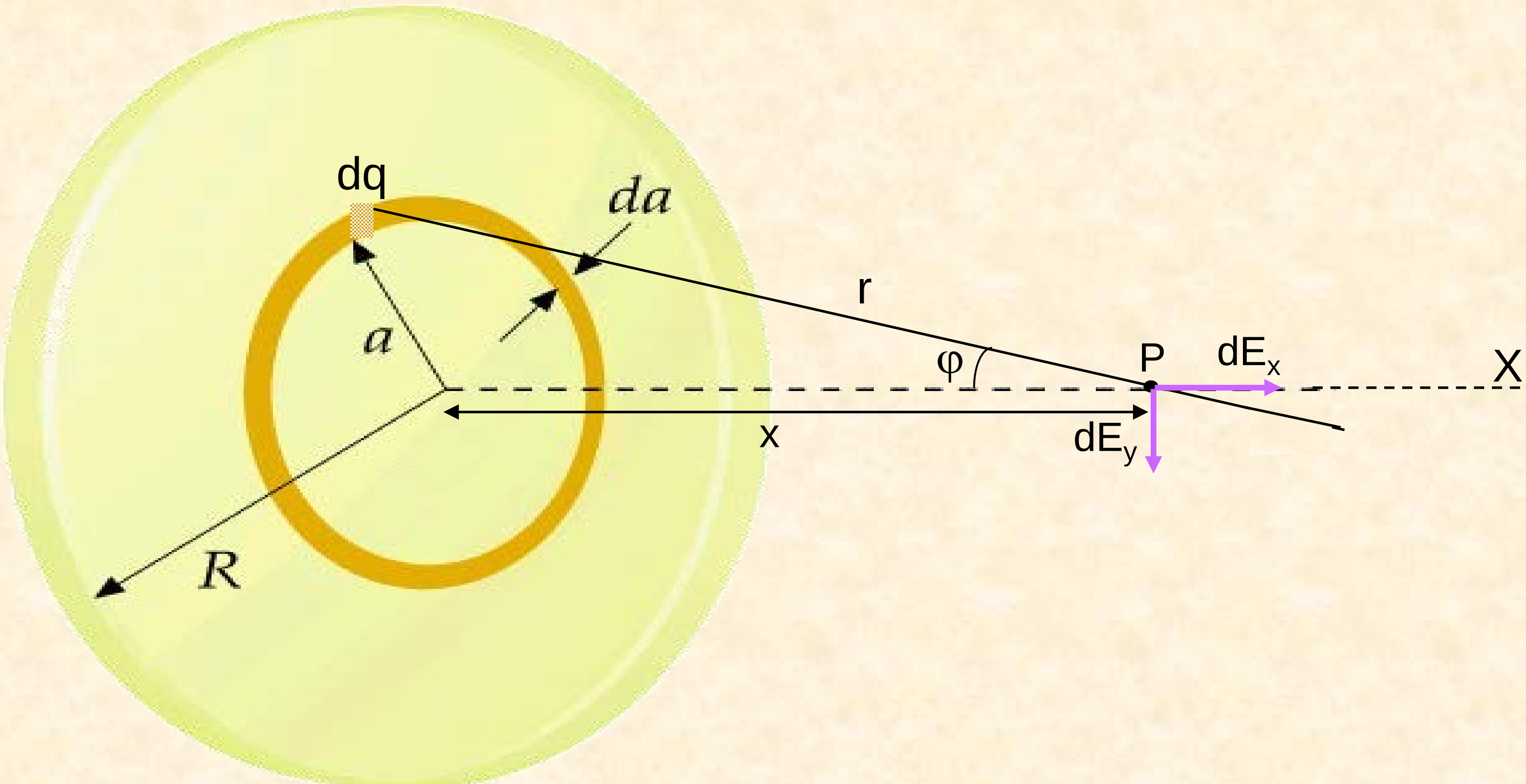
Ejemplo 2: Campo eléctrico fuera del eje de una carga lineal finita.



Ejemplo 3: Campo eléctrico creado por una distribución uniforme de carga ● en forma de anillo de radio a, en un punto de su eje.



Ejemplo 4: Campo eléctrico creado por una distribución uniforme de carga ♦ en forma de disco de radio R, en un punto de su eje.



5. LÍNEAS DE CAMPO ELÉCTRICO

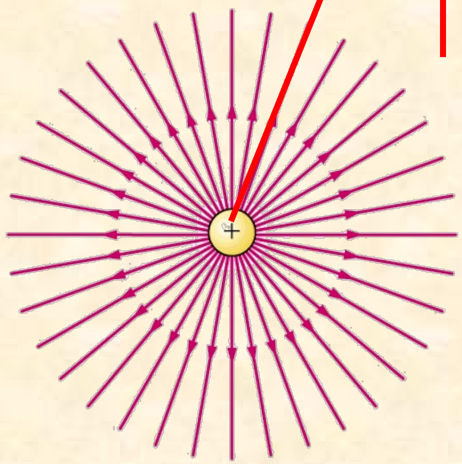
Las líneas de campo se dibujan de forma que el vector $\vec{E}$ sea tangente a ellas en cada punto. Además su sentido debe coincidir con el de dicho vector.

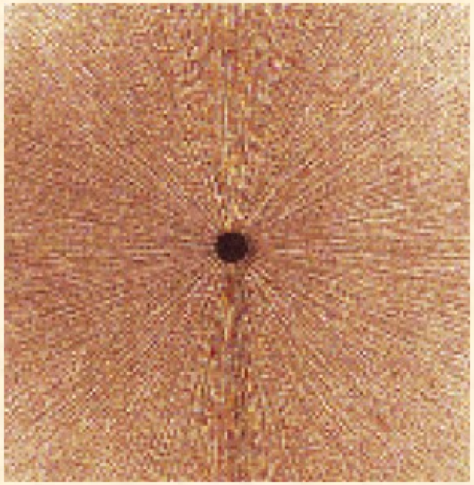
- Reglas para dibujar las líneas de campo

- Las líneas salen de las cargas positivas y entran en las negativas.
- El número de líneas que entran o salen es proporcional al valor de la carga.
- Las líneas se dibujan simétricamente.
- Las líneas empiezan o terminan sólo en las cargas puntuales.
- La densidad de líneas es proporcional al valor del campo eléctrico.
- Nunca pueden cortarse dos líneas de campo.

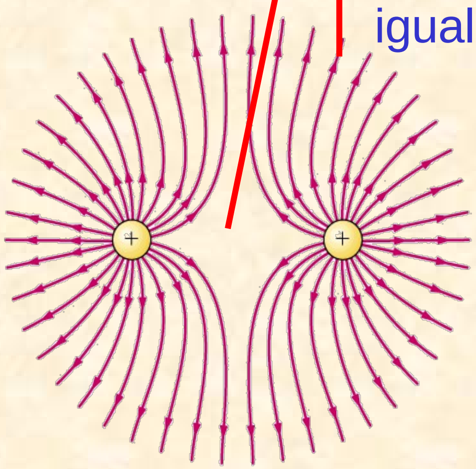
EJEMPLOS DE LÍNEAS DE CAMPO ELÉCTRICO

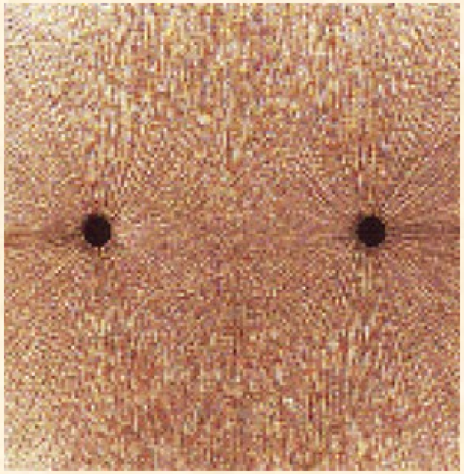
Carga puntual

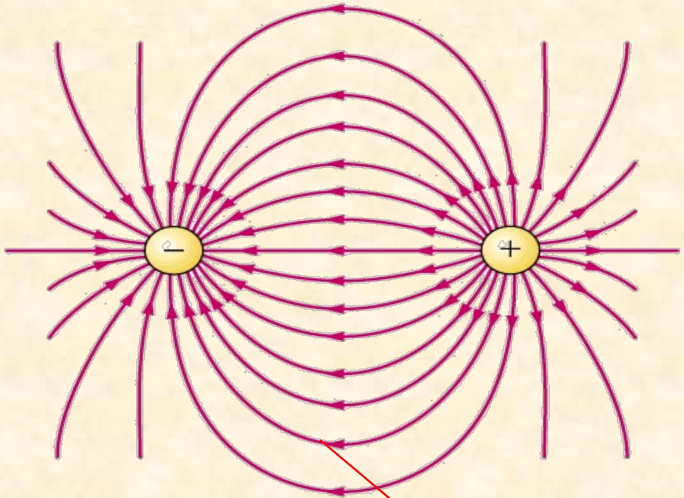


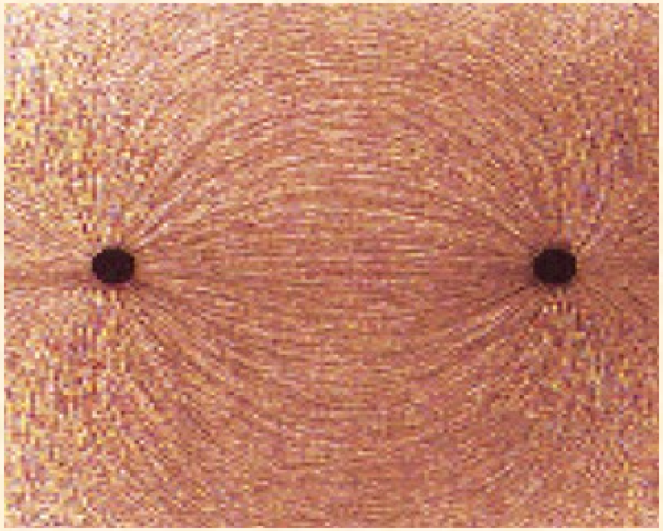


Dos cargas iguales

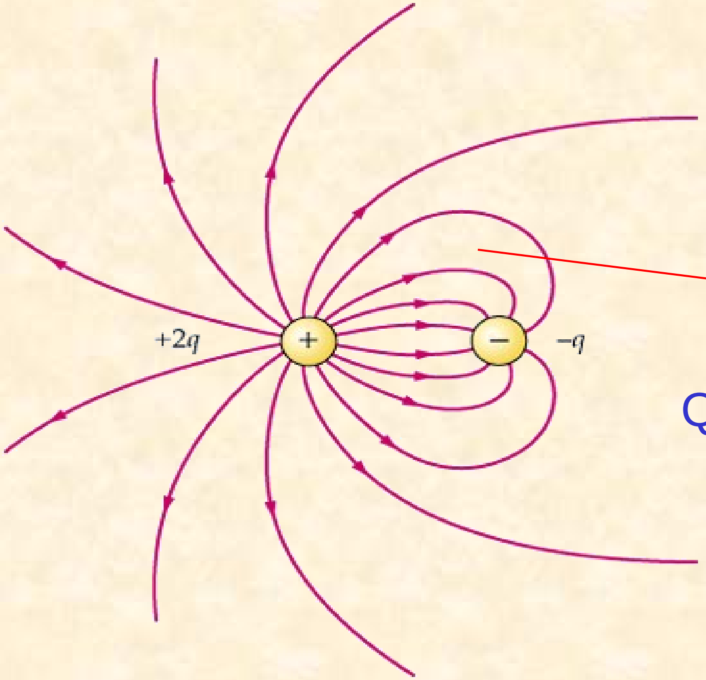








Dipolo eléctrico

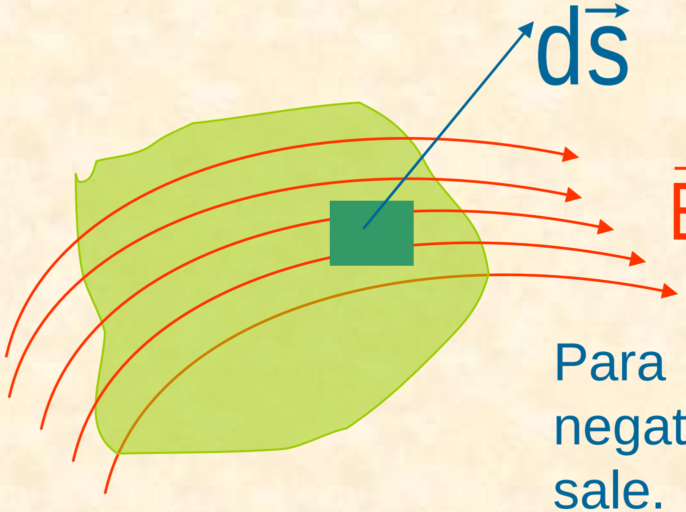


Q(-)=2Q(+)

Más ejemplos

6. FLUJO ELÉCTRICO

El flujo eléctrico da idea del número de líneas de campo que atraviesa cierta superficie. Si la superficie considerada encierra una carga, el número de líneas que atraviesa dicha superficie será proporcional a la carga neta.

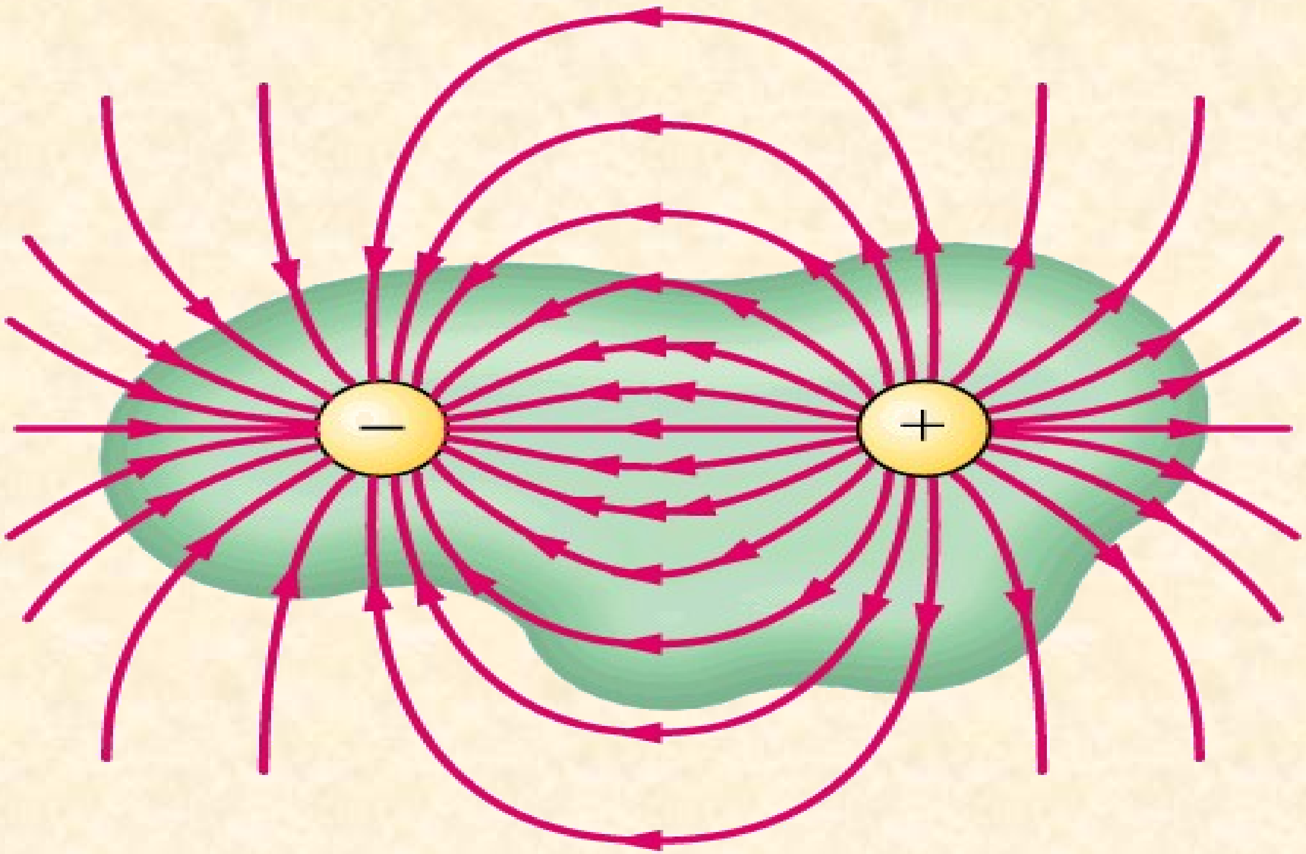


$$\Phi = \int_S \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

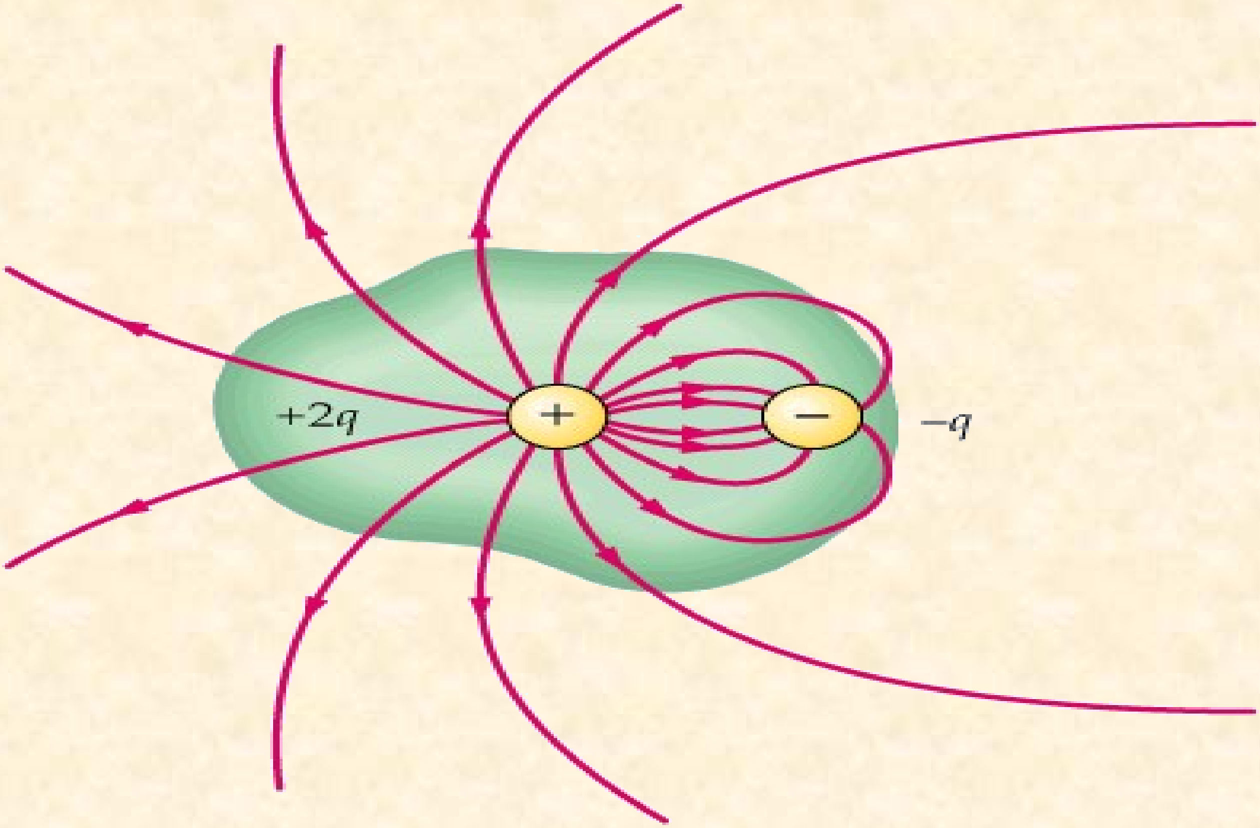
Para una superficie cerrada el flujo será negativo si la línea de campo entra y positivo si sale. En general, el flujo neto para una superficie cerrada será

$$\Phi = \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

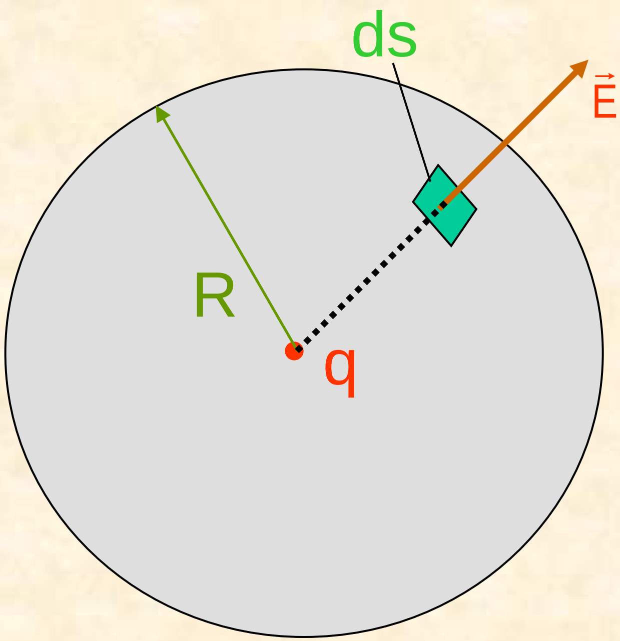
Dipolo eléctrico encerrado en una superficie de forma arbitraria



Superficie de forma arbitraria que incluye las cargas +2q y –q.



Ejemplo 1.- *Una carga puntual q está situada en el centro de una superficie esférica de radio R. Calcula el flujo neto de campo eléctrico a través de dicha superficie.*



El campo eléctrico creado por una carga puntual viene dado por

$$\vec{E} = k\frac{q}{r^2}\vec{u}_r$$

En la superficie de la esfera se cumple que r = R, luego

$$\vec{E} = k\frac{q}{R^2}\vec{u}_r$$

Para calcular el flujo a través de la superficie esférica, tenemos en cuenta que el campo eléctrico es paralelo al vector superficie en cada punto, por lo tanto

$$\Phi = \oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \oint k \frac{q}{R^2} ds = k \frac{q}{R^2} \oint ds$$

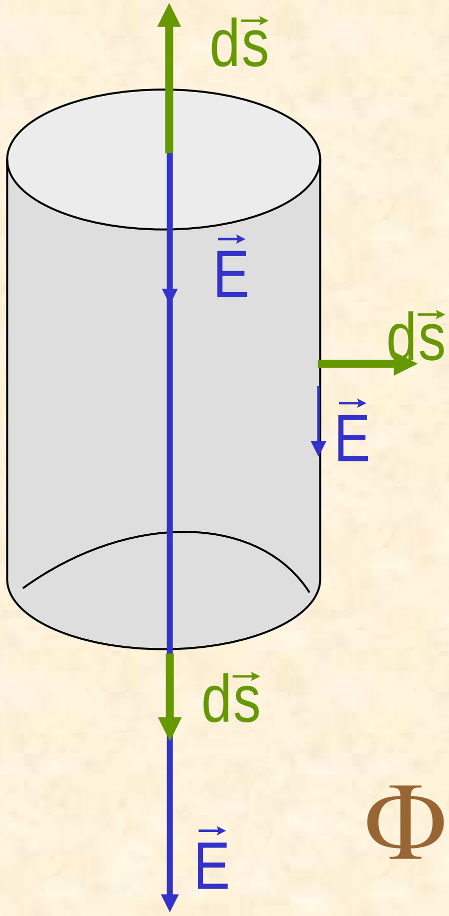
El área de una superficie esférica viene dada por $S = 4\pi R^2$, luego

$$\Phi = \frac{kq}{R^2} 4\pi R^2$$

Flujo total $$\Phi = 4\pi k q$$

Independiente de R

Ejemplo 2.- *Supongamos un cilindro de radio R colocado en el seno de un campo eléctrico uniforme con su eje paralelo al campo. Calcula el flujo de campo eléctrico a través de la superficie cerrada.*



El flujo total es la suma de tres términos, dos que corresponden a las bases (b1 y b2) mas el que corresponde a la superficie cilíndrica. En ésta última el flujo es cero ya que los vectores superficie y campo son perpendiculares. Así

$$\Phi = \int_{b1} \vec{E} \cdot d\vec{s} + \int_{b2} \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

$$\Phi = \int E\, ds \cos\pi + \int E\, ds \cos 0$$

$$\Phi = 0$$

El flujo sólo es proporcional a la carga que encierra una superficie, no a la forma de dicha superficie.

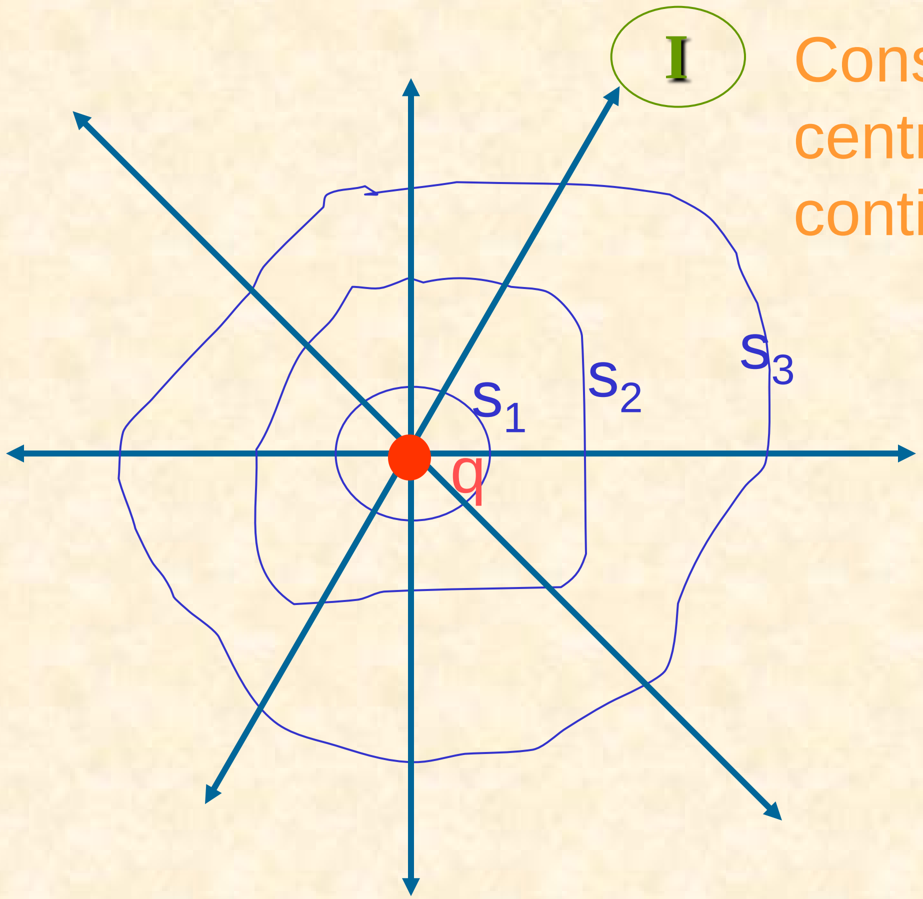
7. TEOREMA DE GAUSS

Este teorema da una relación general entre el flujo de campo eléctrico a través de una superficie cerrada y la carga encerrada por ella.

Ya hemos visto que el flujo neto a través de una superficie esférica viene dado por

$$\Phi = 4\pi k q$$

Vamos a comprobar que este flujo es independiente de la forma de la distribución. Sólo depende de la carga que haya en el interior.



Consideremos varias superficies centradas en una esférica que contiene una carga q.

El flujo a través de la superficie esférica es

$$\Phi = 4\pi k q = \frac{q}{\varepsilon_o}$$

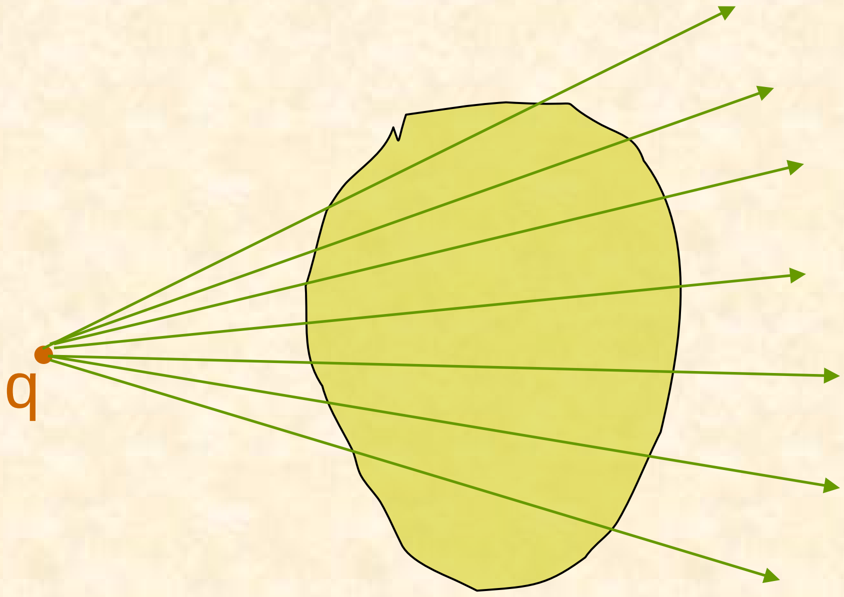
Como el número de líneas que atraviesan las tres superficies es el mismo, se cumple que

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3$$

Por lo tanto el flujo es independiente de la forma de la superficie.

II

Supongamos ahora una carga q próxima a una superficie cerrada de forma arbitraria. En este caso el número neto de líneas de campo que atraviesa la superficie es cero (entran el mismo número de líneas que salen), por lo tanto



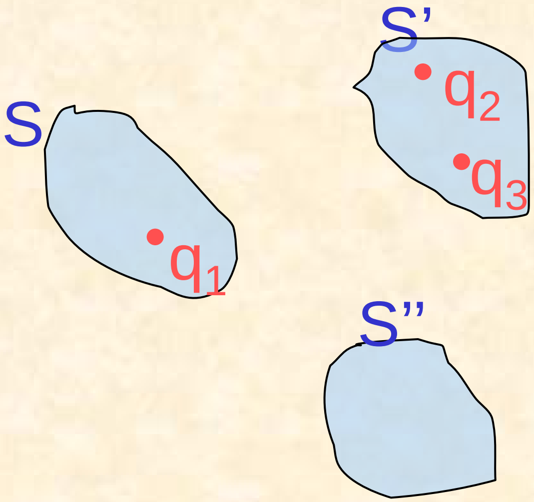
$$\Phi = 0$$

El flujo a través de una superficie que no encierra carga es nulo.

✓Generalización de los resultados

Para distribuciones de carga, ya sean discretas o continuas, podemos aplicar el principio de superposición.

Ejemplo:



$$\Phi(S) = \frac{q_1}{\varepsilon_o}$$

$$\Phi(S') = \frac{(q_2 + q_3)}{\varepsilon_o}$$

$$\Phi(S'') = 0$$

$$\Phi = \oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{q_{int}}{\varepsilon_o}$$

➢Enunciado del Teorema de Gauss

El flujo eléctrico neto a través de cualquier superficie gaussiana cerrada es igual a la carga neta que se encuentre dentro de ella, dividida por la permitividad del vacío.

Esta ley sólo puede aplicarse a problemas con gran simetría.

▪Procedimiento para aplicar el teorema de Gauss

Dada una distribución de carga, buscar una superficie gaussiana que cumpla estas condiciones

$\vec{E}$ paralelo a $d\vec{s}$

$\vec{E}$ constante

en todos los puntos de la superficie

El flujo eléctrico a través de una superficie cerrada viene dado por

$$\Phi = \oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{q_{int}}{\varepsilon_o}$$

Si la superficie cerrada gaussiana cumple las dos condiciones anteriores

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \oint E\, ds = E \oint ds = E\, s$$

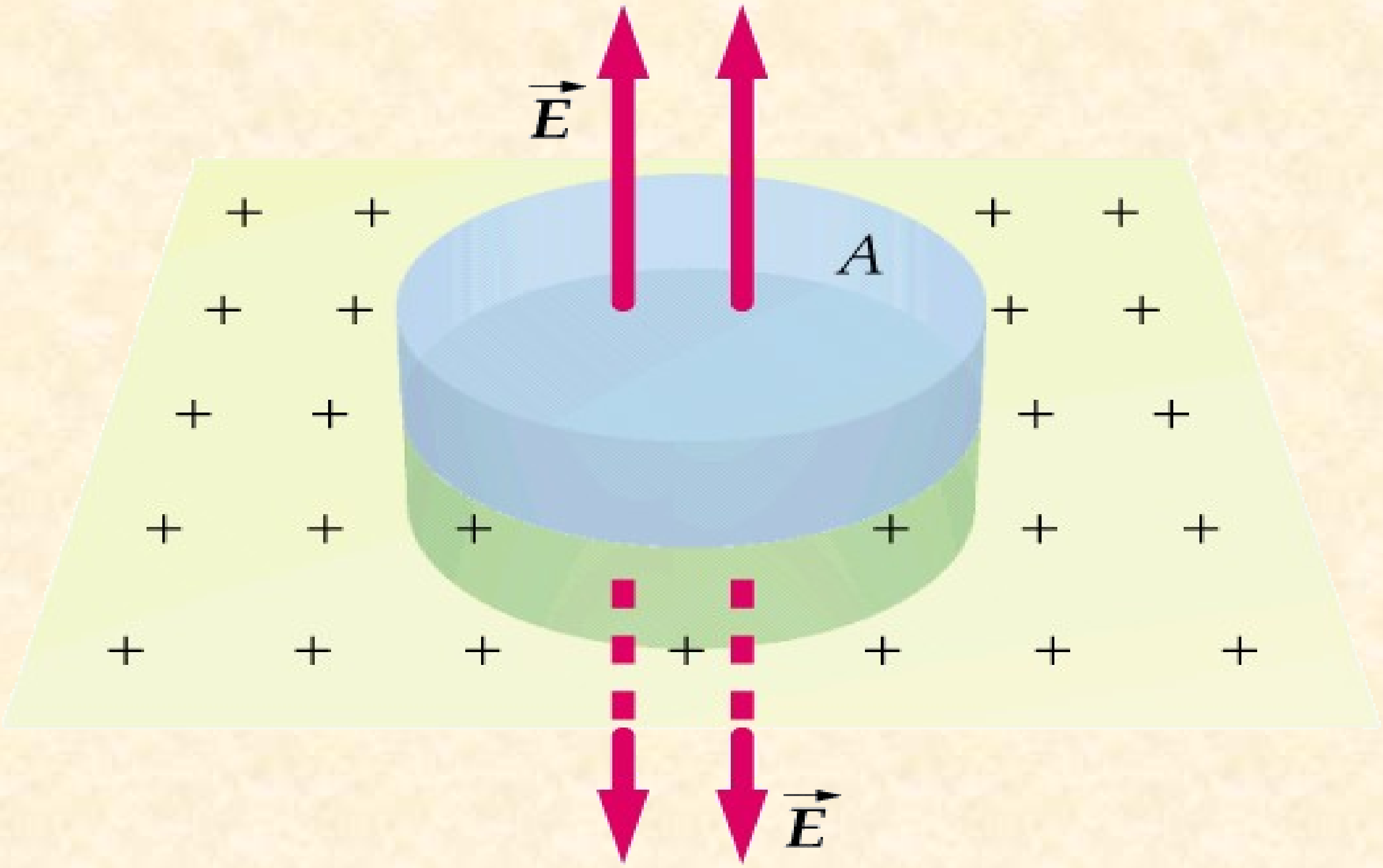
Por lo tanto

$$E\, S = \frac{q_{int}}{\varepsilon_o}$$

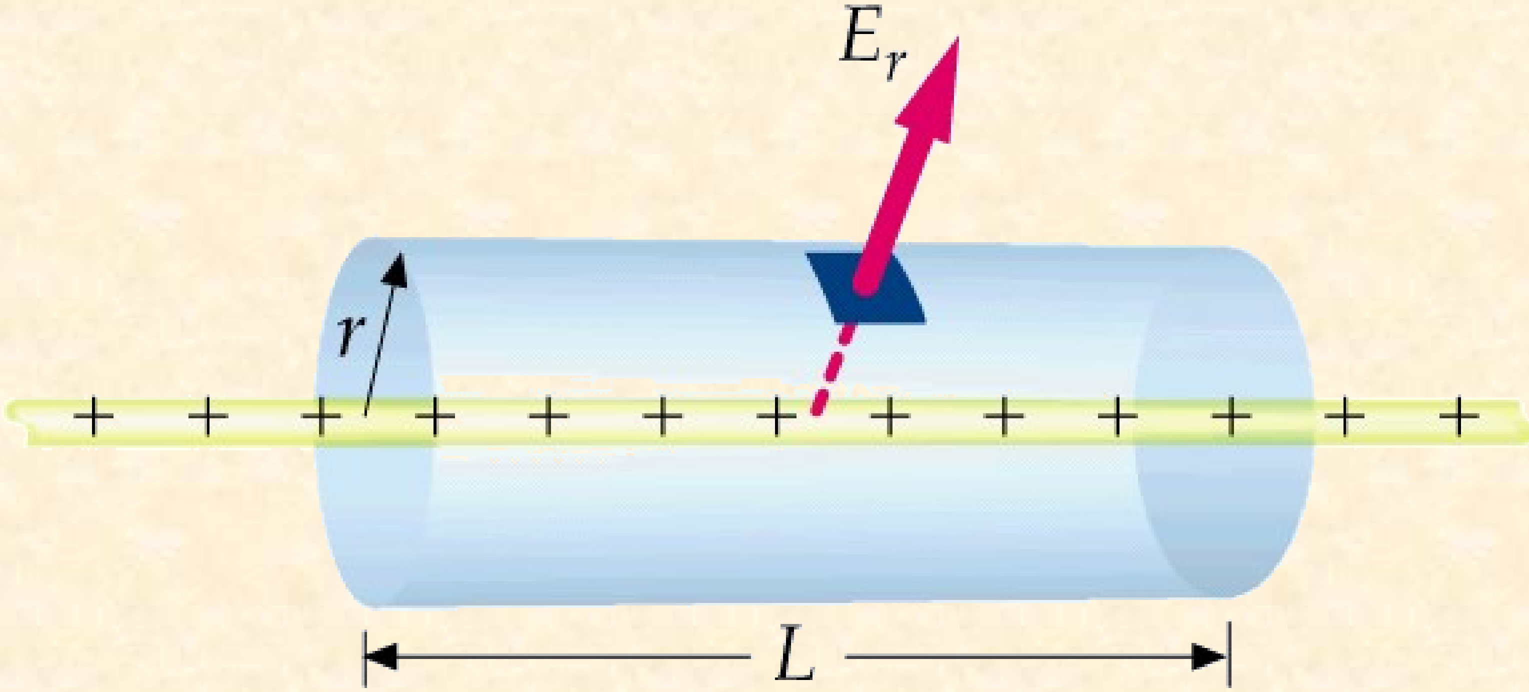
S es el área de la superficie gaussiana

q_{int} es la carga encerrada en dicha superficie

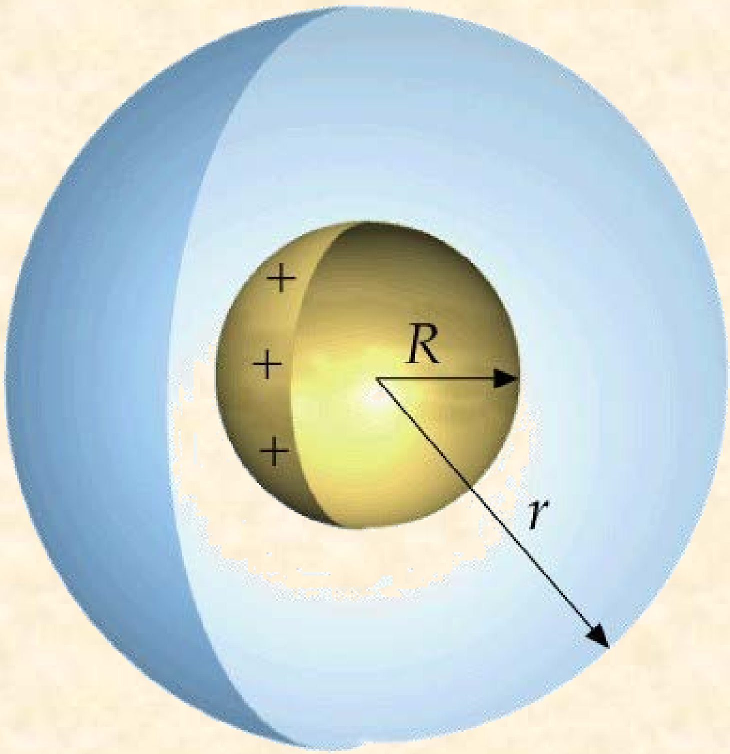
Ejemplo 1: Campo eléctrico próximo a un plano infinito de carga.

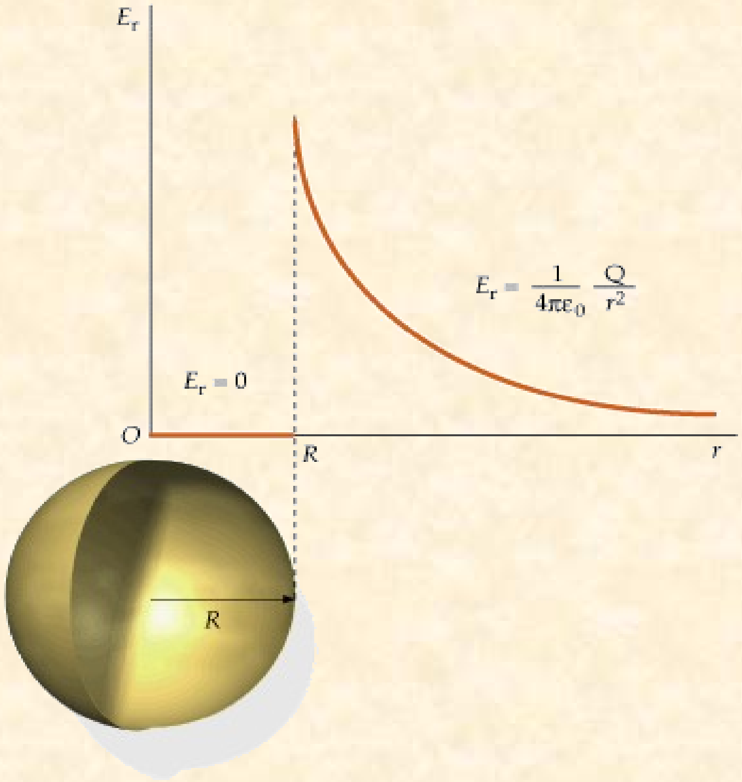


Ejemplo 2: Campo eléctrico a una distancia r de una carga lineal infinitamente larga de densidad de carga uniforme ●.

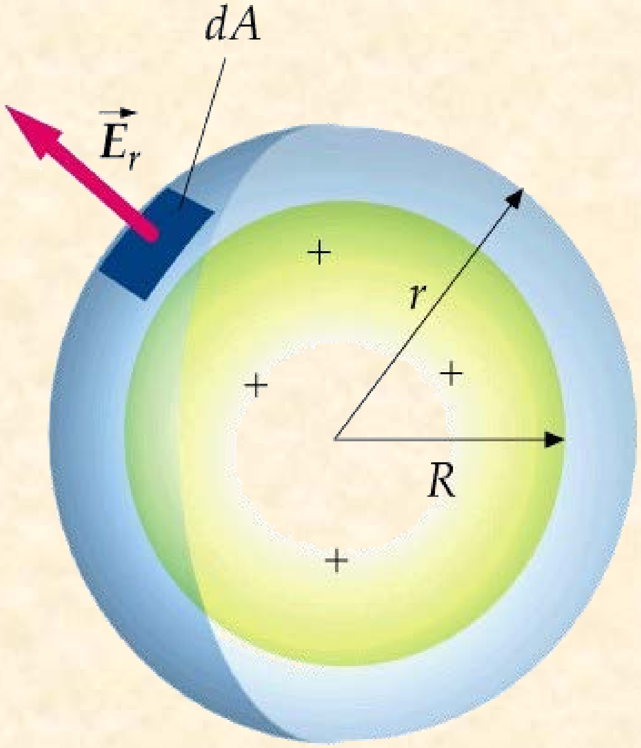


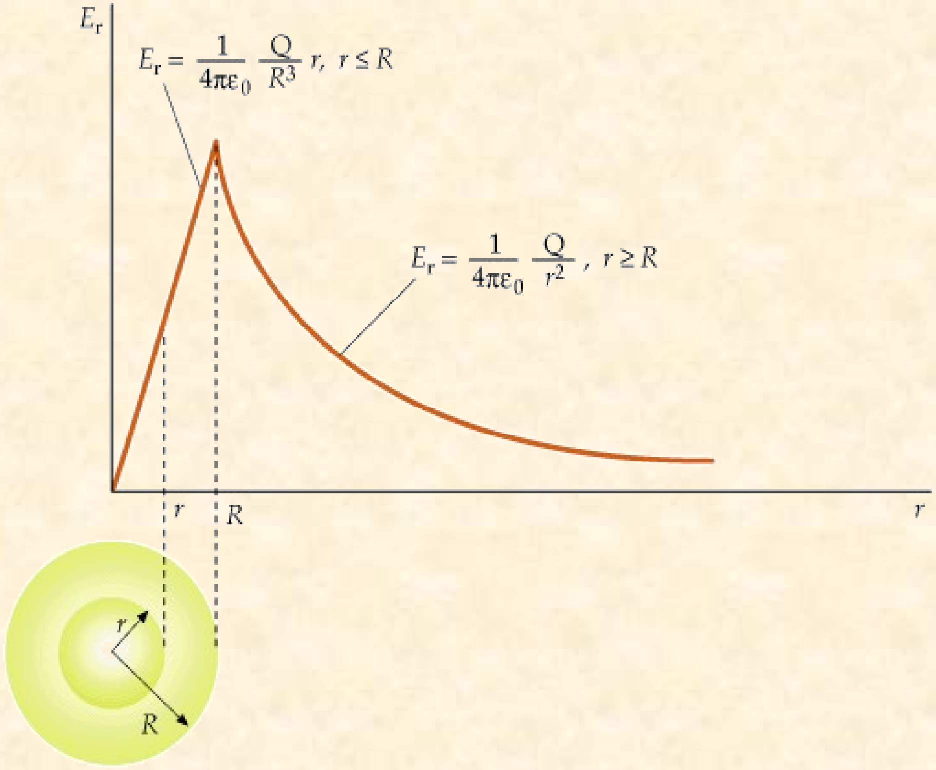
Ejemplo 3: Campo eléctrico debido a una corteza esférica uniformemente cargada.



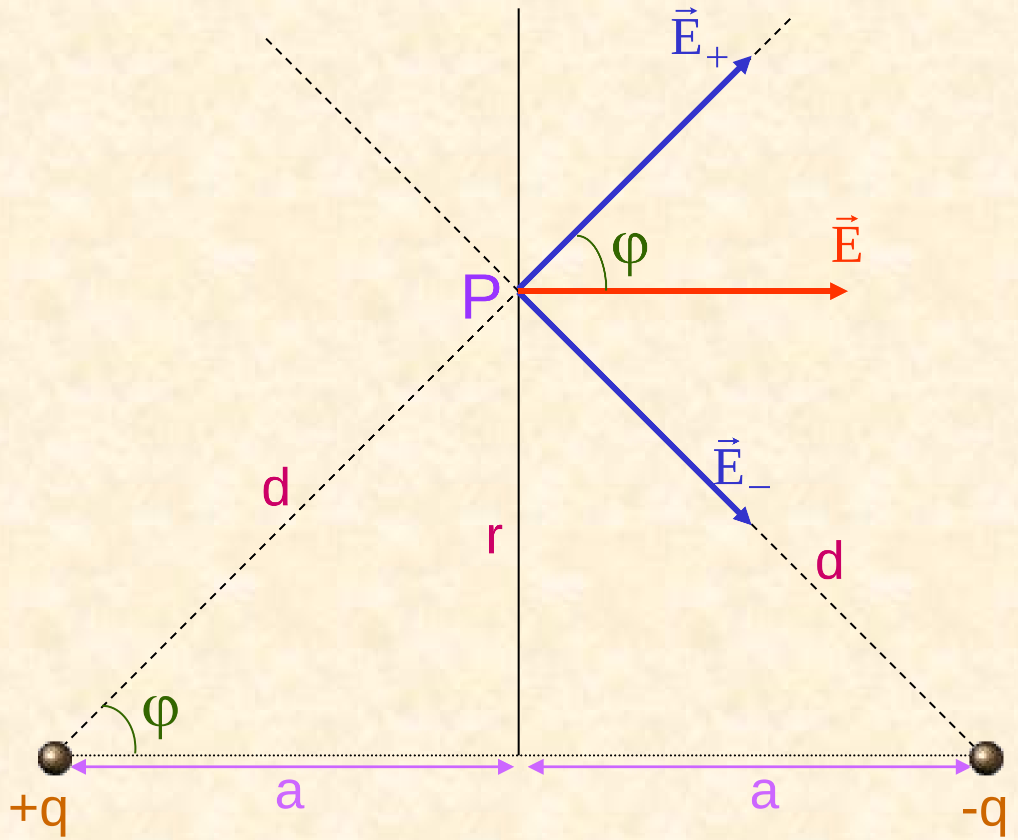


Ejemplo 4: Campo eléctrico debido a una esfera uniformemente cargada.





Dipolo eléctrico: Cálculo del campo eléctrico en un punto de la mediatriz de la línea que une ambas cargas.



Ejemplo