

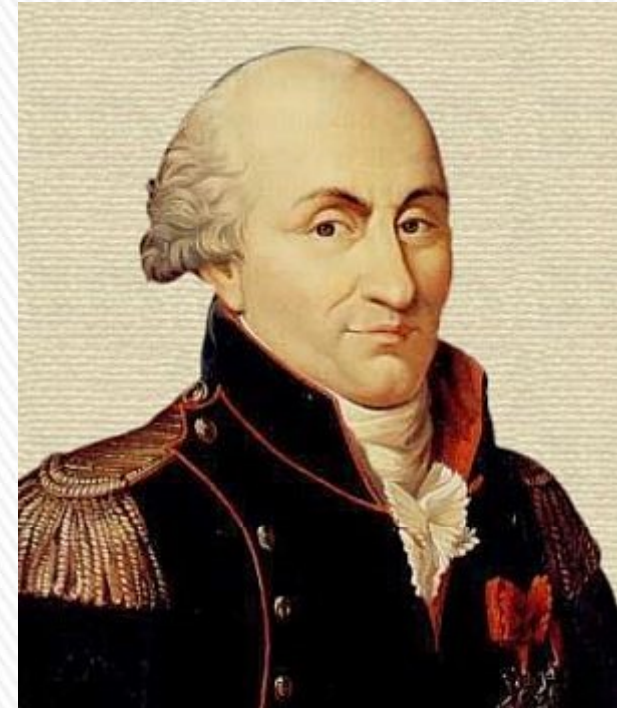
01-CARGAS, FUERZAS Y CAMPO ELÉCTRICO



Benjamin Franklin
(1706-1790)



Henry Cavendish
(1731-1810)



Charles-Agustin de Coulomb
(1736-1806)



CARGA ELÉCTRICA: CONCEPTOS FUNDAMENTALES

La materia posee un atributo, la **carga eléctrica** que se manifiesta a través de una fuerza: la fuerza eléctrica.

La **fuerza electromagnética** es una de las 4 fuerzas fundamentales de la naturaleza

CARGA ELÉCTRICA: dos clases de carga eléctrica (q): *positiva* y *negativa*.

Unidad de la magnitud carga eléctrica en el S.I.: **coulomb (C)**.

Cuantización: la carga eléctrica está cuantizada, siempre se presenta por múltiplos enteros de la **unidad fundamental de carga eléctrica e** .

La carga del electrón es: $-e$, y la del protón es $+e$.

Magnitud de e : **$e = 1,6022 \times 10^{-19} \text{ C}$** ($e \approx 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$)

Para cualquier cuerpo cargado su carga q : $q = N \cdot e$ (N un nro. entero)

Principio de conservación de la carga eléctrica: la carga se conserva, ni se crea ni se destruye.

CONDUCTORES Y AISLANTES

Conductores y aislantes: modelamos materiales como **conductores**, en los que aproximadamente un electrón por átomo posee libertad de movimiento en todo el material, y en **aislantes o dieléctricos** en los que todos los electrones están ligados a los átomos próximos.

Como modelo ideal, un conductor tiene un número infinito de portadores de carga que se pueden mover muy fácilmente.

Vidrio, goma, y madera son materiales aislantes eléctricos.

Cuando estos materiales son frotados sólo la zona frotada se carga, y las partículas con carga no pueden moverse hacia otras zonas del material.

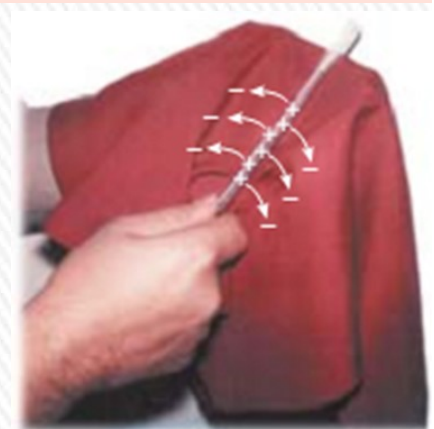
Los metales (plata, cobre, aluminio) son buenos conductores eléctricos.

Cuando están con carga en alguna pequeña zona, la carga se distribuye de inmediato en toda la superficie del material.

Triboelectricidad: electricidad por frotamiento, por contacto se intercambian electrones.

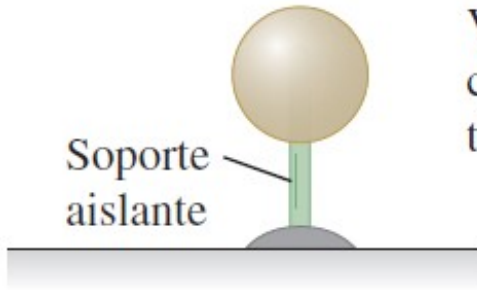
Varilla de vidrio frotada con seda: vidrio pierde electrones que pasan a la seda. Vidrio: $+q$ y seda: $-q$.

Similarmente si frotamos: regla de plástico con el cabello
regla: $-q$ pelo: $+q$



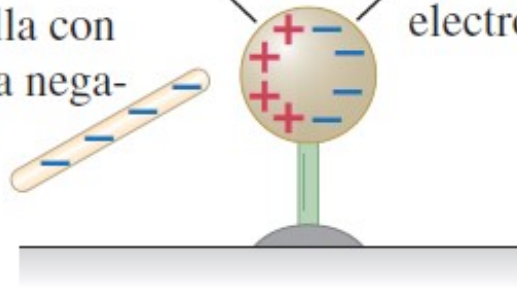
CARGA POR INDUCCIÓN

Esfera metálica
Soporte aislante

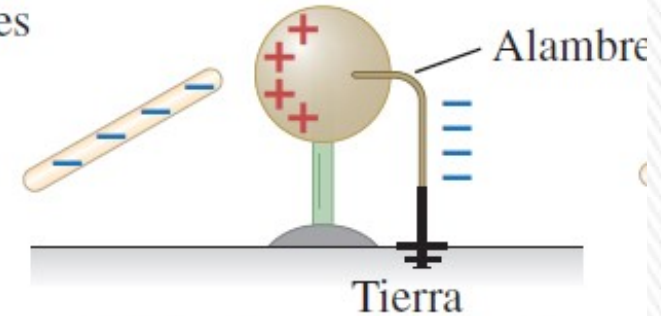


a) Esfera metálica sin carga.

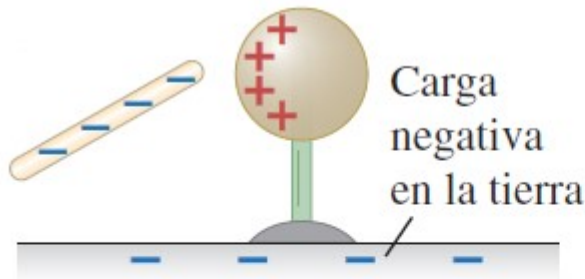
Deficiencia de electrones
Acumulación de electrones
Varilla con carga negativa



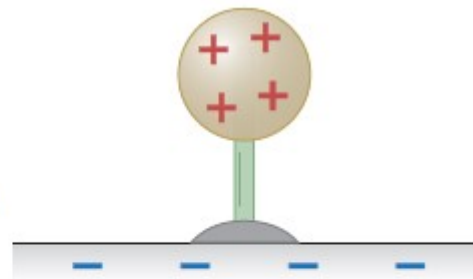
b) La carga negativa en la varilla repele a los electrones, lo que crea zonas de **carga inducida** negativa y positiva.



c) El alambre permite que los electrones acumulados (carga negativa inducida) fluyan hacia la tierra.



d) Se quita el conductor; ahora, la esfera tiene sólo una región con deficiencia de electrones, con carga positiva.



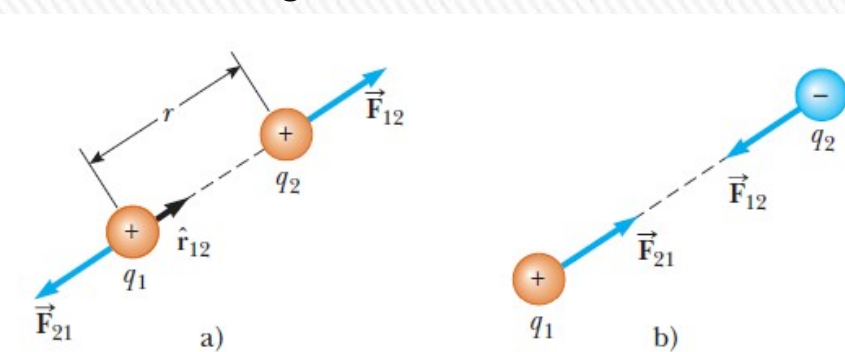
e) Se quita la varilla; los electrones se acomodan por sí solos, y toda la esfera tiene una deficiencia de electrones (carga neta positiva).



LEY DE COULOMB

La magnitud de fuerza eléctrica entre dos cargas puntuales estacionarias es directamente proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa.

La fuerza es de atracción si las cargas son de distinto signo, y de repulsión si son del mismo signo.



$$\vec{F}_{12} = k_E \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}$$

\hat{r} vector unitario que apunta de q_1 a q_2 .
 k_E – constante de Coulomb.

$$k_E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8,987551787 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$$

$$k_E \approx 9,0 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$$

$$\epsilon_0 = 8,854187817 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N}\cdot\text{m}^2) \text{ (permitividad del vacío)}$$

FUERZA COULOMBIANA:

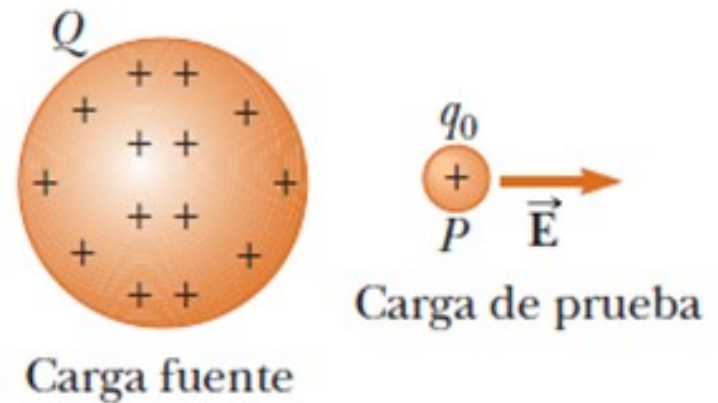
- Es una **fuerza central** y depende del **inverso del cuadrado de la distancia**.
- Se aplica a cargas puntuales y en el vacío; si el medio no es el vacío, la intensidad de la fuerza disminuye; aparece en el denominador un factor mayor a 1 (constante dieléctrica).
- Es una fuerza **conservativa**.
- Cumple con **principios de Acción y Reacción** y con el **de Superposición**.



CAMPO ELÉCTRICO

Existe un **campo eléctrico** en la región del espacio que rodea a un objeto con carga (**carga fuente**).

Cuando otro objeto con carga (**carga de prueba**) entra en este campo, una **fuerza eléctrica** actúa sobre él.



Definición: Campo eléctrico (\vec{E}) en un punto en el espacio es la fuerza eléctrica \vec{F}_E , que actúa sobre una carga de prueba positiva q_0 colocada en ese punto, dividida entre la carga de prueba.

Concepto desarrollado por **Michael Faraday** (1791-1867) en relación con las fuerzas eléctricas.

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

El campo eléctrico es un vector

Unidad de campo eléctrico en SI: newton/coulomb (N/C) o volt/metro (V/m)

\vec{E} es el campo producido por una carga o distribución de cargas sin tener en cuenta el que produce la carga de prueba.

La presencia de una carga de prueba no es necesaria para que el campo exista (sólo sirve como *detector* del campo eléctrico).

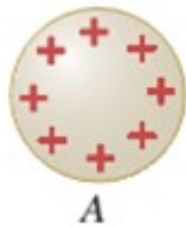
El sentido de \vec{E} , es el de la fuerza que experimenta una carga de prueba positiva cuando es colocada en el campo.

CAMPO ELÉCTRICO

a) Los cuerpos *A* y *B* ejercen fuerzas eléctricas uno sobre el otro.

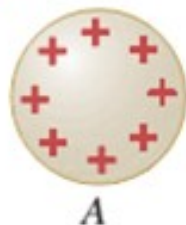


b) Quitemos el cuerpo *B* ...

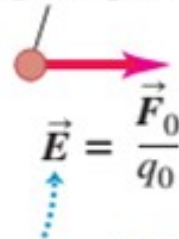


... e indiquemos su posición anterior como *P*.

c) El cuerpo *A* genera un campo eléctrico \vec{E} en el punto *P*.

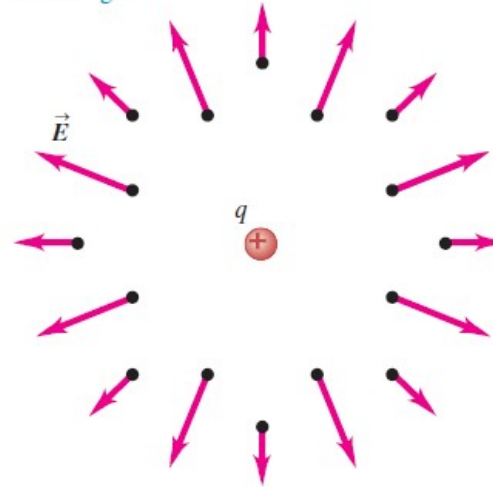


Carga de prueba q_0



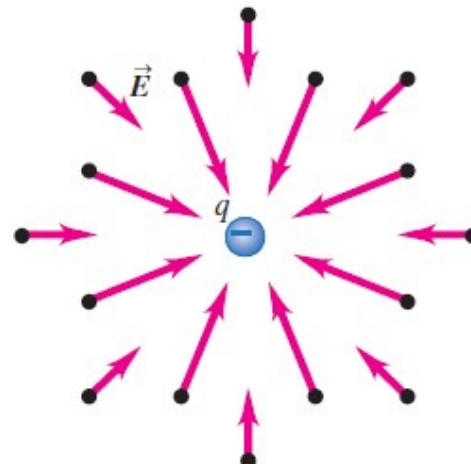
\vec{E} es la fuerza por unidad de carga que el cuerpo *A* ejerce sobre una carga de prueba situada en *P*.

a) El campo producido por una carga puntual positiva apunta en una dirección que se *aleja* de la carga.



Campo creado por una carga positiva

b) El campo producido por una carga puntual negativa apunta *hacia* la carga.



Campo creado por una carga negativa

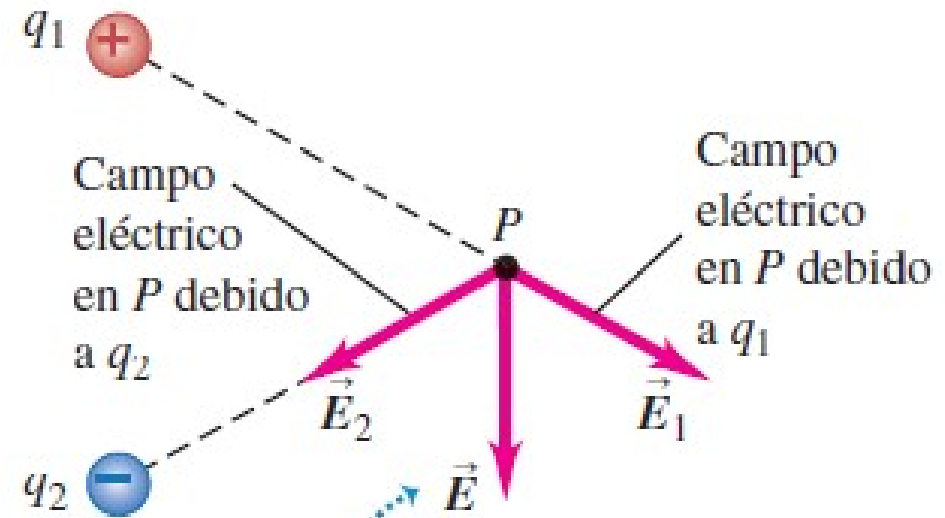


CAMPO ELÉCTRICO - SUPERPOSICIÓN

En cualquier punto P , el campo eléctrico total debido a un grupo de cargas fuente es igual a la suma vectorial de los campos eléctricos de todas las cargas.

$$\vec{E} = k_e \sum_i \frac{q_i}{r_i^2} \hat{r}_i$$

El campo eléctrico \vec{E} experimentado por una carga puntual no depende del valor de esa carga; está determinado por las cargas que producen el campo, no por la carga que lo experimenta.



El campo eléctrico total \vec{E} en el punto P es la suma vectorial de \vec{E}_1 más \vec{E}_2 .



LÍNEAS DE CAMPO ELÉCTRICO

Forma de visualizarlo: **líneas de campo eléctrico**, (Faraday),

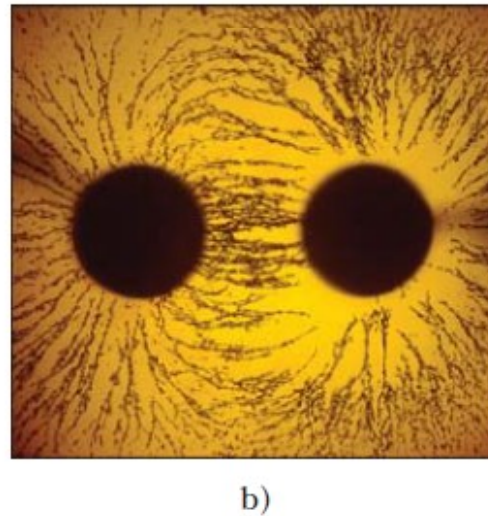
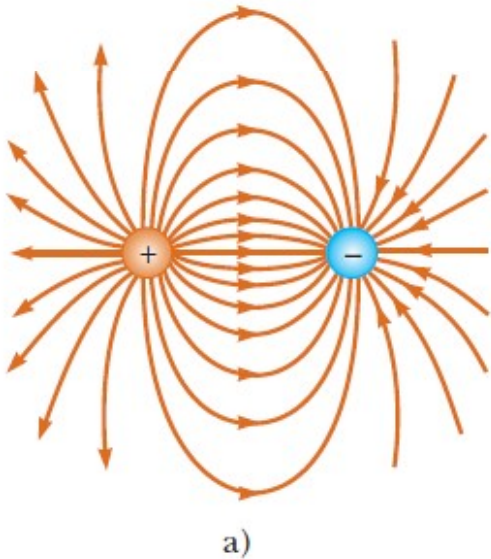
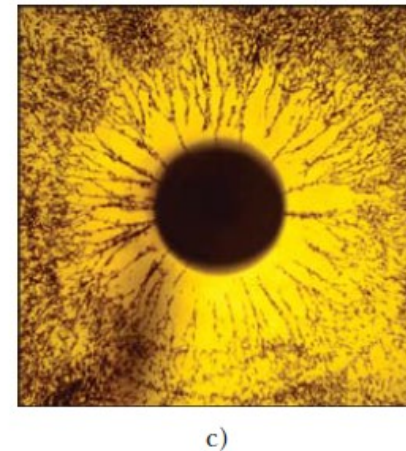
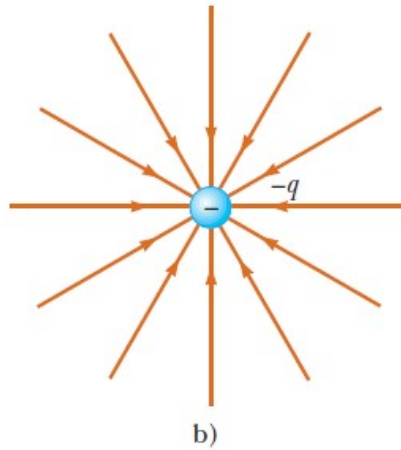
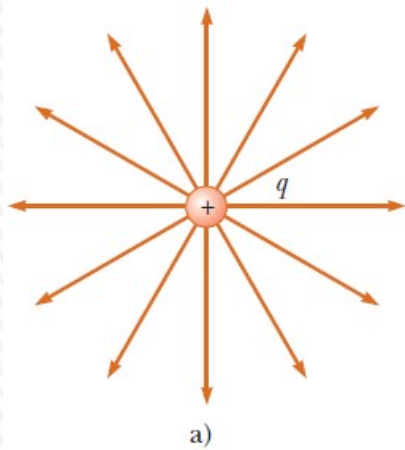
- El vector **E** del campo eléctrico es tangente a la línea del campo eléctrico en cada punto. La dirección y sentido de la línea, indicada por una punta de flecha, es igual al vector del campo eléctrico.
- El número de líneas por unidad de área que pasan a través de una superficie perpendicular a dichas líneas es proporcional a la magnitud del campo eléctrico en dicha región.

Las reglas para dibujar las líneas de un campo eléctrico son las siguientes:

1. Las líneas deben empezar en una carga positiva y terminar en una carga negativa.
2. En caso de que haya exceso en cualquier carga, algunas líneas empezarán o terminarán en el infinito.
3. El número de líneas dibujadas que salen de una carga positiva o se acercan a una carga negativa será proporcional a la magnitud de dicha carga.
4. Dos líneas de campo no se pueden cruzar.



LÍNEAS DE CAMPO ELÉCTRICO



Líneas de campo eléctrico para dos cargas puntuales de igual magnitud y de signo opuesto. El número de líneas que salen de la carga positiva es igual al número que termina en la carga negativa.

Pequeñas partículas suspendidas en aceite se alinean con el campo eléctrico.



DISTRIBUCIONES DE CARGAS CONTINUAS

Se puede modelar un sistema de cargas como si fuera continua y considerar diferenciales de carga.

Si la carga se distribuye en una línea, sobre una superficie o a través de un volumen se usan las **densidades de carga**.

Distribución de carga lineal λ (lambda) - carga por unidad de longitud (C/m): varilla larga cargada.

Densidad de carga superficial σ (sigma) - carga por unidad de área, en C/m²: plano cargado.

Densidad de carga volumétrica ρ (rho) carga por unidad de volumen, C/m³.

Esto nos permite calcular los campos que crean cuerpos macroscópicos cargados (barras, cilindros, discos, esferas), mediante integración de un diferencial de campo eléctrico: $d\mathbf{E}$.

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \quad dq = \begin{cases} \lambda dx \\ \sigma dA \\ \rho dV \end{cases} \quad \begin{array}{l} dx- \text{diferencial de línea} \\ dA- \text{diferencial de área} \\ dV- \text{diferencial de volumen} \end{array}$$

Si se distribuyen uniformemente:

$$\lambda = \frac{Q}{l} \quad \sigma = \frac{Q}{A} \quad \rho = \frac{Q}{V}$$



CAMPO ELÉCTRICO DEBIDO A DISTRIBUCIONES DE CARGAS

El campo eléctrico total debido a dos o más cargas es la suma de sus campos individuales, esta superposición pueden hacer que la variación del campo total con la distancia no sea estrictamente como $1/r^2$ (como el de una carga puntual.), sino que puede variar como: $1/r^3$, $1/r$ ó incluso ser constante.

Estos campos se pueden obtener a través de integración de la expresión del diferencial del campo eléctrico $d\mathbf{E}$ que crea un diferencial de carga dq :

$$d\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2}$$

O mediante la **ley de Gauss**.

Métodos que no veremos en este curso, pero usaremos los resultados que se obtienen.

Veamos los resultados de dos importantes:

- campo creado por un plano cargado
- Campo creado por una esfera cargada

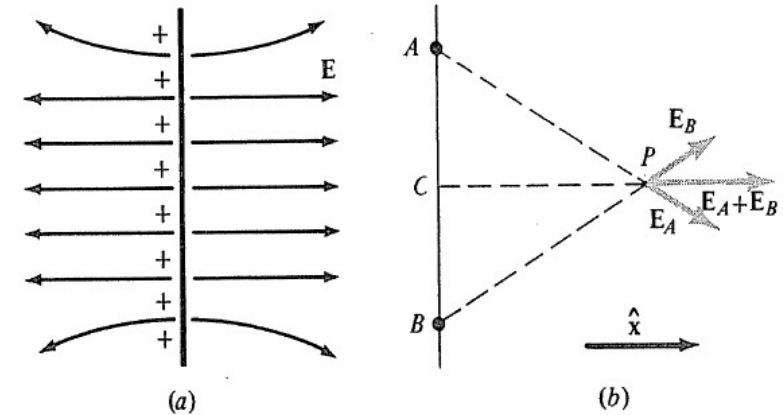


CAMPO DE UN PLANO CARGADO UNIFORMEMENTE

Campo creado por un plano infinito: es constante en módulo y dirección.

Al ser de dimensiones infinitas, para determinar el campo en P, siempre hay cargas en posiciones simétricas de modo que el campo resultante es perpendicular al mismo.

Esto no es cierto si las dimensiones no son infinitas.



Sin embargo, los campos de estas cargas desapareadas y distantes no tienen importancia si P se halla próximo al plano y no está muy cerca de algún extremo. Se prueba que su magnitud vale:

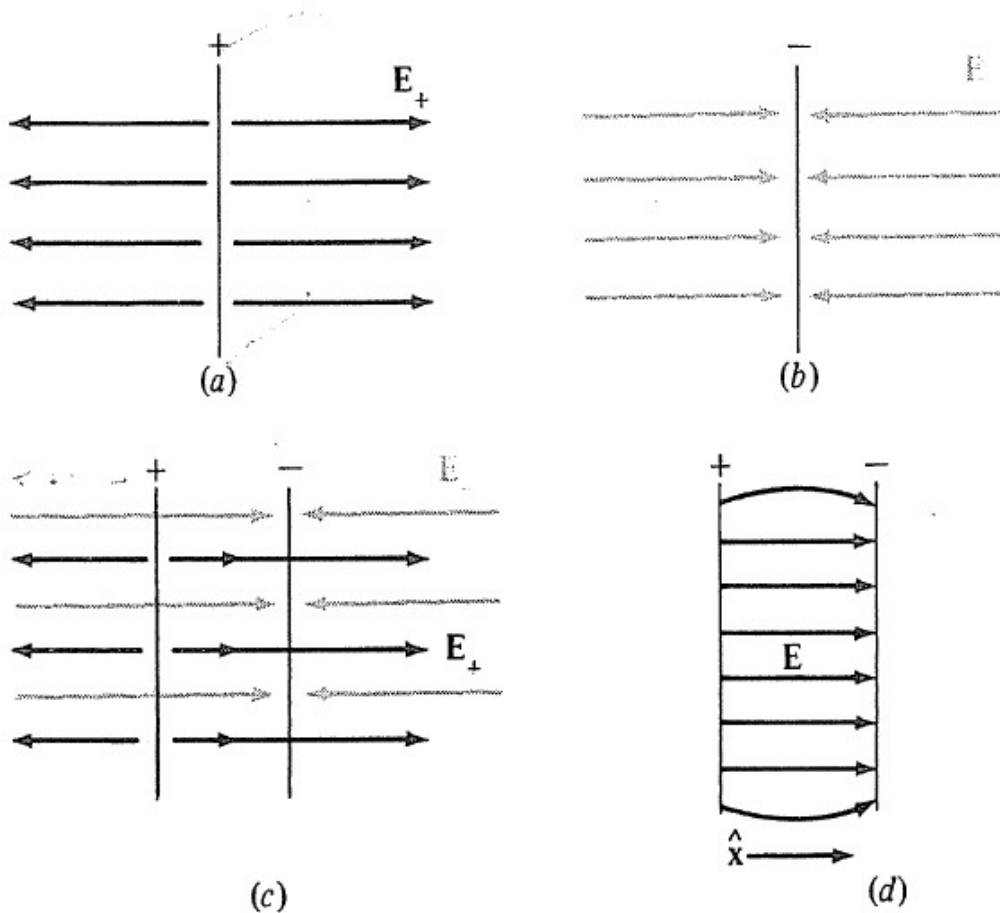
$$\bar{E} = 2\pi k_E \frac{Q}{A} \hat{x} = 2\pi k_E \sigma \hat{x} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \hat{x}$$

$$\mathbf{E} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \hat{\mathbf{n}}$$

Campo constante (no varía con la distancia al plano considerado) y perpendicular al mismo



CAMPO DE DOS PLANOS CARGADO UNIFORMEMENTE



Consideremos ahora dos planos de área A y que tengan cargas iguales pero de signo opuesto $+Q$ y Q . Los campos se suman en la región entre los planos y se cancelan en el resto del espacio.

Por tanto, entre los campos (con la aproximación mencionada anteriormente):

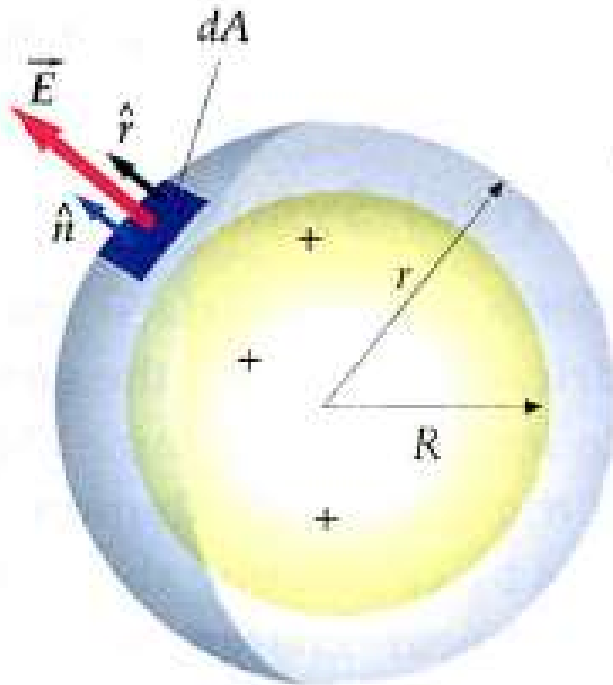
$$\bar{E} = 4\pi k_E \frac{Q}{A} \hat{x} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \hat{x}$$



CAMPO CREADO POR UNA ESFERA CARGADA

Esfera de radio R cargada con carga q.

Si la carga se distribuye uniformemente en el volumen (como en un no conductor) entonces hay una densidad de carga volumétrica ρ constante



1) Para $r > R$

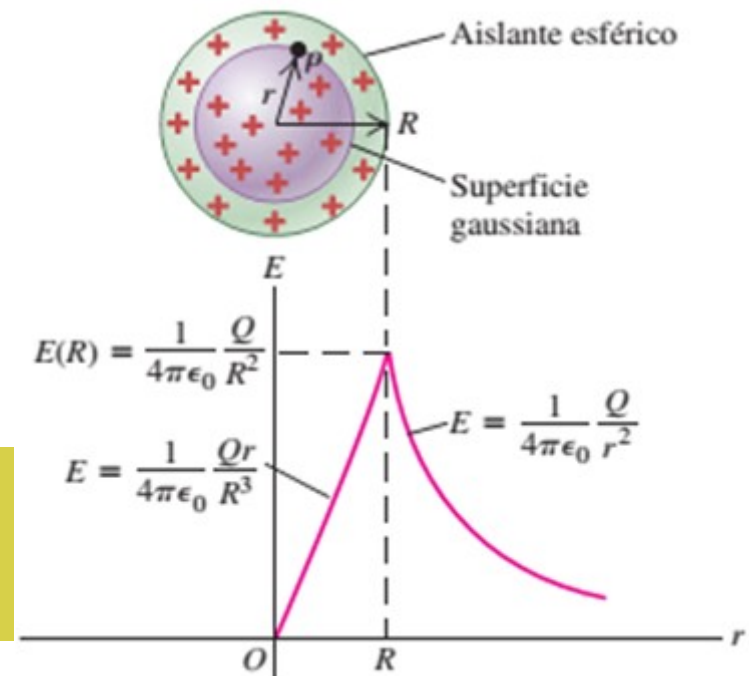
$$\vec{E}(r) = k_E \frac{q}{r^2} \hat{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r}$$

2) Para $r < R$

$$\vec{E}(r) = k_E \frac{qr}{R^3} \hat{r} = \frac{\rho r}{3\epsilon_0} \hat{r}$$

Si la esfera es conductora, el campo en el exterior es el mismo, y en el interior es nulo.

El campo eléctrico de una esfera cargada para $r > R$, es el mismo que el de una carga puntual q ubicada en su centro



Ejemplo 1.01

El electrón y el protón de un átomo de hidrógeno están separados (en promedio) por una distancia de aproximadamente $5,3 \times 10^{-11}$ m. Encuentre las magnitudes de la fuerza eléctrica y la fuerza gravitacional entre las dos partículas, y la relación entre ellas.

Datos: magnitudes de la carga del electrón y del protón. $e = 1,602 \times 10^{-19}$ C

Constante de Coulomb: $k_e = 8,988 \times 10^9$ N.m²/C²

Masa del protón: $m_p = 1,67 \times 10^{-27}$ kg; masa del electrón: $m_e = 9,11 \times 10^{-31}$ kg

Constante de gravitación universal: $G = 6,67 \times 10^{-11}$ N.m²/kg²

De acuerdo a la ley de Coulomb:

$$F_e = k_e \frac{|e||-e|}{r^2} = (8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(1.60 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{(5.3 \times 10^{-11} \text{ m})^2} = 8.2 \times 10^{-8} \text{ N}$$

De acuerdo a la ley de gravitación universal:

$$F_g = G \frac{m_e m_p}{r^2} = (6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2) \frac{(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(1.67 \times 10^{-27} \text{ kg})}{(5.3 \times 10^{-11} \text{ m})^2} = 3.6 \times 10^{-47} \text{ N}$$

La relación $F_e/F_g \approx 2 \times 10^{39}$.

Pregunta rápida 1

Dos cargas puntuales, A y B, están separadas una distancia d .

A tiene una **carga $2Q$** y una **masa $2m$** ,

mientras que B tiene una **carga Q** y una **masa m** .

Respecto a la relación entre las magnitudes de las fuerzas que se ejercen entre sí, y las magnitudes de las aceleraciones que experimentan, podemos decir que:

- A) Tanto las fuerzas como las aceleraciones son iguales.
- B) Las fuerzas son iguales, pero la aceleración que experimenta A es mayor que la de B.
- C) Las fuerzas son iguales, pero la aceleración que experimenta B es mayor que la de A.
- D) Las aceleraciones son iguales, pero la fuerza que se ejerce sobre A es mayor que la que se ejerce sobre B.
- E) Las aceleraciones son iguales, pero la fuerza que se ejerce sobre B es mayor que la que se ejerce sobre A.
- F) Tanto las fuerzas como las aceleraciones son distintas.

Opción correcta: C.

Por el principio de acción y reacción las fuerzas deben tener la misma magnitud, como la masa de B es menor que la de A, tendrá mayor aceleración.

Pregunta rápida 2

Dos cargas puntuales se atraen mutuamente con una fuerza eléctrica de magnitud F .

Si una carga se reduce a la mitad de su valor original y la distancia entre las cargas se triplica,

¿cuál es la magnitud resultante de la fuerza eléctrica entre ellas?

- A) $3F/4$ B) $F/6$ C) $F/6$ D) $F/12$ E) $4F/3$ F) $F/18$

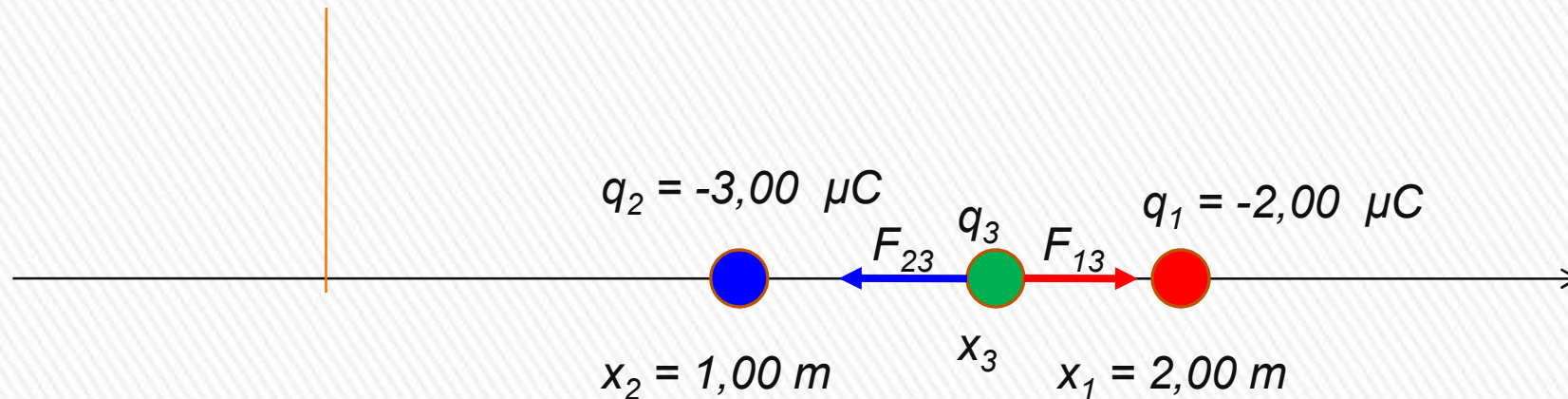
$$F = k_E \frac{q_1 q_2}{d^2}$$

$$F' = k_E \frac{q' q_2}{d'^2} = k_E \frac{(q_1/2) q_2}{(3d)^2} = k_E \frac{(q_1) q_2}{(2)(9)(d)^2} = \frac{1}{18} k_E \frac{q_1 q_2}{d^2} = \frac{F}{18}$$



Ejercicio 1.1.1

Tres cargas puntuales están a lo largo del eje x . Una carga $q_1 = -2,00 \mu\text{C}$ está en $x = 2,00 \text{ m}$ y una carga $q_2 = -3,00 \mu\text{C}$ está en $x = 1,00 \text{ m}$.
¿En dónde debe colocarse una tercera carga positiva q_3 , de modo que la fuerza resultante sobre ella sea cero?



¿En qué parte debo ubicar a q_3 , a la izquierda de q_2 , entre q_2 y q_1 o a la derecha de q_1 ?

¿Podría no estar sobre el eje x ?

¿Estará más cerca de q_2 o q_1 ?

Para que la fuerza resultante sobre q_3 sea nula: $F_{13} = F_{23}$

$$k_E \frac{q_1 q_3}{(x_1 - x_3)^2} = k_E \frac{q_2 q_3}{(x_3 - x_2)^2} \quad \frac{q_1}{(x_1 - x_3)^2} = \frac{q_2}{(x_3 - x_2)^2} \rightarrow$$

$$q_1 (x_3 - x_2)^2 = q_2 (x_1 - x_3)^2$$

Ejercicio 1.1.1

$$q_1(x_3 - x_2)^2 = q_2(x_1 - x_3)^2 \quad x_3 = x$$

$$2(x - 1)^2 = 3(2 - x)^2 \quad 2(x^2 - 2x + 1) = 3(4 - 4x + x^2)$$

$$2x^2 - 4x + 2 = 12 - 12x + 3x^2$$

$$x^2 - 8x + 10 = 0$$

$$x = \frac{8 \pm \sqrt{(-8)^2 - 4(1)(10)}}{2} = \frac{8 \pm \sqrt{24}}{2} = \begin{cases} 6,4495 \\ 1,5505 \end{cases}$$

$$x_3 = 1,55 \text{ m}$$

