BLOQUE 1. ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

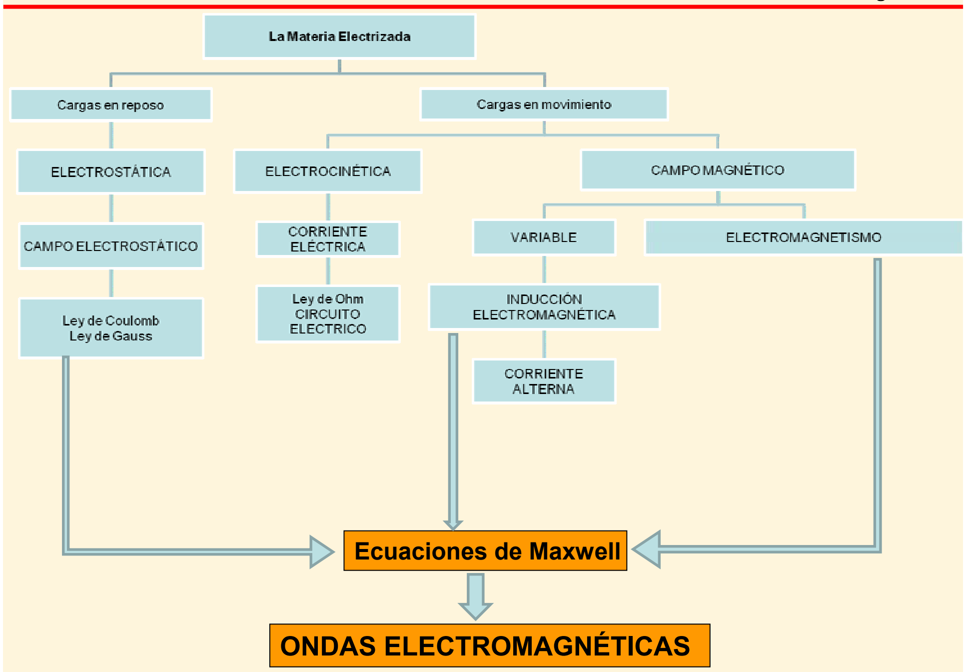
Tema 1. Campo eléctrico y Campo magnético

1. Carga eléctrica. Interacción eléctrica e interacción magnética.
    1. Fuerza eléctrica y campo eléctrico
    2. Potencial eléctrico. Energía electrostática
    3. Dipolos eléctricos
    4. Fuerza magnética y campo magnético.
    5. Dipolos magnéticos
    6. Acciones del campo eléctrico y del campo magnético. Fuerza de Lorentz.
2. Corriente Eléctrica.
    1. Corriente y campo eléctrico
    2. Corriente y campo magnético
3. Campos conservativos y no conservativos.
    1. Campo eléctrico. Flujo eléctrico. Ley de Gauss. Conductores. Polarización. Condensadores. Energía
    2. Campo Magnético. Ley de Ampère. Flujo Magnético. Ley de Gauss. Magnetización. Energía.
4. Campos dependientes del tiempo. Inducción electromagnética. Ley de Faraday. Ley de Ampère-Maxwell
5. Ecuaciones de Maxwell

Seminarios y laboratorio

- La medida y su incertidumbre.
- Corriente eléctrica. Circuitos eléctricos. **Ley de Ohm**.
- Movimiento en campos electromagnéticos. Tubo de Thomson.
- Condensadores. **Carga y descarga de condensadores**.
- Campo magnético en bobinas y solenoides.
- Materiales magnéticos.
- Inducción electromagnética. Frenado magnético. Alternador.
- Corriente alterna. Dispositivos eléctricos.

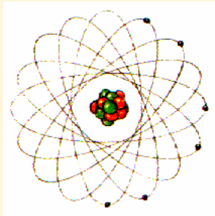
Electromagnetismo



Naturaleza eléctrica de la materia

La materia tiene CARGA ELÉCTRICA

El origen de la electricidad : el átomo



	Partícula	Carga	Masa
NÚCLEO	Neutrón	0	$1{'}67\cdot10^{-27}$kg
	Protón	$1{'}6\cdot10^{-19}$ C	$1{'}67\cdot10^{-27}$kg
CORTEZA	Electrón	$-1{'}6\cdot10^{-19}$ C	$9{'}11\cdot10^{-31}$kg

La carga eléctrica está cuantizada

Principio de conservación de la carga eléctrica

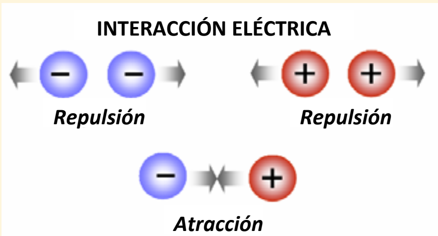
	Cargas	Representación
Objeto neutro	+ + + − − −	
Objeto positivo	+ + + + + −	+
Objeto negativo	+ + − − − −	−

Por **frotamiento**, **por contacto** y **por inducción** son tres de las formas más empleadas para electrizar un cuerpo

Carga por unidad de longitud	**densidad lineal (λ)**	$\lambda = \dfrac{dq}{d\ell} \xrightarrow{\text{carga uniformemente distribuida}} \lambda = \dfrac{Q}{\ell}$
Carga por unidad de superficie	**densidad superficial (σ)**	$\sigma = \dfrac{dq}{ds} \xrightarrow{\text{carga uniformemente distribuida}} \sigma = \dfrac{Q}{S}$
Carga por unidad de volumen	**densidad cúbica (ρ)**	$\rho = \dfrac{dq}{dV} \xrightarrow{\text{carga uniformemente distribuida}} \rho = \dfrac{Q}{V}$

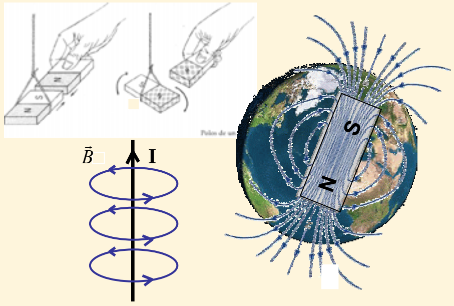
INTERACCIÓN ELÉCTRICA

Un objeto por el hecho de poseer carga puede ejercer fuerzas sobre otro objeto cargado que se ponga en su presencia. Estas fuerzas pueden ser atractivas o repulsivas.



INTERACCIÓN MAGNÉTICA

La interacción magnética se produce entre cargas en movimiento, es decir, entre corrientes eléctricas.



Las interacciones eléctricas y magnéticas son dos aspectos diferentes de una misma propiedad de la materia: su carga eléctrica

INTERACCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Concepto de Campo

El concepto de *Campo* es de una gran importancia en Ciencias y, particularmente, en Física.

Si en una región del espacio existe una magnitud física definida en cada uno de sus puntos, la función que asocia a cada punto el valor que la magnitud toma en él recibe el nombre de Campo.

Tipos de campos

Campo escalar: Magnitud es de tipo escalar
Campo vectorial: Magnitud es de tipo vectorial

Representación gráfica de campos

Campo escalar: Isosuperficies o Isolíneas
Campo vectorial: Líneas de campo

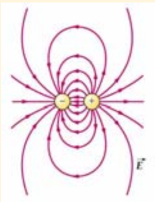
En teoría de campos electromagnéticos se trabaja básicamente con magnitudes definidas en amplias zonas del espacio, como son los campos escalares o vectoriales, y se trata de establecer las relaciones que existen entre ellos.

CAMPO ELÉCTRICO Y CAMPO MAGNÉTICO

- Ambos campos tienen su origen en las cargas eléctricas
- Una carga eléctrica en movimiento produce un campo eléctrico y un campo magnético
- Una carga en reposo genera solo un campo eléctrico

CARGAS EN REPOSO

El campo eléctrico asociado a una carga en reposo resulta diferente si el medio es aire o agua, por ejemplo.



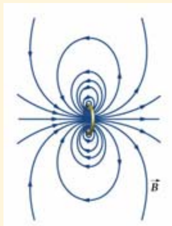
CAMPO ELECTROSTÁTICO EN EL VACIO

CARGAS EN MOVIMIENTO

Las corrientes eléctricas y el campo magnético asociado, aparecen simultáneamente con el movimiento (causa) de cargas.

CAMPO MAGNÉTICO DE LAS CORRIENTES ESTACIONARIAS EN EL VACIO

el vacío queda caracterizado eléctricamente mediante su *constante dieléctrica* y magnéticamente a través de su *permeabilidad magnética*

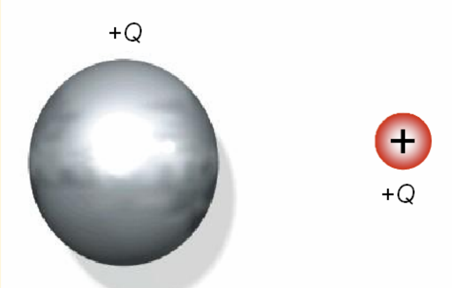


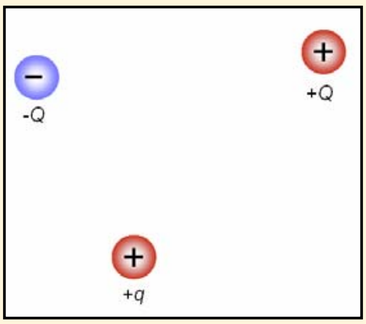
Interacción eléctrica. Carga eléctrica y Ley de Coulomb

Carga eléctrica puntual

- es un cuerpo electrizado cuyas dimensiones resultan insignificantes en relación a la situación en que es considerado (es un concepto equivalente al de partícula)
- pueden ser positivas o negativas

Se designará con las letras “q” o “Q”





Propiedades de la carga:

- **La carga eléctrica se conserva**
- **La carga eléctrica está cuantizada**

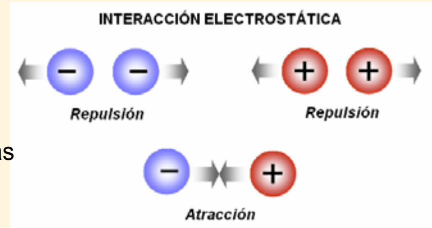
1 e^- = -1´6·10^{-19}C

La unidad de carga en el S.I. es el culombio (C)

Carga eléctrica y Ley de Coulomb

¿De qué factores depende la fuerza entre dos cuerpos electrizados?

- De la cantidad de carga “q”
- De la distancia “r” entre ellas
- Del medio en que se encuentran inmersas



La fuerza eléctrica es directamente proporcional a la magnitud del producto de las cargas que interaccionan, es decir:

$$F_{eléctrica} = K_1 \, |q_A| \, |q_B|$$

(K_1 es una constante de proporcionalidad)

Al medir la fuerza eléctrica entre las cargas a distintas distancias (r), se encuentra que es inversamente proporcional al cuadrado de dicha distancia, es decir:

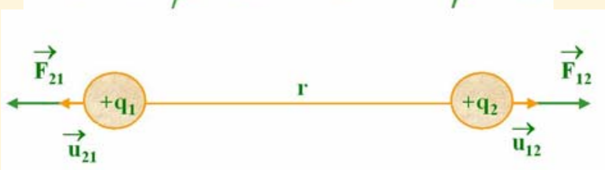
$$F_{eléctrica} = K_2 \frac{1}{r^2}$$

(K_2 es una constante de proporcionalidad)

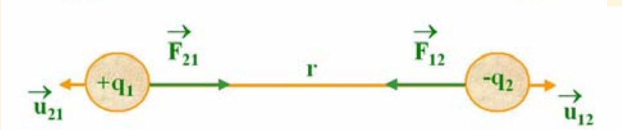
LEY DE COULOMB

$$\vec{F}_{21} = k_o \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{u}_{21} \qquad \vec{F}_{12} = k_o \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{u}_{12}$$

La fuerza eléctrica:
- ► Magnitud vectorial
- ► Fuerza central
- ► Cumple la 3ª Ley de Newton



FUERZA ELÉCTRICA REPULSIVA



FUERZA ELÉCTRICA ATRACTIVA

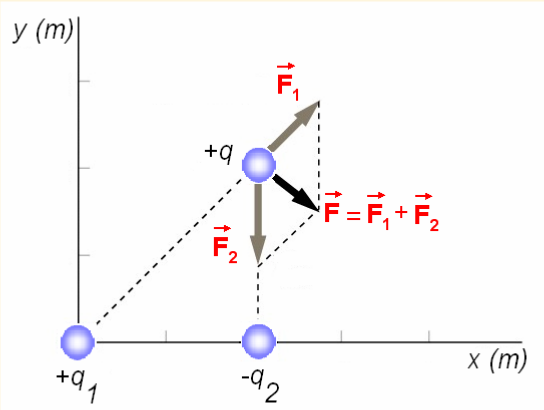
Restricciones de la ley de Coulomb:

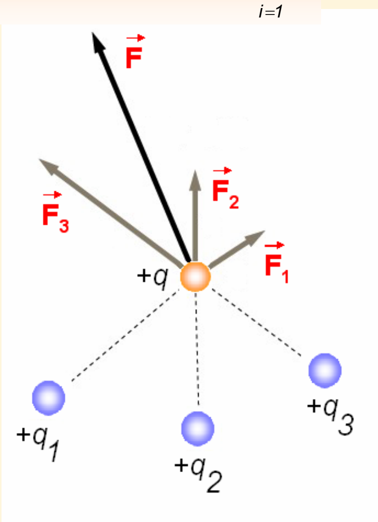
1) Cargas puntuales
2) Cargas en reposo
3) El medio el vacío o el aire

¿Cómo calcular la fuerza que ejercen varias cargas puntuales sobre otra?

Principio de superposición

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \ldots + \vec{F}_n = \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i$$





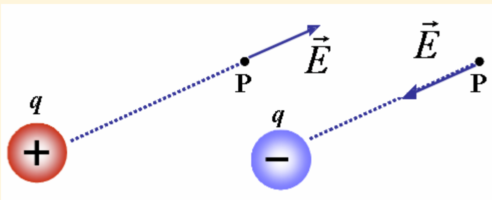
Campo Eléctrico

Cualquier región del espacio en la que una carga eléctrica experimenta una fuerza eléctrica que, evidentemente, se debe a la presencia en la región de otra carga

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

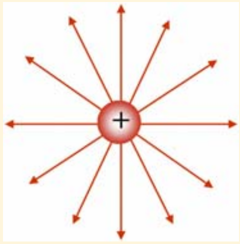
► *Campo electrostático de una carga puntual*

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q'} = k_0 \frac{q\,q'}{r^2 q'}\vec{u}_r = k_0 \frac{q}{r^2}\vec{u}_r$$



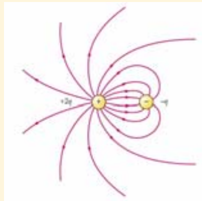
Conceptos sobre el campo eléctrico:

- Intensidad del campo eléctrico
- Líneas de campo eléctrico

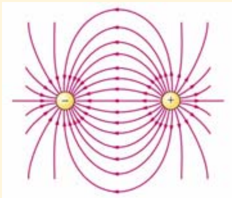


LÍNEAS DE CAMPO

- Densidad de líneas de campo proporcional a su intensidad
- Las cargas positivas son fuentes y las negativas sumideros
- No pueden cortarse dos líneas de campo en un punto sin carga
- Nº de líneas de campo salientes o entrantes proporcional a la carga



- No son materiales. Descripción cualitativa
- El campo es continuo y existe en cada punto
- Se pierde la perspectiva espacial del campo



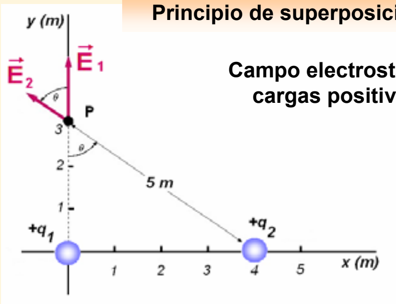
Líneas de campo en un dipolo eléctrico

Líneas de campo eléctrico correspondientes a una carga puntual positiva +2q y otra segunda carga puntual -q.

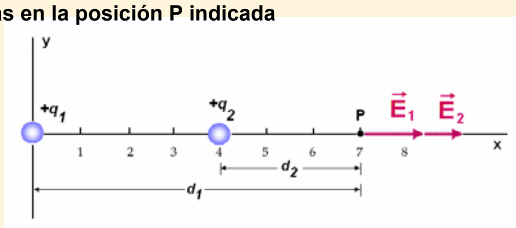
► Campo eléctrico creado por un sistema de cargas puntuales

Principio de superposición

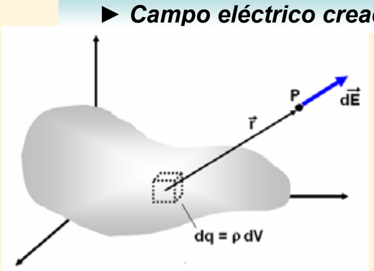
$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \ldots + \vec{E}_n = \sum_{i=1}^{n} \vec{E}_i$$



Campo electrostático creado por una pareja de cargas positivas en la posición P indicada



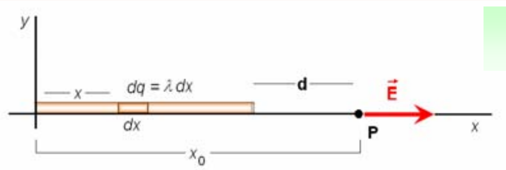
► Campo eléctrico creado por distribuciones continuas de carga



$$d\vec{E} = k_0 \frac{dq}{r^2} \vec{u}_r$$

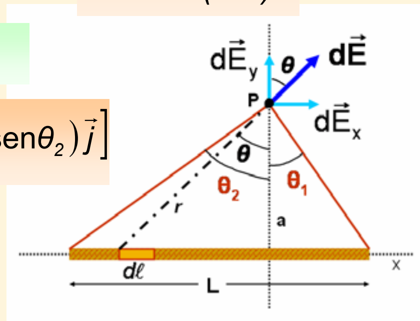
$$dq = \lambda \, d\ell$$
$$dq = \sigma \, dS$$
$$dq = \rho \, dV$$

Campo eléctrico creado por un elemento de carga en el punto P



Campo eléctrico sobre el eje de una distribución de carga lineal finita

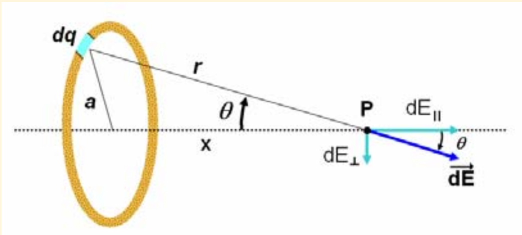
$$\vec{E} = k_0 \frac{\lambda\, L}{d\ (L+d)} \vec{i}$$



Campo eléctrico creado por una distribución lineal de carga

$$\vec{E} = k_0 \frac{\lambda}{y}\left[(\cos\theta_1 - \cos\theta_2)\vec{i} + (\mathrm{sen}\theta_1 + \mathrm{sen}\theta_2)\vec{j}\right]$$

$$\vec{E} = 2\ k_0 \frac{\lambda}{y} \mathrm{sen}\theta_0\ \vec{j} \qquad \vec{E} = 2\ k_0 \frac{\lambda}{y}\ \vec{j}$$



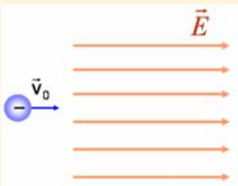
Campo eléctrico creado por un anillo de carga en un punto de su eje

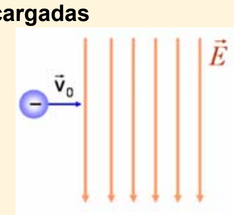
$$\vec{E} = k_0 \frac{Qx}{\left(a^2 + x^2\right)^{\frac{3}{2}}}\ \vec{i}$$

CAMPO ELÉCTRICO

Acción de un campo eléctrico: FUERZA ELÉCTRICA

Campo eléctrico uniforme sobre partículas cargadas





$$\vec{F} = m\vec{a}$$ **2ª Ley de Newton**

$$\vec{F}_{eléctrica} = q\vec{E}$$

$$\vec{a} = \frac{\sum \vec{F}}{m} = \frac{q}{m}\vec{E}$$

Trabajo efectuado sobre una carga al desplazarla en un campo eléctrico

ENERGÍA POTENCIAL ELÉCTRICA

POTENCIAL ELÉCTRICO

Un campo eléctrico produce una fuerza sobre las cargas eléctricas de las proximidades. Cuando las cargas son libres y no experimentan otras fuerzas de ligadura serán arrastradas por la acción del campo. Entonces el campo realiza un desplazamiento físico de las cargas y, por tanto, un trabajo. El potencial eléctrico es la medida de ese trabajo por unidad de carga.

POTENCIAL ELÉCTRICO

El trabajo realizado por la fuerza eléctrica para trasladar la carga *q´* desde un punto A hasta otro punto B es:

$$W_C(A \to B) = \int_A^B \vec{F}_C \cdot d\vec{r} = \int_A^B q´\vec{E} \cdot d\vec{r} = q´\int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{r} = -\Delta U = (U_A - U_B)$$

$$\frac{W_C(A \to B)}{q´} = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{r} = \frac{(U_A - U_B)}{q´} = V_A - V_B = -\Delta V$$

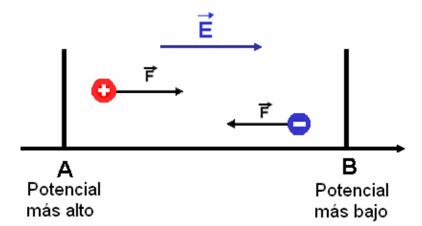
$$W_C(A \to B) = q´(V_A - V_B)$$

Expresión que permite calcular el trabajo realizado por el campo cuando conocemos la diferencia de potencial

Diferencia de potencial (d.d.p.) entre dos puntos representa:

► la diferencia de energía potencial de la unidad de carga positiva situada en dichos puntos

► el trabajo que debe realizar el campo para trasladar la unidad de carga positiva del primer punto al segundo



Unidades S.I. : voltio

1 V = 1 J/C

¿Cómo se determina el potencial de un punto?

Como en el infinito la fuerza de interacción entre cargas puntuales es nula, suele tomarse ese punto como origen

$$V_\infty = 0$$

$$V = \frac{U}{q´}$$

Potencial en un punto representa el trabajo que debe realizar el campo para trasladar la unidad de carga desde el punto hasta el infinito

Potencial electrostático producido por una carga puntual a una distancia r

$$V = \frac{U}{q´} = \frac{k_0 \frac{qq´}{r}}{q´} = k_0 \frac{q}{r}$$

¿ Cómo se determina el potencial de un punto del campo si el campo está creado por n cargas puntuales?

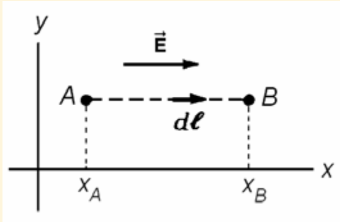
Principio de superposición

Potencial electrostático producido por un sistema de cargas puntuales

$$V = k_0 \sum_{i=1}^{n} \frac{q_i}{r_{ij}}$$

CAMPO ELÉCTRICO EN FUNCIÓN DEL POTENCIAL: GRADIENTE DE POTENCIAL

$$U_B - U_A = -\int_A^B \vec{F}\cdot d\vec{\ell} = -q_0\int_A^B \vec{E}\cdot d\vec{\ell}$$



$$\Delta V = V_B - V_A = -\int_A^B \vec{E}\cdot d\vec{\ell}$$

$$dV = -\vec{E}\cdot d\vec{\ell}$$

$$E_x = -\frac{\partial V}{\partial x} \qquad E_y = -\frac{\partial V}{\partial y} \qquad E_z = -\frac{\partial V}{\partial z}$$

$$\vec{E} = -\left(\frac{\partial V}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial V}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial V}{\partial z}\vec{k}\right)$$

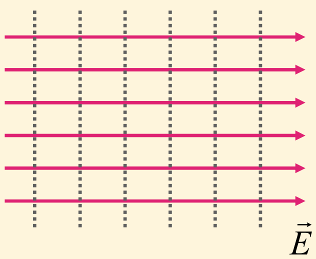
$$\left.\begin{aligned} dV &= \frac{\partial V}{\partial x}dx + \frac{\partial V}{\partial y}dy + \frac{\partial V}{\partial z}dz \\ \vec{\nabla} &= \frac{\partial}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial}{\partial z}\vec{k} \\ d\vec{r} &= dx\,\vec{i} + dy\,\vec{j} + dz\,\vec{k} \end{aligned}\right\} \quad \left.\begin{aligned} dV &= \vec{\nabla}V\cdot d\vec{\ell} \\ dV &= -\vec{E}\cdot d\vec{\ell} \end{aligned}\right\} \quad \vec{E} = -\vec{\nabla}V$$

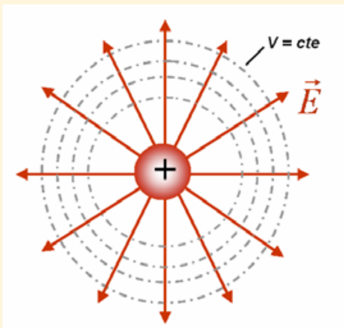
¿Qué es una superficie equipotencial? ¿Cuáles son sus propiedades?

Lugar geométrico de todos los puntos del campo que están a un mismo potencial

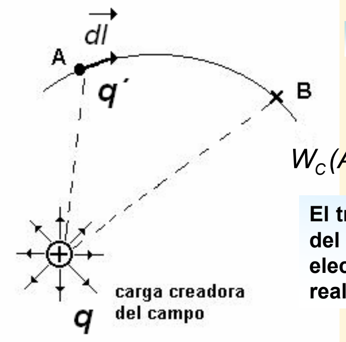
► El trabajo realizado para desplazar una carga entre dos puntos de una superficie equipotencial es nulo

► Las líneas de campo (y, por tanto, $\vec{E}$) son perpendiculares en cada punto a las superficies equipotenciales y el sentido del vector campo eléctrico es el de los potenciales decrecientes





Potencial eléctrico y Energía potencial electrostática



ENERGÍA POTENCIAL ELECTROSTÁTICA

La fuerza eléctrica es una fuerza central y, por tanto, conservativa

$$W_C(A \to B) = \int_A^B \vec{F}_C \cdot d\vec{r} = -\Delta U = -(U_B - U_A) = (U_A - U_B)$$

El trabajo realizado por la fuerza eléctrica es independiente del camino seguido y la <u>variación</u> de energía potencial electrostática entre los puntos A y B es igual al trabajo realizado por la fuerza conservativa cambiado de signo.

$$W_C(A \to B) = -\Delta U = U_A - U_B = k_o q_1 q_2 \left[\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B}\right]$$

Trabajo realizado por la fuerza del campo creado por una carga puntual para trasladar otra carga puntual desde A hasta B

► **En un campo de fuerzas conservativo, el trabajo realizado por las fuerzas del campo siempre se realiza en el sentido de disminuir la energía potencial del sistema** ⇨ $\Delta U < 0$, $W_{campo} > 0$

$$W_{ext} = \Delta E = \Delta E_c + \Delta U$$

► **Si el sistema aumenta su energía potencial ($\Delta U > 0$) es porque ha actuado un agente exterior en contra de las fuerzas del campo**

¿Cómo se determina la energía potencial de una carga *q´* en un punto del campo creado por otra carga puntual *q*?

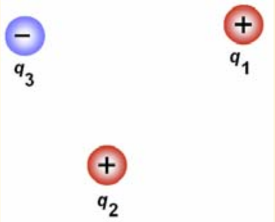
Por convenio, se elige como origen de energías potenciales un punto en el que la interacción electrostática entre las cargas sea nula

$$r_B = \infty \quad \Rightarrow \quad U_B = 0$$

$$W_C(A \to \infty) = U = k_0 \frac{q\,q'}{r}$$

Trabajo que debe realizar el campo para separar las cargas una distancia infinita

¿Qué ocurre si el sistema está constituido por *n* cargas puntuales?



$$U = k_0 \left(\frac{q_1 q_2}{r_{12}} + \frac{q_1 q_3}{r_{13}} + \frac{q_2 q_3}{r_{23}}\right)$$

Principio de superposición

$$U = k_0 \sum_{pares} \frac{q_i q_j}{r_{ij}}$$

Si la energía potencial eléctrica es positiva, el trabajo para separar todas las cargas una distancia mutua infinita será realizado por el campo; si es negativa, dicho trabajo será realizado por un agente exterior en contra de las fuerzas del campo

$W_C = -\Delta U$

Fuerza: $\vec{F}_E$ (N) $\xrightarrow{W_C(A\to B)=\int_A^B \vec{F}_C\cdot d\vec{r}}$ Trabajo: W_C (J ≡ N·m)
Energía Potencial: U (J)

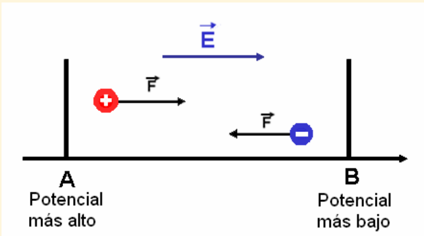
$\vec{E} = \dfrac{\vec{F}}{q}$

$\Delta U = q\,\Delta V$

$W_C = -q\,\Delta V$

Campo eléctrico: $\vec{E}$ (N/C) $\xrightarrow{dV = -\vec{E}\cdot d\vec{\ell}}$ Potencial eléctrico: V (V ≡ J/C)

$\vec{E} = -\vec{\nabla} V$

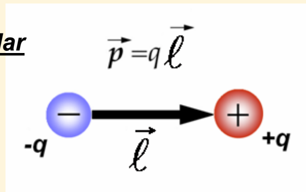


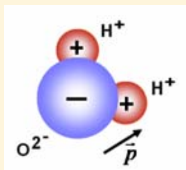
- Si Q > 0 un W_C implica ΔU < 0; ΔV < 0 y la carga se mueve hacia potenciales decrecientes
- Si Q < 0 un W_C implica ΔU < 0; ΔV > 0 y la carga se mueve hacia potenciales crecientes

Dipolos eléctricos en campos eléctricos

⇒ Dipolo eléctrico. Momento dipolar

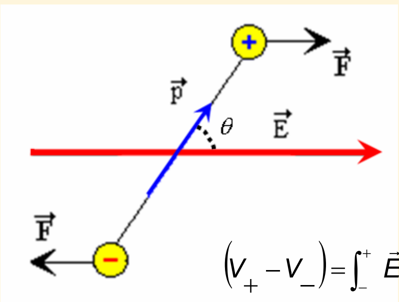
DIPOLO ELÉCTRICO: consta de una carga puntual *-q* y una carga puntual *+q* separadas una distancia fija





Molécula de agua

⇒ Dipolo eléctrico en un campo eléctrico uniforme:



Muchos átomos y moléculas neutros se comportan como dipolos cuando se someten a un campo eléctrico externo

$$\vec{\tau} = \vec{\ell}\times\vec{F}_+ = \vec{\ell}\times q\vec{E} = \vec{p}\times\vec{E}$$

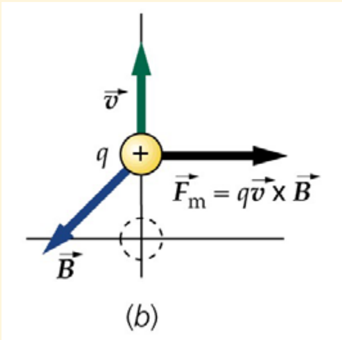
Energía potencial del dipolo $U = q\,(V_+ - V_-)$

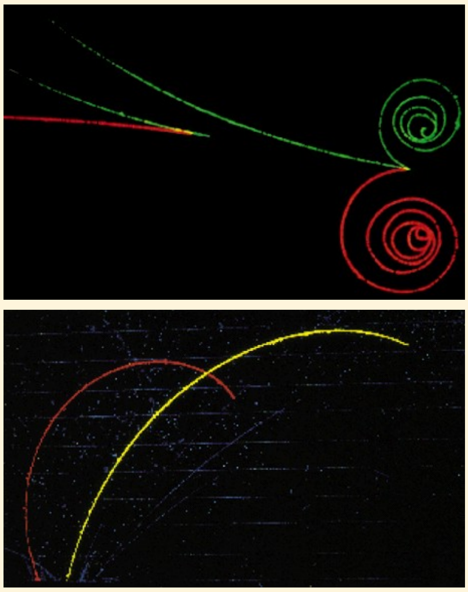
$$(V_+ - V_-) = \int_-^+ \vec{E}\cdot d\vec{\ell} = -\int_-^+ \vec{E}\cdot d\vec{\ell} = -\int_-^+ E\,d\ell\cos\theta = -E\,\ell\,\cos\theta$$

$$U = q\,(V_+ - V_-) = -q\,E\ell\,\cos\theta = -p\,E\cos\theta = -\vec{p}\cdot\vec{E}$$

Acción de un campo magnético: FUERZA MAGNÉTICA

Fuerza magnética sobre una carga eléctrica puntual





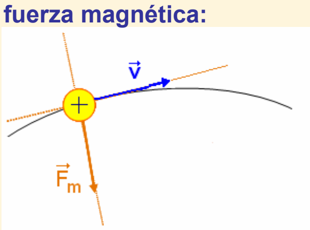
Efecto de campos magnéticos sobre cargas eléctricas en movimiento: FUERZA MAGNÉTICA

FUERZA MAGNÉTICA

¿Qué propiedades tiene la fuerza magnética que actúa sobre una carga?

Si se estudia el movimiento de una carga, q, que lleva una velocidad, $\vec{v}$, en el interior de un campo magnético, $\vec{B}$, se llega a la siguiente expresión para la fuerza magnética:

$$\boxed{\vec{F}_m = q\left(\vec{v} \times \vec{B}\right)}$$



La fuerza magnética es, en todos los puntos, perpendicular a la velocidad y esto es lo mismo que decir que es perpendicular a la trayectoria

► **La fuerza magnética no realiza trabajo sobre la partícula al ser** $\vec{v} \perp \vec{F}_m$

$$W_{TOTAL} = \Delta E_C \Rightarrow 0 = \Delta E_C \Rightarrow v = cte$$

► **La fuerza magnética no modifica el módulo de la velocidad sólo modifica su dirección**

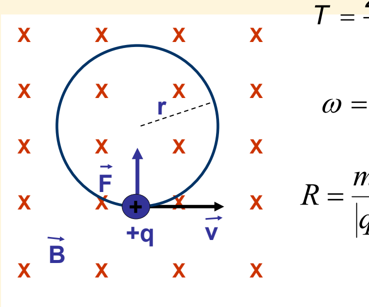
$$\vec{F} = m\vec{a} \Rightarrow a_c = \frac{v^2}{R}$$

Fuerza magnética sobre una carga eléctrica puntual. Aplicaciones

$$\vec{F}_m = q\left(\vec{v}\times\vec{B}\right) = q\left(\vec{v}_{II} + \vec{v}_{\perp}\right)\times\vec{B} = q\vec{v}_{\perp}\times\vec{B}$$

Situación 1

$$\boxed{\begin{array}{l}\vec{v} = \vec{v}_{\perp}\\ \vec{B} = cte\end{array}}$$



$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{|q|B}$$

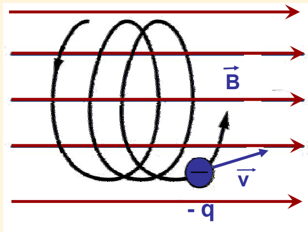
$$\omega = \frac{v}{R} = \frac{|q|B}{m}$$

$$R = \frac{mv_{\perp}}{|q|B} \qquad R = \frac{mv_{\perp}}{|q|B}$$

Radio de curvatura

Situación 2

$$\boxed{\begin{array}{l}\vec{v} = \vec{v}_{II} + \vec{v}_{\perp}\\ \vec{B} = cte\end{array}}$$



$$d = v_{II}T = \frac{2\pi\, m v_{II}}{|q|B}$$

Paso de hélice

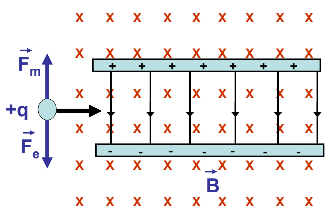
Fuerza electromagnética sobre una carga eléctrica puntual. Aplicaciones

Fuerza de Lorentz: Fuerza sobre una carga moviéndose en el interior de un campo magnético y de un campo eléctrico

$$\boxed{\vec{F} = q\vec{E} + q\left(\vec{v}\times\vec{B}\right)}$$

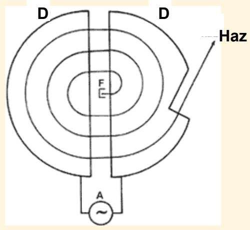
Aplicaciones

Selector de velocidades



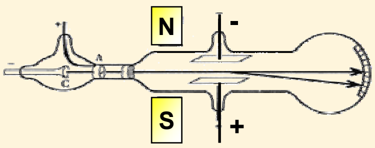
Ciclotrón

E.O. Lawrence y M.S. Livingston (1934)



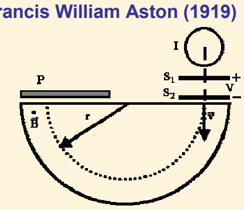
Tubo de Thomson

J.J. Thomson (1897)



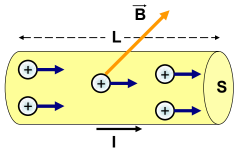
Espectrómetro de masas

Francis William Aston (1919)



Fuerza magnética sobre una corriente eléctrica

Fuerza magnética sobre un hilo conductor rectilíneo



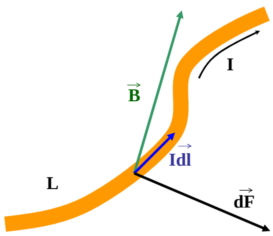
$$\vec{F}_m = q\left(\vec{v}\times\vec{B}\right) \Rightarrow \vec{F} = N\,\vec{F}_q \Rightarrow \vec{F} = Nq\left(\vec{v}\times\vec{B}\right)$$

$$N = nSL$$

$$\vec{F} = nSLq\left(\vec{v}\times\vec{B}\right) = L(nqS\vec{v}\times\vec{B}) = IL\vec{u}_\ell\times\vec{B} = I\vec{L}\times\vec{B}$$

$$\boxed{\vec{F} = I\vec{L}\times\vec{B}}$$

Fuerza magnética sobre un hilo conductor



$$d\vec{F} = Id\vec{\ell}\times\vec{B} \Rightarrow \boxed{\vec{F} = \int_L Id\vec{\ell}\times\vec{B}}$$

I = cte

$$\vec{F} = \int_L Id\vec{\ell}\times\vec{B} \Rightarrow \vec{F} = I\int_L d\vec{l}\times\vec{B}$$

$$\Downarrow \vec{B} = cte$$

$$\boxed{\vec{F} = I\,\left(\int_L d\vec{\ell}\right)\times\vec{B}}$$

$I\,d\vec{l}$ → **elemento de corriente**

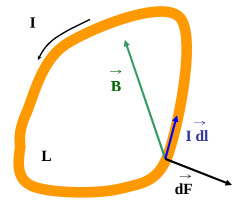
Fuerza magnética sobre un hilo conductor cerrado

I = cte $\quad\quad$ $\vec{B}$ = cte

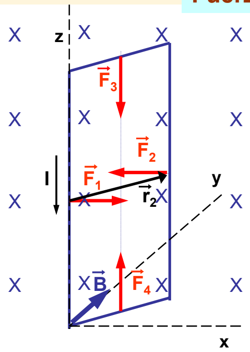
$$\vec{F} = \int_L Id\vec{\ell}\times\vec{B} \Rightarrow \vec{F} = I\int_L d\vec{l}\times\vec{B} \Rightarrow \vec{F} = I\,\left(\int_L d\vec{\ell}\right)\times\vec{B}$$

$$\oint_L d\vec{l} = 0 \Downarrow$$

$$\boxed{\vec{F} = 0}$$



Fuerza magnética sobre una espira de corriente



$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4 = 0 \begin{cases} \vec{F}_1 = -\vec{F}_2;\ \vec{F}_3 = -\vec{F}_4 \\ \vec{F}_i = I\vec{L}_i\times\vec{B} \end{cases}$$

$$\boxed{\sum \vec{F}_i = 0}$$

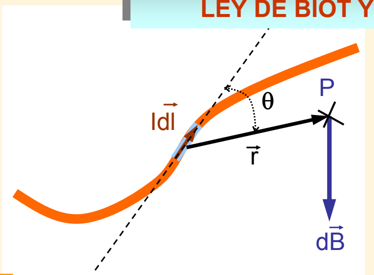
$$\vec{\tau} = \sum \vec{r}_i\times\vec{F}_i = \vec{r}_2\times\vec{F}_2 = I\vec{S}\times\vec{B} \quad \begin{cases} \vec{\tau}_3 = -\vec{\tau}_4 \\ \vec{\tau}_1 = 0 \end{cases}$$

$$\boxed{\vec{\tau} = \vec{M}\times\vec{B}}$$

Momento dipolar magnético

$$\vec{M} = I\vec{S} \quad\quad \vec{M}_N = NI\vec{S}$$

LEY DE BIOT Y SAVART. APLICACIONES



Ley de Biot y Savart

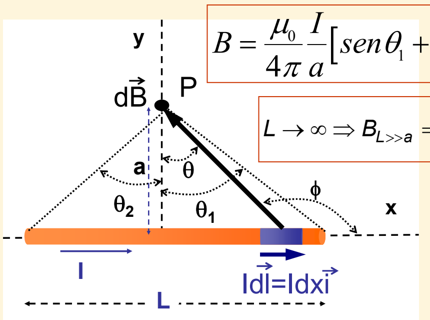
$$d\vec{B} = K_m \frac{I d\vec{\ell} \times \vec{u}_r}{r^2} \qquad K_m = \frac{\mu_o}{4\pi} = 10^{-7} N/A^2$$

μ_o permeabilidad magnética del vacío

☒ *Campo magnético CREADO por una corriente rectilínea*

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{a}\left[sen\theta_1 + sen\theta_2\right]$$

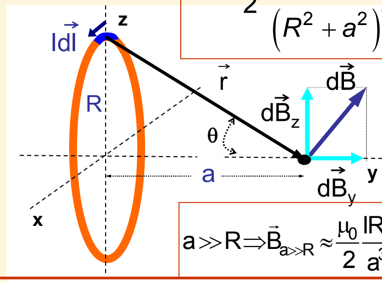
$$L \to \infty \Rightarrow B_{L>>a} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{a}$$



☒ *Campo magnético CREADO por una espira de corriente*

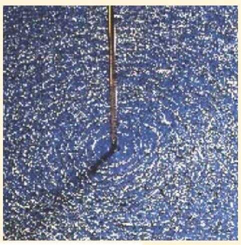
$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{2} \frac{IR^2}{\left(R^2 + a^2\right)^{\frac{3}{2}}} \vec{j}$$

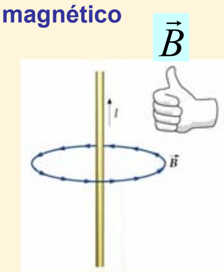
$$a \gg R \Rightarrow B_{a \gg R} \approx \frac{\mu_0}{2} \frac{IR^2}{a^3} \vec{j}$$

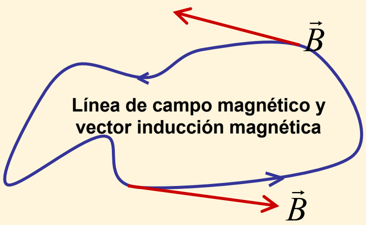


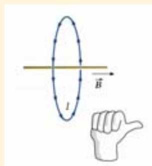
Conceptos sobre el campo magnético:

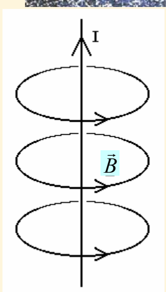
- Campo magnético
- Vector inducción magnética
- Líneas de campo magnético

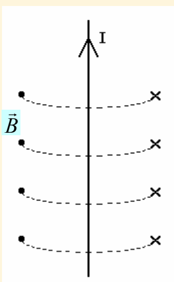


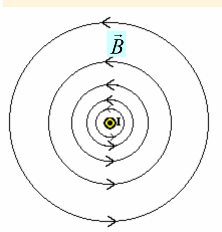


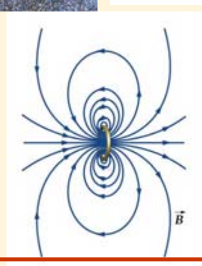




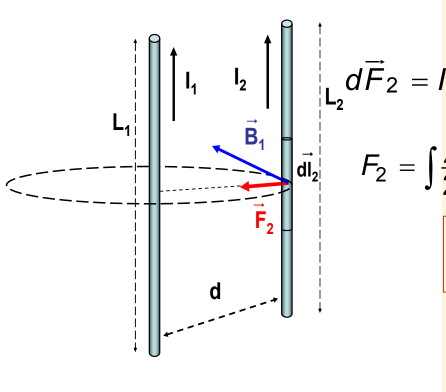








Fuerza magnética entre corrientes paralelas



$$B_1 = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I_1}{d}$$

$$d\vec{F}_2 = I_2 d\vec{\ell}_2 \times \vec{B}_1 \Longrightarrow dF_2 = I_2 d\ell_2 B_1 = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I_1 I_2}{d} d\ell_2$$

$$F_2 = \int \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I_1 I_2}{d} d\ell_2 = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I_1 I_2}{d}\int d\ell_2 = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I_1 I_2}{d} L_2$$

$$\boxed{F_2 = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I_1 I_2}{d} L_2} \qquad \boxed{F_1 = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I_1 I_2}{d} L_1}$$

$$\Downarrow$$

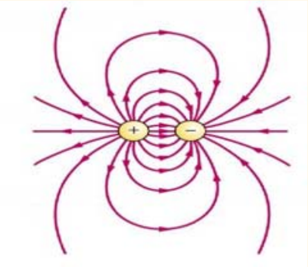
$$\boxed{\frac{F_2}{L_2} = \frac{F_1}{L_1} = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I_1 I_2}{d}}$$

Definiciones:

- **Amperio:** Es la intensidad de corriente que circulando en un mismo sentido por dos conductores rectilíneos y paralelos, separados en el vacío una distancia de un metro, origina en cada uno de ellos una fuerza atractiva de 2.10^{-7} N/m
- **Culombio:** Es la carga que atraviesa en el tiempo de un segundo la sección recta de un conductor por el que circula una corriente de un amperio

Campo Eléctrico

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



Dipolo eléctrico

Ley de Coulomb

$$\boxed{d\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{dq}{r^2}}$$

Elemento de carga

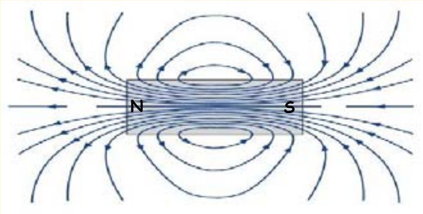
Proporcional a $1/r^2$

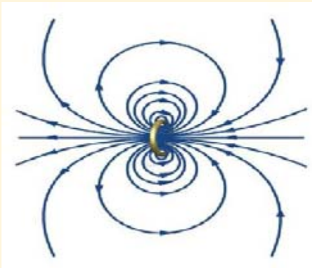
Campo radial desde el elemento de carga

Una carga o distribución de carga

Campo Magnético

Imán





Espira de corriente

$$\vec{F} = I\,\left(\int_L d\vec{\ell}\right) \times \vec{B}$$

Ley de Biot y Savart

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I}{r^2}\,d\vec{\ell} \times \vec{u}_r$$

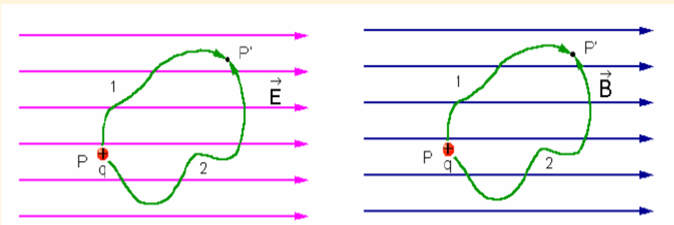
Elemento de corriente

Proporcional a $1/r^2$

Campo perpendicular al elemento de corriente

Una distribución de corriente

Campos Conservativos y No Conservativos

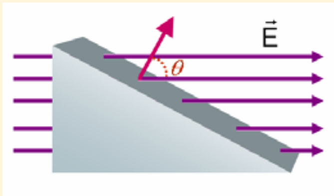


- El campo eléctrico es un campo conservativo: el trabajo necesario para mover una carga entre dos puntos del campo no depende de la trayectoria seguida. Es posible definir un potencial eléctrico escalar para describir el campo
- El campo magnético es un campo no conservativo: el trabajo necesario para mover una carga entre dos puntos del campo depende de la trayectoria seguida. No es posible definir un potencial escalar para describir el campo

Flujo eléctrico y Ley de Gauss

El flujo es proporcional al número de líneas de campo que atraviesan la superficie

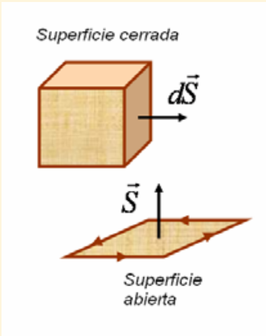
$\Phi_E = E\,S$



$\Phi_E = E\,S\cos\theta$

$$\boxed{\Phi_E = \vec{E}\cdot\vec{S}}$$

$d\Phi_E = \vec{E}\cdot d\vec{S} = E\ dS\cos\theta$



Flujo eléctrico a través de una superficie

abierta $\Phi_E = \iint_S \vec{E}\cdot d\vec{S}$

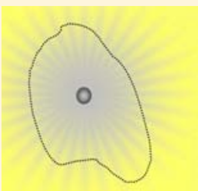
cerrada $\Phi_E = \oiint_S \vec{E}\cdot d\vec{S}$

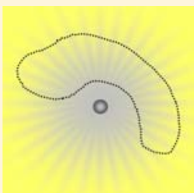
Unidades en el S.I. $\frac{N}{C}\cdot m^2 = J\cdot\frac{m}{C}$

Ley de Gauss

$$\Phi_{neto} = \oiint \vec{E}\cdot d\vec{S} = \frac{Q_{int}}{\varepsilon_0}$$

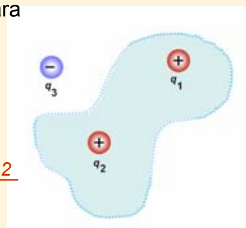
1. **El flujo eléctrico es proporcional a la carga neta encerrada por la superficie. Las cargas exteriores no contribuyen al flujo eléctrico.**
2. **El flujo eléctrico se calcula a través de una superficie cerrada *cualquiera*** (*superficie gaussiana*), **es decir, el flujo no depende de la forma de la superficie.**
3. **El flujo eléctrico no depende de cómo esté distribuida la carga en el interior de la superficie cerrada.**





La Ley de Gauss es válida para todas las superficies y distribuciones de carga

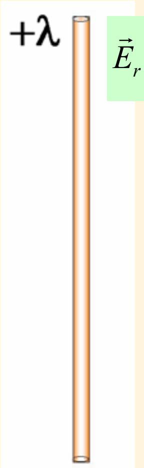
$$\Phi_{neto} = \frac{q_1 + q_2}{\varepsilon_0}$$



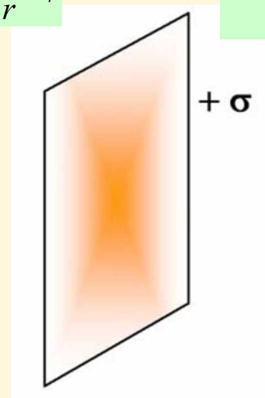
La Ley de Gauss es una herramienta muy potente para el cálculo del flujo eléctrico y, sobre todo, para el cálculo de intensidades de campo cuando las cargas que lo crean tienen un alto grado de simetría.

Aplicaciones de la Ley de Gauss

1. A partir de la simetría de la distribución de carga, determinar la dirección del campo eléctrico
2. Elegir una superficie cerrada apropiada para calcular el flujo
3. Determinar la carga que hay en el interior de la superficie cerrada
4. Aplicar el teorema de Gauss y despejar el módulo del campo eléctrico



$$\vec{E}_r = 2\mathrm{k}_0 \frac{\lambda}{r}\vec{u}_r$$

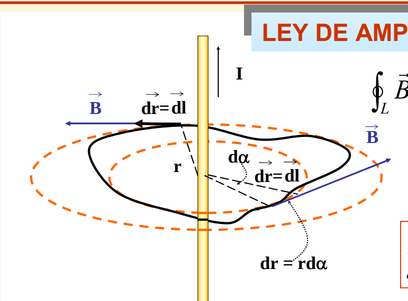


$$\vec{E} = \frac{\sigma}{2\varepsilon_o}\vec{u}$$

$$r \le R \qquad \vec{E} = \mathrm{k_o}\frac{Q_{\text{int}}}{r^2}\vec{u} = \frac{\rho}{3\varepsilon_o} r\vec{u}$$

$$r \ge R \qquad \vec{E} = \mathrm{k_o}\frac{Q}{r^2}\vec{u} = \frac{\rho}{3\varepsilon_o}\frac{R^3}{r^2}\vec{u}$$

LEY DE AMPÈRE. APLICACIONES



$$dr = rd\alpha$$

$$\oint_L \vec{B}\cdot d\vec{l} = \oint_L \vec{B}\cdot d\vec{r} = \frac{\mu_0}{2\pi}\oint_L \frac{I}{r}\vec{u}_r \cdot d\vec{r} = \frac{\mu_0}{2\pi}\oint_L \frac{I}{r} r\, d\alpha$$

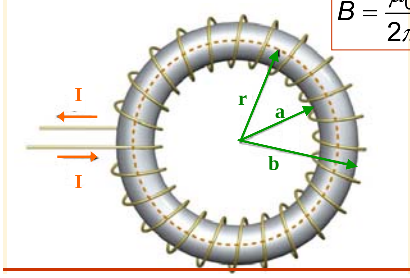
$$B = \frac{\mu_o}{2\pi}\frac{I}{r}\vec{u}_r \qquad = \frac{\mu_o}{2\pi} I \int_0^{2\pi} d\alpha = \frac{\mu_o}{2\pi} I 2\pi$$

$$\boxed{\oint_L \vec{B}\cdot d\vec{l} = \mu_0 I}$$

Ley de Ampère: La circulación del campo magnético a lo largo de cualquier línea cerrada es proporcional a la intensidad neta de corriente que atraviesa la superficie que delimita.

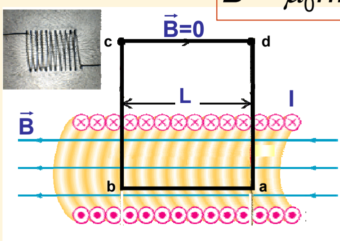
☒ *Campo magnético CREADO por un toroide*

$$\boxed{B = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{NI}{r}}$$

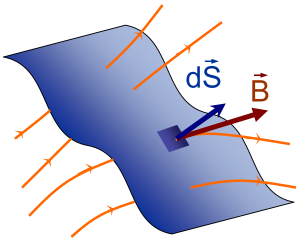


☒ *Campo magnético CREADO por un solenoide*

$$\boxed{B = \mu_0 n I}$$



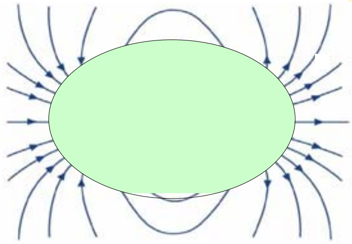
FLUJO MAGNÉTICO. LEY DE GAUSS PARA EL CAMPO MAGNÉTICO



$$\Phi = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

Ley de Gauss para el campo magnético

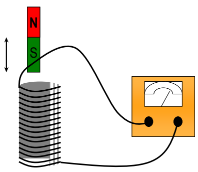
$$\oint\!\!\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

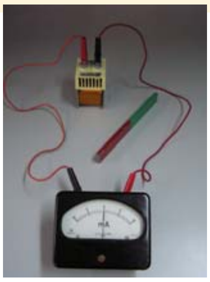


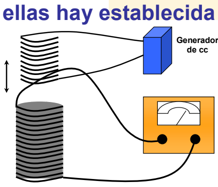
El flujo magnético a través de una superficie cerrada cualquiera es cero

FENÓMENOS DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA. LEY DE FARADAY Y LENZ

Se establece una corriente en un circuito siempre que haya un movimiento relativo entre el imán y la espira, o entre las dos espira (en una de ellas hay establecida una corriente)







El elemento común en estas experiencias es un flujo magnético cambiante a través de la bobina donde se induce la fuerza electromotriz

Ley de Faraday: La magnitud de la fem inducida en un circuito es directamente proporcional a la tasa de cambio en el tiempo del flujo magnético a través del circuito

$$|\varepsilon| = \frac{d\phi_m}{dt} = \frac{d}{dt}\iint_s \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

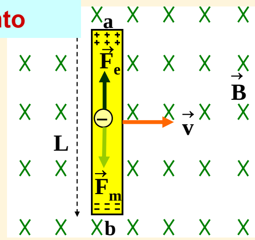
Ley de Lenz: La fem inducida en un circuito tiene un sentido tal que se opone a las causas que la ocasionan.

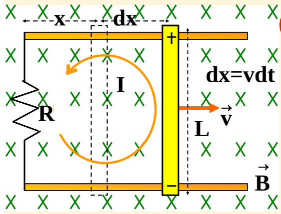
$$\varepsilon = -\frac{d\phi_m}{dt} = -\frac{d}{dt}\iint_s \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

Fuerza electromotriz debida al movimiento

(A) Varilla conductora móvil en un campo magnético

- La fuerza magnética desplaza los electrones
- Equilibrio entre la fuerza magnética y la fuerza eléctrica
- La diferencia de potencial entre los extremos de la varilla coincide con la fem inducida $V_{ab} = [\varepsilon] = vBL$





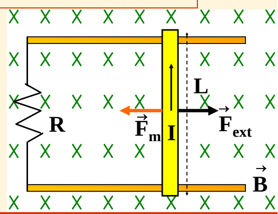
(B) Varilla conductora móvil que forma un circuito

- Se induce una corriente en el sentido antihorario alrededor del circuito
- La varilla en movimiento se encuentra en "equilibrio dinámico" y se convierte en una fuente de fem, con la carga desplazándose de menor a mayor potencial dentro de ella

$$|\varepsilon| = \frac{d\phi_m}{dt} = vBL \qquad \varepsilon = \oint \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\int_L \left(\vec{v}\times\vec{B}\right)\cdot d\vec{l} = vBL$$

(C) Trabajo y energía del proceso: Estudio energético

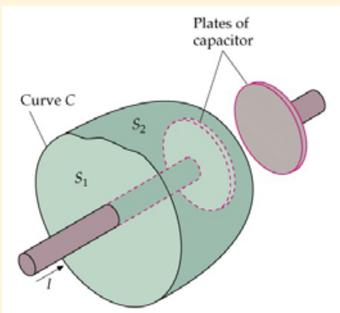
- Potencia entregada $P = \vec{F}_{ext}\vec{v} = ILBv = \frac{vBL}{R}LBv = \frac{(vBL)^2}{R}$
- Potencia disipada en R $P_R = I^2R = \left(\frac{vBL}{R}\right)^2 R = \frac{(vBL)^2}{R}$



Corriente de Desplazamiento. Ley de Ampère-Maxwell

Corriente de desplazamiento de Maxwell

$$I_d = \varepsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt}$$



Un campo eléctrico variable produce un campo magnético cuya circulación a lo largo de una curva cerrada es proporcional a la variación del flujo eléctrico por unidad de tiempo a través de la superficie delimitada por la curva

Forma generalizada de la ley de Ampère

$$\oint \vec{B}\cdot d\vec{l} = \mu_0\left(I + \varepsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt}\right)$$

Ecuaciones de Maxwell

Ley de Gauss
Relaciona el campo eléctrico con las cargas que lo crean.

$$\phi_E = \oint_S \vec{E}\cdot d\vec{S} = \frac{Q_{int}}{\varepsilon_0}$$

Ley de Gauss del magnetismo
Las líneas de campo magnético son cerradas.

$$\phi_B = \oint_S \vec{B}\cdot d\vec{S} = 0$$

Ley de Ampère-Maxwell
Una corriente o un campo eléctrico variable crean un campo magnético.

$$\oint \vec{B}\cdot d\vec{l} = \mu_0\left(I + \varepsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt}\right)$$

Ley de Faraday
Un campo magnético variable crea un campo eléctrico.

$$\oint \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt}\int_S \vec{B}\cdot d\vec{S}$$

Fuerza de Lorentz

Da la fuerza que actúa sobre en cuerpo en función de su carga.

$$\vec{F} = q\left(\vec{E} + \vec{v}\times\vec{B}\right)$$