1. Carga eléctrica
2. Interacción eléctrica (Ley de Coulomb)
3. Campo Eléctrico
4. Potencial y diferencia de potencial
5. Relación entre campo eléctrico y potencial eléctrico
6. Dipolo eléctrico
7. Movimiento de cargas en campos eléctricos

Tema 1: Efectos eléctricos de cargas puntuales

1

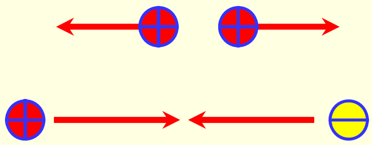
Introducción

- Los griegos son los primeros que observaron los fenómenos eléctricos y magnéticos (ámbar y magnetita)
- En el S:XIX se descubre que la electricidad y el magnetismo son 2 fenómenos relacionados:
  - Experimento de Oersted (1820) → la aguja de una brújula se desvía cuando está cerca de una corriente
  - Experimento de Faraday-Henry (1831) → aparece una corriente en un conductor circular cuando se mueve cerca de un imán

2

Carga eléctrica

Dos tipos de interacción:
- atracción y repulsión (en gravitación sólo hay atracción)



"Toda porción de materia está caracterizada por dos propiedades fundamentales: masa y carga."

Fuerza eléctrica >>>Gravedad
¿Por qué apreciamos la gravedad?

3

Carga Eléctrica

Unidad de la carga eléctrica en el Sistema Internacional de Unidades (S.I.):

Culombio (C)

CUANTIZACIÓN DE LA CARGA ELÉCTRICA *(empírico)*
La carga eléctrica aparece siempre como múltiplo de una carga fundamental (cuanto eléctrico), cuyo valor es:

$$e = 1{,}602177 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C}$$

que es la carga del electrón en módulo.

(Nota: los quarks tienen carga (2e)/3 , e/3 pero no se presentan aislados)

4

Carga Eléctrica

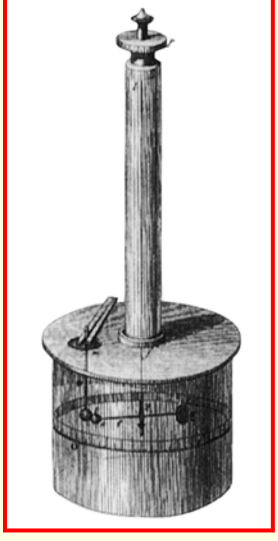
PRINCIPIO DE CONSERVACIÓN DE LA CARGA ELÉCTRICA *(empírico)*

En todos los procesos observados en la Naturaleza, la carga neta o total de un sistema aislado permanece constante.

5

Interacción eléctrica (Ley de Coulomb)

- Este dispositivo (balanza de torsión) es el que que utilizó Charles Auguste de Coulomb (1736-1806) para medir por primera vez la fuerza eléctrica.



6

Interacción eléctrica (Ley de Coulomb)

- Ley de Coulomb (fuerza electrostática entre 2 cargas puntuales)

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

$$\vec{u}_r = \frac{\vec{r}_{1,2}}{|\vec{r}_{1,2}|}$$

vector unitario

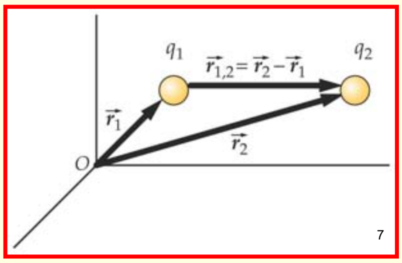
k: constante eléctrica

k = 9·10^9 N·m^2/C^2

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

ε_0: permitividad del vacío

ε_0 = 8,85·10^{-12} C^2/N·m^2



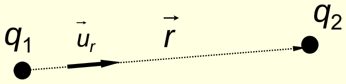
7

Interacción eléctrica (Ley de Coulomb)

Ejercicio/

Calcula la fuerza eléctrica entre dos cargas de 1 C situadas a 1 m de distancia.

$$\vec{\mathbf{F}} = k\frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}\vec{\mathbf{u}}_\mathbf{r}$$



$$\boxed{F = K\frac{1 \cdot 1}{1^2} = 9 \cdot 10^9\ N}$$

(es el peso de 12 millones de personas de 75 kg)!!

1 C es una carga enorme !!

8

Interacción eléctrica (Ley de Coulomb)

Cuando queremos calcular la fuerza ejercida sobre una carga q_0 por un conjunto de *n* cargas puntuales q_i utilizaremos el

PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN: la fuerza resultante sobre q_0 es la suma vectorial de las fuerzas individuales ejercidas por cada carga q_i sobre la carga q_0 .

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^{n} F_i = Kq_0 \sum_{i=1}^{n} \frac{q_i}{r_i{}^2} \cdot \vec{u}_i$$

Donde $\vec{u}_i$ es el vector unitario en la dirección del vector que une la posición de la carga q_i con q_0, que está separada una distancia r_i de q_i.

9

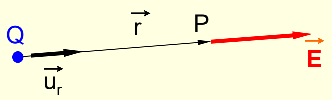
Campo Eléctrico

Definición: $\vec{\mathbf{E}} = \dfrac{\vec{\mathbf{F}}}{q_0}$ por tanto $\vec{F} = q_0 \vec{E}$

q_0*: carga de prueba*

Unidad del campo eléctrico en el Sistema Internacional de Unidades (S.I.): N/C

Expresión del campo para el caso de carga puntual



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

10

Campo Eléctrico

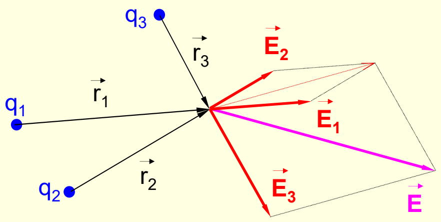
ALGUNOS CAMPOS ELÉCTRICOS DE LA NATURALEZA

	E (N/C)
En los cables domésticos	10^{-2}
En las ondas de radio	10^{-1}
En la atmósfera	10^{2}
En la luz solar	10^{3}
Bajo una nube tormentosa	10^{4}
En la descarga de un relámpago	10^{4}
En un tubo de rayos X	10^{6}
En el electrón de un átomo de hidrógeno	$6\cdot10^{11}$
En la superficie de un núcleo de uranio	$2\cdot10^{21}$

11

Campo Eléctrico

Ppo. de Superposición (varias cargas puntuales)



$$\vec{E} = \sum \vec{E}_i = \sum_i \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_i}{r_i^2}\vec{u}_{r_i}$$

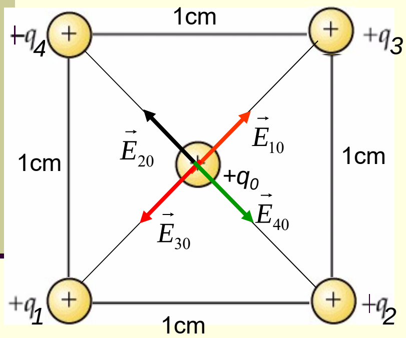
Podemos asociar una nueva propiedad a cada punto (x,y,z) del espacio, **el campo eléctrico**, independientemente de que coloquemos o no la carga q_0

$$\vec{E}(x,y,z) = E_x\vec{i} + E_y\vec{j} + E_z\vec{k}$$

12

Campo Eléctrico

Ejercicio/ *Dada la siguiente situación de las cargas, separadas 1 cm entre ellas, determinar la fuerza ejercida por las cargas sobre q_0.*



q_1: (0,0) q_2: (1,0)

q_3: (1,1) q_4: (0,1) q_0: (1/2,1/2)

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

n = 4

$$\vec{\mathbf{E}} = \sum \vec{\mathbf{E}}_i = \sum_i K\frac{q_i}{r_i^2}\vec{\mathbf{u}}_{\mathbf{r}_i}$$

p.e. cálculo de E_{10}

$$\vec{E}_{10} = K\frac{q_1}{r_{10}^2}\vec{\mathrm{u}}_{\mathrm{r}10}$$

$$\vec{r}_{10} = \vec{r}_0 - \vec{r}_1 = (0.5\vec{i} + 0.5\vec{j}) - (0\vec{i} + 0\vec{j}) = 0.5\vec{i} + 0.5\vec{j}$$

$$r_{10} = |\vec{r}_{10}| = \sqrt{(0.5)^2 + (0.5)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.7$$

$$\vec{u}_{r10} = \frac{\vec{r}_{10}}{r_{10}} = \frac{0.5\vec{i} + 0.5\vec{j}}{1/\sqrt{2}} = \frac{\vec{i}}{\sqrt{2}} + \frac{\vec{j}}{\sqrt{2}}$$

$$\vec{E}_{10} = 9\cdot10^9\,\frac{q_1}{1/2}\left(\frac{\vec{i}}{\sqrt{2}} + \frac{\vec{j}}{\sqrt{2}}\right)\ \mathrm{N/C}$$

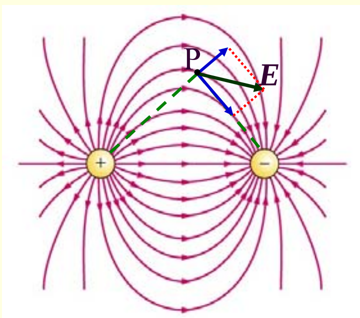
13

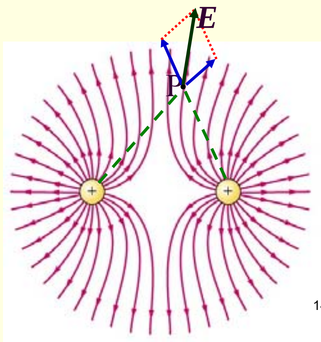
Campo Eléctrico

LÍNEAS DE CAMPO ELÉCTRICO

Definición: línea tangente al campo eléctrico en cada punto.

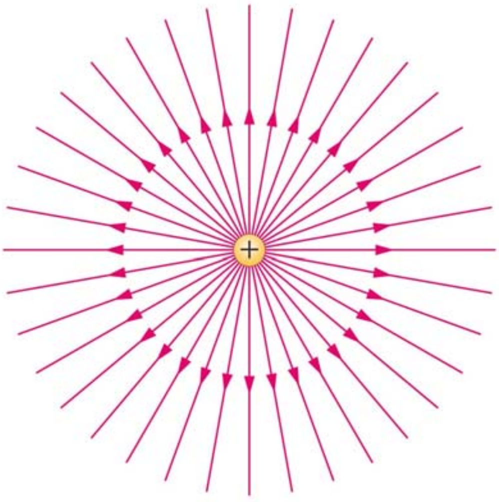
Sirven para dar una idea geométrica rápida y directa de la dirección y sentido del campo eléctrico en cada punto del espacio.

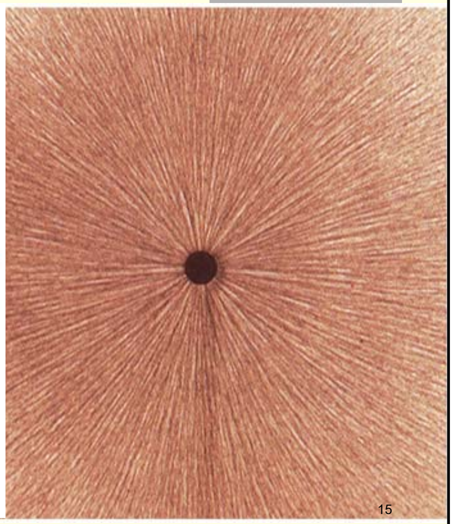




14

Campo Eléctrico

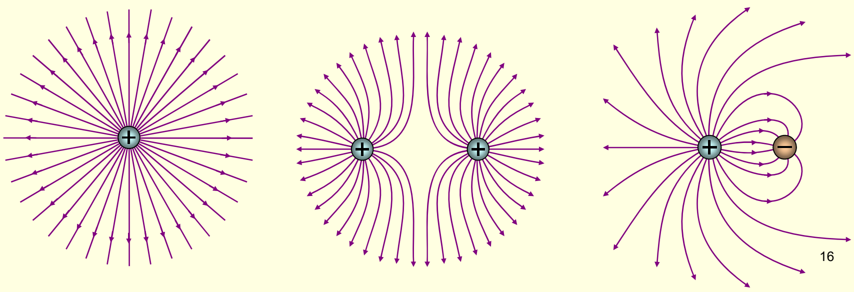




Campo eléctrico

LÍNEAS DE CAMPO ELÉCTRICO. Reglas:

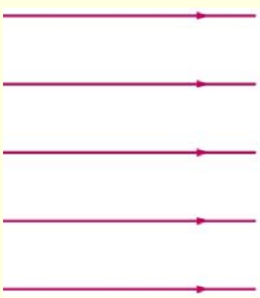
1º) sentido de + hacia -
2º) simétricas
3º) número líneas = proporcional a Q creadora de
4º) densidad de líneas = proporcional al módulo de $\vec{E}$
5º) líneas de campo no se cortan

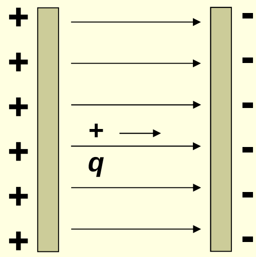


Campo Eléctrico

LÍNEAS DE CAMPO ELÉCTRICO.

Campo uniforme: igual intensidad, dirección y sentido en todos los puntos del espacio

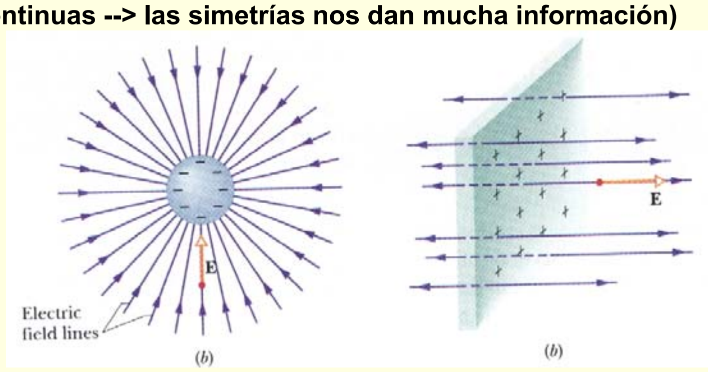




17

Campo Eléctrico

LÍNEAS DE CAMPO ELÉCTRICO.
en esferas y planos (no son cargas puntuales sino distribuciones continuas --> las simetrías nos dan mucha información)



Esfera con carga negativa

Simetría esférica

Plano positivo

Simetría planar

18

Potencial y diferencia de potencial

Teníamos:
Intensidad de campo eléctrico $\vec{\mathbf{E}} = \dfrac{\vec{\mathbf{F}}}{q_0}$

q_0: carga de prueba

Definimos: POTENCIAL ELÉCTRICO.

$$V = \frac{U}{q_0}$$

q_0: carga de prueba

ESCALAR: no es un vector!

Donde U es la energía potencial eléctrica que tiene la carga q_0

Unidad del potencial eléctrico en el Sistema Internacional de Unidades (S.I.): J/C = Voltio (V)

19

Potencial y diferencia de potencial

Solo las diferencias de potencial o diferencias de energía potencial tienen sentido físico.

Podemos hablar de potencial en un punto concreto del espacio o energía potencial de una determinada carga, si previamente hemos definido un origen de potenciales o de energía potencial.

ENERGÍA POTENCIAL ELÉCTRICA.

La variación de energía potencial es igual al trabajo realizado por la fuerza conservativa **cambiado de signo**”

$$\Delta U = U_b - U_a = -W = -\int_a^b \vec{F} \cdot d\vec{l} = Kq_0Q\left(\frac{1}{r_b} - \frac{1}{r_a}\right)$$

Expresión que proporciona la diferencia de energía potencial eléctrica de la carga q_0 entre los puntos a (situación inicial) y b (situación final), siendo r_a y r_b las distancias desde la carga Q hasta los puntos a y b, respectivamente.

20

Potencial y diferencia de potencial

Ver apéndice 1: obtención de la expresión del trabajo realizado por la fuerza eléctrica para llevar una carga de prueba q_0 desde un punto a hasta otro b, en presencia de la carga Q.

Para una carga puntual Q, el origen de energía se toma en el infinito. Entonces la energía de q_0 en un punto que dista r de Q es:

$$U_{ref} = 0 \quad \text{para} \quad \mathrm{r_{ref}} = \infty \quad \Rightarrow \quad \boxed{U = Kq_0 Q \frac{1}{r}}$$

De la misma forma el potencial que crea Q en dicho punto es:

$$\boxed{V = \frac{U}{q_0} = KQ\frac{1}{r}}$$

Con: $V_{ref} = 0 \quad \text{para} \quad \mathrm{r_{ref}} = \infty$

21

Potencial y diferencia de potencial

POTENCIAL ELÉCTRICO.

Ppo. de Superposición (varias cargas puntuales)

Potencial creado por *n* cargas puntuales $V = \sum V_i = \sum_i K\frac{Q_i}{r_i}$

Podemos asociar una nueva propiedad a cada punto (x,y,z) del espacio, **el potencial eléctrico** , V(x,y,z) , independientemente de que coloquemos o no la carga q_0

La diferencia de potencial entre dos puntos 1 y 2 está relacionada con el trabajo *W* realizado por el campo eléctrico al desplazar una carga de prueba q_0 del punto 1 al 2:

$$W = \int_1^2 \vec{F}.d\vec{r} = q_0 \int_1^2 \vec{E}.d\vec{r} = q_0(V_2 - V_1) = -\Delta U \qquad U = q_0 V$$

22

Relación entre potencial y campo eléctrico

$$U_P = -\int_{\infty}^{P} \vec{F} \cdot d\vec{l} = -W$$

$$U = q_0 V \qquad \vec{F} = q_0 \vec{E}$$

$$\boxed{V_P = \frac{U_P}{q_0} = -\int_{\infty}^{P} \vec{E} \cdot d\vec{l}}$$

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

$$V(x,y,z) \longrightarrow dV(x,y,z)$$

Calculamos el diferencial (derivadas parciales)

$$dV = \frac{\partial V}{\partial x} dx + \frac{\partial V}{\partial y} dy + \frac{\partial V}{\partial z} dz = \underbrace{\left(\frac{\partial V}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial V}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial V}{\partial z} \vec{k} \right)}_{-\vec{E}} \cdot \underbrace{\left(dx\, \vec{i} + dy\, \vec{j} + dz\, \vec{k} \right)}_{d\vec{l}}$$

23

Relación entre potencial y campo eléctrico

$$dV = \frac{\partial V}{\partial x} dx + \frac{\partial V}{\partial y} dy + \frac{\partial V}{\partial z} dz = \underbrace{\left(\frac{\partial V}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial V}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial V}{\partial z} \vec{k} \right)}_{-\vec{E}} \cdot \underbrace{\left(dx\, \vec{i} + dy\, \vec{j} + dz\, \vec{k} \right)}_{d\vec{l}}$$

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

gradiente del potencial

operador nabla $\quad \vec{\nabla} \equiv \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}$

24

Relación entre potencial y campo eléctrico

$$\boxed{V_P = -\int_{\infty}^{P} \vec{E} \cdot d\vec{l}}$$

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

En general, es más fácil calcular el potencial eléctrico (escalar), y también es más fácil derivar que integrar.

Si V(x) ➡ $\vec{E} = -\dfrac{dV}{dx}\vec{i}$

Si V(r) ➡ $\vec{E} = -\dfrac{dV}{dr}\vec{u}_r$

25

Superficies Equipotenciales

SUPERFICIES EQUIPOTENCIALES: Puntos en los cuales el potencial permanece constante

Si $V = cte \Rightarrow dV = 0$ **como** $dV = -\vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$

$\Rightarrow d\vec{l} \perp \vec{E}$ **El campo eléctrico siempre es perpendicular a las superficies equipotenciales.**

$\Rightarrow W = 0$ **Si movemos una carga de prueba por una superficie equipotencial la fuerza eléctrica no realiza trabajo**

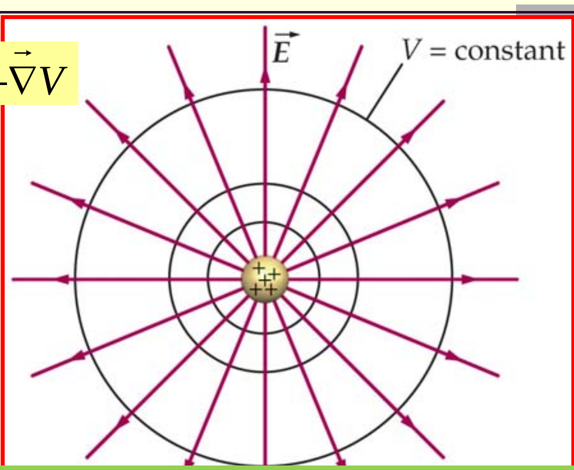
Como $\vec{E} = -\vec{\nabla} V$ **el signo negativo nos indica que:**

El sentido del campo es contrario al crecimiento del potencial

26

Superficies Equipotenciales

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



$$V = KQ\frac{1}{r}$$

Pregunta:

¿Cómo son las superficies equipotenciales en un campo uniforme?

27

Ejercicio/ *Obtener el campo eléctrico creado por una carga puntual a partir de la expresión del potencial eléctrico.*

$$V = KQ\frac{1}{r}$$

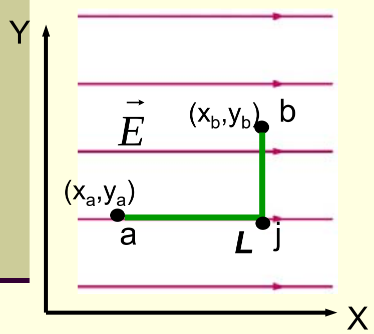
$$\boxed{\vec{E} = -\vec{\nabla} V} \qquad \vec{E} = -\frac{\partial V}{\partial r}\vec{u}_r$$

$$\vec{E} = -\frac{\partial (KQ/r)}{\partial r}\vec{u}_r = -KQ\frac{\partial (1/r)}{\partial r}\vec{u}_r = -KQ\frac{-1}{r^2}\vec{u}_r$$

$$\boxed{\vec{E} = KQ\frac{1}{r^2}\vec{u}_r}$$

28

Ejercicio/ *Calcula la diferencia de potencial entre dos puntos situados en un campo eléctrico uniforme.*



$$\vec{E} = E\,\vec{i}$$

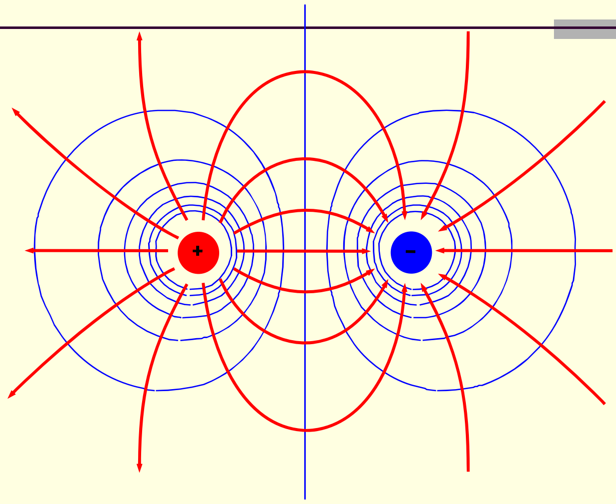
$$\Delta V_{a\to b} = -\int_L \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\int_a^j \vec{E}\cdot d\vec{l} - \int_j^b \vec{E}\cdot d\vec{l} =$$

$$= -\int_a^j \left(E\,\vec{i}\right)\cdot\left(dx\,\vec{i}\right) = -E\int_a^j dx =$$

$$= -E\left(x_b - x_a\right) = -E\Delta x$$

29

Dipolo Eléctrico

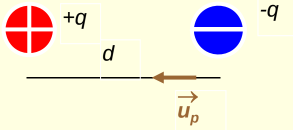


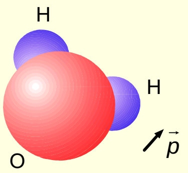
configuración de carga muy importante

30

Dipolo Eléctrico

Formado por dos cargas iguales y de signo opuesto, separadas una distancia ***d***, y fijas entre sí.





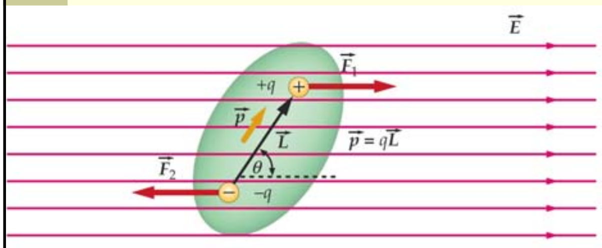
momento dipolar eléctrico $\boxed{\vec{p} = qd\,\vec{u}_p}$

muy importante para las propiedades eléctricas de los materiales aislantes, antenas, cristales líquidos,...

31

Dipolo Eléctrico

- **Dipolo en inmerso en un campo eléctrico**



Momento que aparece sobre el dipolo:

$$\boxed{\vec{\tau} = \vec{p} \wedge \vec{E}}$$

Energía del dipolo: $\boxed{U_{dipolo} = -\vec{p}\cdot\vec{E}}$

La deducción de ambas expresiones se encuentra en el apéndice 2

32

Movimiento de cargas en campos eléctricos

Si a una partícula cargada se le aplica un campo eléctrico:

2da ley de Newton

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

Fuerza Eléctrica

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

$$q\vec{E} = m\vec{a}$$

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

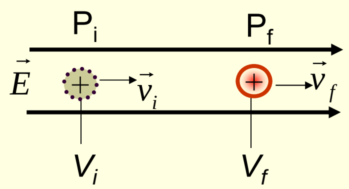
Si ***E*** es uniforme, ***a*** = cte.

33

Movimiento de cargas en campos eléctricos

La energía total de una partícula cargada, de masa ***m*** carga ***q*** que se mueve en presencia de un campo ***E***

$$E_T = E_c + U = \frac{1}{2}mv^2 + qV$$

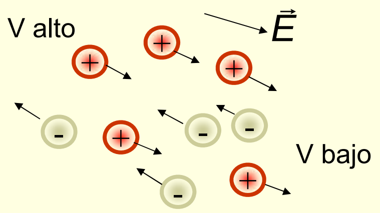


Principio de conservación de la energía

$$E_T(P_i) = E_T(P_f)$$

$$\frac{1}{2}mv_i^2 + qV_i = \frac{1}{2}mv_f^2 + qV_f$$

$$\frac{1}{2}m(v_f^2 - v_i^2) = q(V_i - V_f)$$

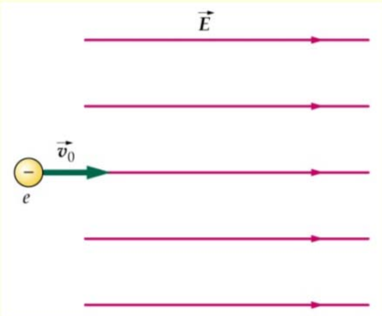


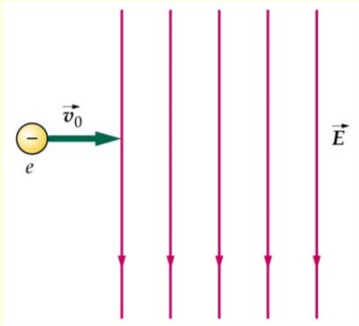
una partícula libre tiende hacia el estado de mínima energía potencial

34

Movimiento de cargas en campos eléctricos

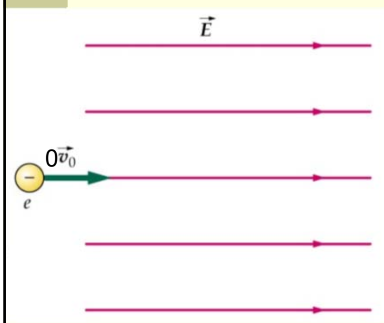
Ejercicio/ *a) Calcula las ecuaciones de movimiento del electrón en las dos situaciones que te mostramos en las figuras.*
b) Calcula la variación de energía cinética y de energía potencial del electrón en ambas figuras. ¿Se cumple el Ppo. de Conservación de la energía?





35

Movimiento de cargas en campos eléctricos



$$qE = ma_x \; ; \; a_x = \frac{-eE}{m}$$ M.U.A.

$$v_x = v_{0x} + a_x t \; ; \; v_x = v_0 - \frac{eE}{m} t$$

$$x = x_0 + v_{0x} t + \frac{1}{2} a_x t^2 ; x = v_0 t - \frac{eE}{2m} t^2$$

frenado

X $$0 = v_0 - \frac{eE}{m} t \; ; \; t = \frac{mv_0}{eE}$$

$$x = v_0 t - \frac{eE}{2m} t^2 \quad x = v_0 \frac{mv_0}{eE} - \frac{eE}{2m} \left(\frac{mv_0}{eE} \right)^2$$

$$x = \frac{mv_0^{\;2}}{eE} - \frac{mv_0^{\;2}}{2eE} = \frac{mv_0^{\;2}}{2eE}$$

36

Movimiento de cargas en campos eléctricos

Ejercicio/ *Disponemos de una carga fija de 1 μC y masa 5 g. Otra carga de 1nC y 100 μg de masa se lanza contra la primera a una velocidad de 1000 m/s desde un punto muy alejado, donde los efectos eléctricos son despreciables. Determina a qué distancia de la primera carga se para la segunda. ¿Pueden despreciarse los efectos gravitatorios entre las cargas en la resolución del problema?*

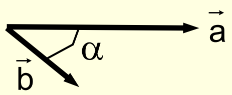
37

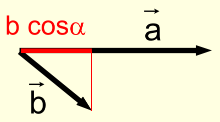
Apéndice 1: trabajo realizado por la fuerza eléctrica para llevar una carga de prueba q_0 desde un punto a hasta otro b, en presencia de la carga Q.

Trabajo realizado por la fuerza eléctrica al desplazar una carga q_0

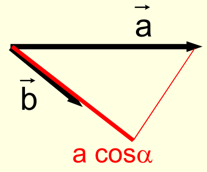
$$W = \int_a^b \vec{F} \cdot d\vec{l}$$ Julio (J) Unidad en el S.I.

producto escalar (repaso):





proyección



$$\vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}||\vec{b}| \cos\alpha =$$

$$= \left(a_x \vec{i} + a_y \vec{j} + a_z \vec{k}\right)\left(b_x \vec{i} + b_y \vec{j} + b_z \vec{k}\right) =$$

$$= a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z$$

38

Apéndice 1: trabajo realizado por la fuerza eléctrica para llevar una carga de prueba q_0 desde un punto a hasta otro b, en presencia de la carga Q.

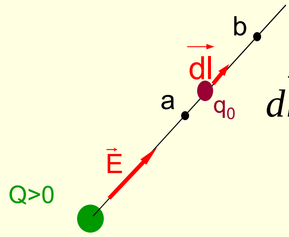
Camino radial

$$W = \int_a^b \vec{F}\cdot d\vec{l} = q_0 \int \vec{E}\cdot d\vec{l} = q_0 \int \left(K\frac{Q}{r^2}\vec{u}_r \right)\cdot\left(dr\,\vec{u}_r \right) = Kq_0Q\int_a^b \frac{dr}{r^2} =$$

integral de línea (o de camino)

$$= Kq_0Q\left[\frac{-1}{r}\right]_a^b = Kq_0Q\left(\frac{-1}{r_b} - \frac{-1}{r_a}\right)$$

$$dW = \vec{F}\cdot d\vec{l}$$



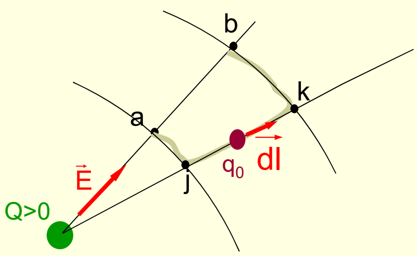
$$d\vec{l} = dr\,\vec{u}_r$$

39

Apéndice 1: trabajo realizado por la fuerza eléctrica para llevar una carga de prueba q_0 desde un punto a hasta otro b, en presencia de la carga Q.

Camino compuesto (circular y radial)

$$W = \int_a^b \vec{F}\cdot d\vec{l} = \int_a^j \vec{F}\cdot d\vec{l} + \int_j^k \vec{F}\cdot d\vec{l} + \int_k^b \vec{F}\cdot d\vec{l} = q_0\int_j^k \vec{E}\cdot d\vec{l} = \mathrm{K}q_0Q\left(\frac{-1}{r_b} - \frac{-1}{r_a}\right)$$

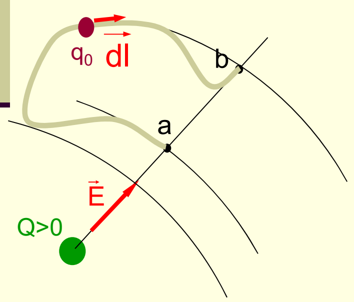


40

Apéndice 1: trabajo realizado por la fuerza eléctrica para llevar una carga de prueba q_0 desde un punto a hasta otro b, en presencia de la carga Q.

Cualquier camino: $$W = \int_a^b \vec{F}\cdot d\vec{l} = \mathrm{K} q_0 Q\left(\frac{-1}{r_b} - \frac{-1}{r_a}\right)$$

W sólo depende de la posición inicial y final
--> fuerza eléctrica es **conservativa**



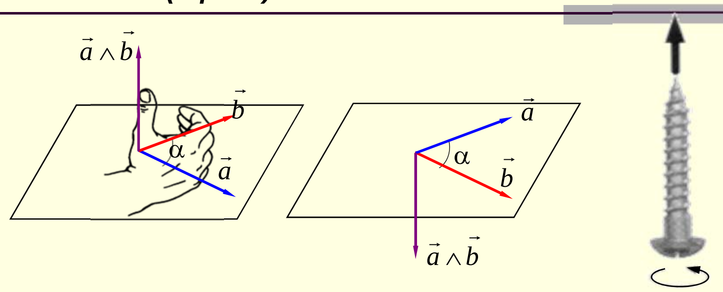
podemos definir una energía asociada a la posición
--> energía potencial eléctrica **U**

$$\Delta U = U_b - U_a = -\int_a^b \vec{F}\cdot d\vec{l} = -W$$

41

Apéndice 2: Momento y energía de un dipolo inmerso en un campo eléctrico

producto vectorial (repaso):



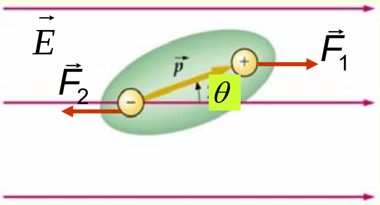
$$\vec{a}\wedge\vec{b} = \left|\vec{a}\wedge\vec{b}\right|\vec{u}_{\vec{a}\wedge\vec{b}} = \left(|\vec{a}||\vec{b}|sen\,\alpha\right)\vec{u}_{\vec{a}\wedge\vec{b}}$$

$$\vec{a}\wedge\vec{b} = \begin{pmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{pmatrix} = \left(a_y b_z - a_z b_y\right)\vec{i} + \left(a_z b_x - a_x b_z\right)\vec{j} + \left(a_x b_y - a_y b_x\right)\vec{k}$$

42

Apéndice 2: Momento y energía de un dipolo inmerso en un campo eléctrico

Dipolo en presencia de un campo eléctrico uniforme:
-fuerza resultante sobre el dipolo.



$$\vec{E} \text{ uniforme} \Rightarrow \vec{E}_1 = \vec{E}_2$$

$$\vec{E} = E\,\vec{i}$$

$$\vec{F}_1 = qE\,\vec{i} \qquad \vec{F}_2 = -qE\,\vec{i}$$

$$\vec{F}_T = \sum_i \vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = 0$$

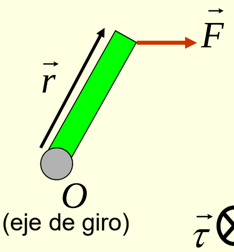
no hay movimiento de traslación

43

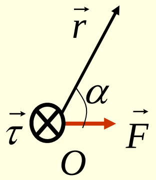
Apéndice 2: Momento y energía de un dipolo inmerso en un campo eléctrico

momento de fuerzas ó torque (repaso):

Expresa la tendencia a girar de un cierto sistema.



$$\boxed{\vec{\tau} = \vec{r} \wedge \vec{F}}$$



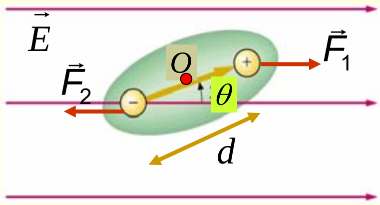
$$|\vec{\tau}| = |\vec{r}||\vec{F}| \operatorname{sen} \alpha$$

⊙ dirección : perpendicular a la pantalla
sentido : hacia fuera

44

Apéndice 2: Momento y energía de un dipolo inmerso en un campo eléctrico

Dipolo en presencia de un campo eléctrico uniforme:
momento de fuerzas sobre el dipolo.



$$\vec{\tau} = \vec{\tau}_1 + \vec{\tau}_2$$

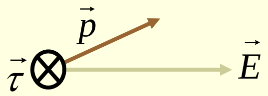
$$\left|\vec{\tau}_1\right| = \left|\vec{r}_1\right|\left|\vec{F}_1\right| \operatorname{sen}\theta = \frac{d}{2} qE \operatorname{sen}\theta \qquad \left|\vec{\tau}_1\right| = \left|\vec{\tau}\right.$$

$\vec{\tau}_1, \vec{\tau}_2$ igual dirección y sentido

$$\left|\vec{\tau}\right| = qd\ E \operatorname{sen}\theta$$

$$\vec{p} = qd\ \vec{u}_p \qquad \boxed{\vec{\tau} = \vec{p} \wedge \vec{E}}$$

¿Cuándo se anula el momento de fuerzas?



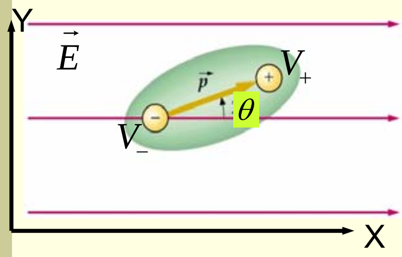
$para\ \ \theta = 0^{\circ}\ \text{y}\ \theta = 180^{\circ}$ $\boxed{\vec{\tau} = 0}$

$\boxed{\vec{p} \parallel \vec{E}}$ posición estable

45

Apéndice 2: Momento y energía de un dipolo inmerso en un campo eléctrico

Dipolo en presencia de un campo eléctrico uniforme:
energía potencial del dipolo.



$$U_{dipolo} = U_{+q} + U_{-q} = q\left(V_+ - V_-\right) = q\ \Delta V$$

$$\Delta V = -E\left(x_+ - x_-\right) = -E\ d\cos\theta$$

$$\vec{p} = qd\ \vec{u}_p$$

$$U_{dipolo} = -q\ Ed\cos\theta = -\vec{p}\cdot\vec{E}$$

$$\boxed{U_{dipolo} = -\vec{p}\cdot\vec{E}}$$

¿Cuándo es mínima la energía potencial del dipolo?

$\boxed{\vec{p} \parallel \vec{E}}$ y en el mismo sentido

46