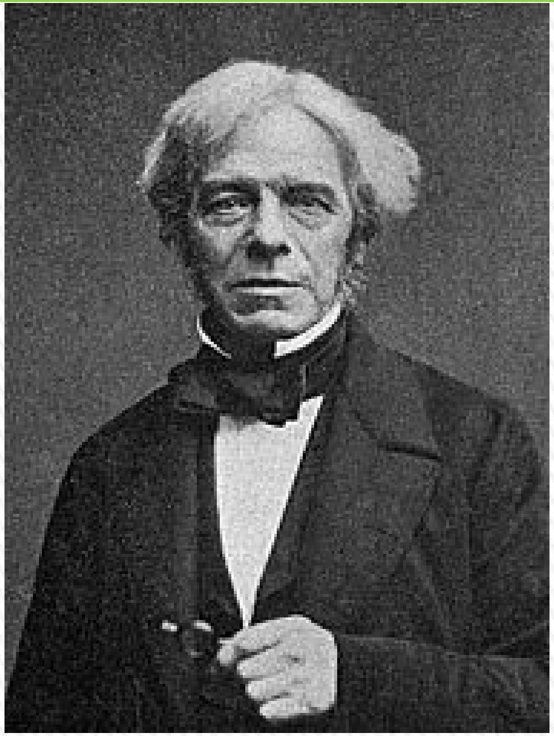
01.2-CAMPO ELÉCTRICO



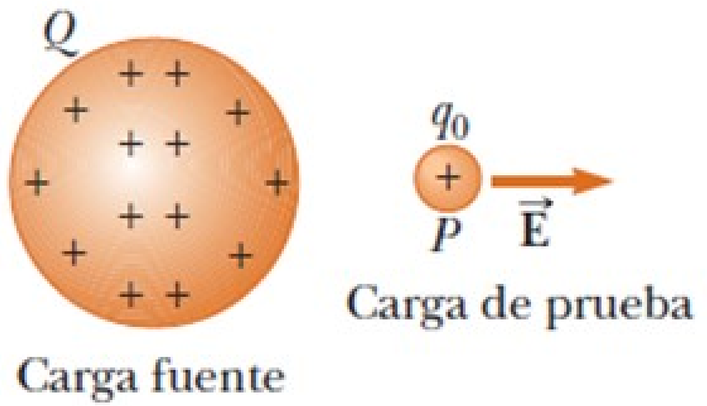
Michael Faraday
(1791-1867)

La fotografía muestra la caída de un rayo sobre un árbol cerca de algunas casas en una zona rural.
Los relámpagos están asociados con campos eléctricos muy intensos que se generan en la atmósfera.

CAMPO ELÉCTRICO

La Tierra produce un campo gravitatorio que ejerce una fuerza (atracción gravitatoria) sobre nosotros que actúan a través del espacio a pesar de no existir contacto físico entre los objetos que interactúan.
El campo gravitacional **g** se define como la fuerza gravitacional $\mathbf{F}_g$ *que actúa sobre una partícula de prueba de masa m dividida entre esa* masa: $\mathbf{g} = \mathbf{F}_g/m$.

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

El concepto de campo fue desarrollado por ***Michael Faraday*** *(1791-1867)* en relación con las fuerzas eléctricas.

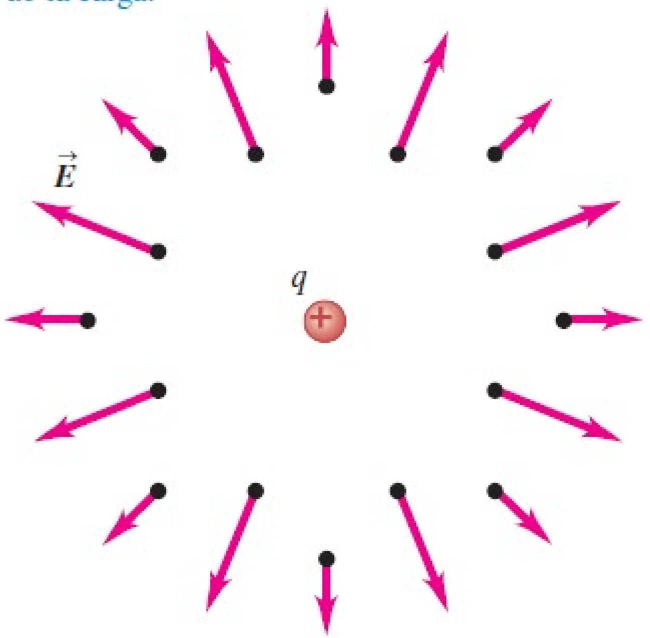
$$\overline{E} = \frac{\overline{F_E}}{q_0}$$

CAMPO ELÉCTRICO

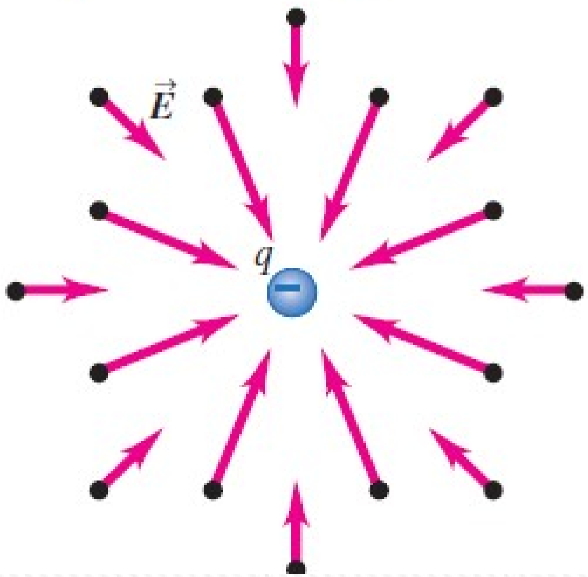
Unidad de campo eléctrico en SI: newton/coulomb (N/C) o volt/metro (V/m)

ATENCIÓN: **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 **E**, es el de la fuerza que experimenta una carga de prueba positiva cuando es colocada en el campo.

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



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

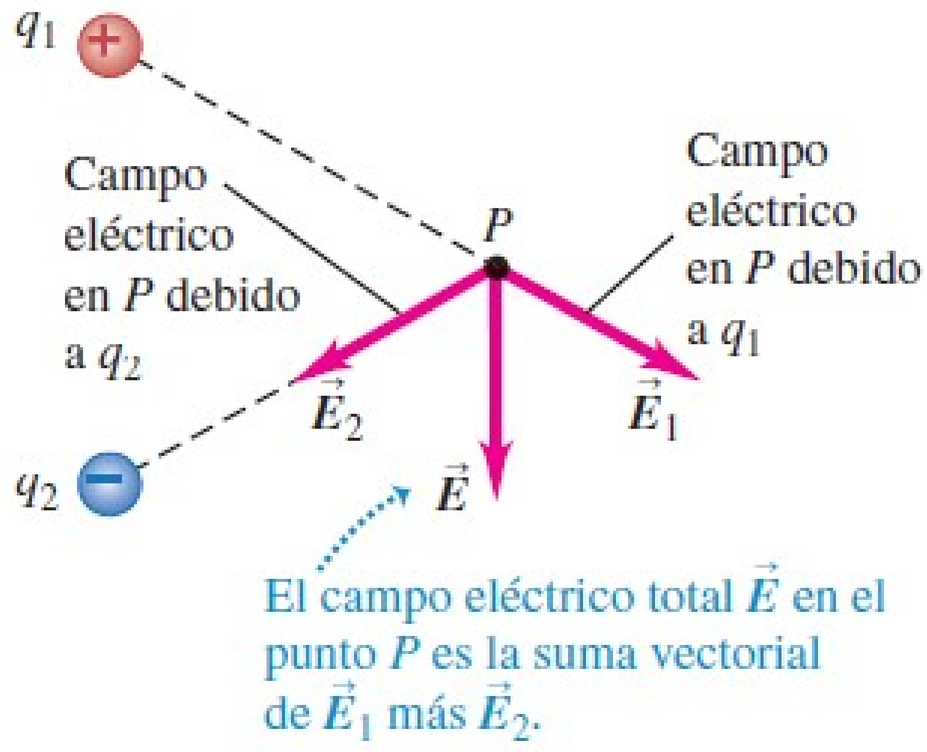


CAMPO ELÉCTRICO - SUPERPOSICIÓN

El principio de superposición es válido cuando se calcula el campo eléctrico debido a un grupo de cargas puntuales.

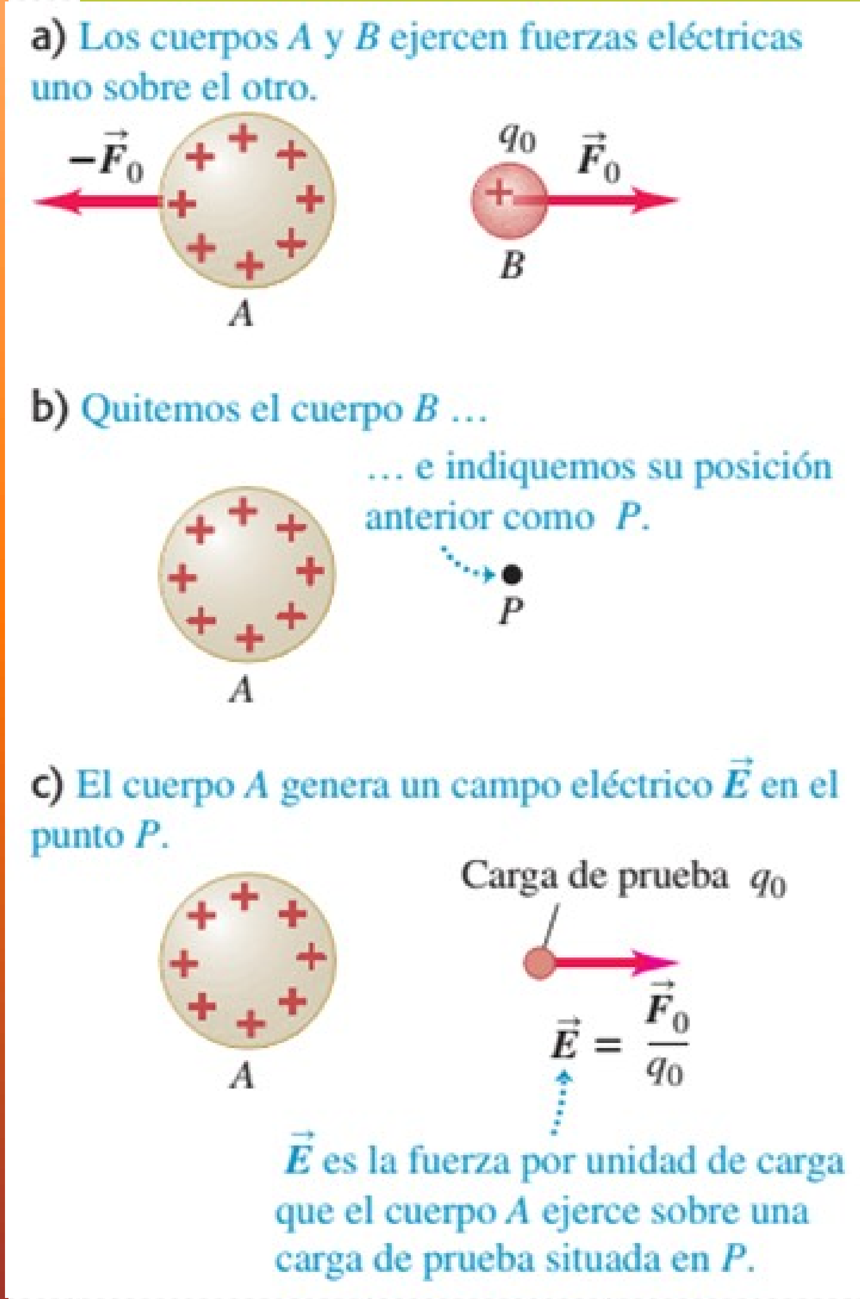
En cualquier punto *P, el campo* eléctrico total debido a un grupo de cargas fuente es igual a la suma vectorial de los campos eléctricos de todas las cargas.

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



El campo eléctrico ***E*** experimentado por una carga puntual no depende del valor de esa carga. El valor de ***E*** está determinado por las cargas que producen el campo, no por la carga que lo experimenta.
E **e**s un vector. Si el campo ***E*** en el punto *P se debe a dos o más cargas* puntuales, ***E*** es la suma vectorial de los campos producidos por las cargas individuales. En general, esto no es la suma de las magnitudes de los campos.

CAMPO ELÉCTRICO



Si conocemos el campo eléctrico en un punto, podemos hallar la fuerza que actúa sobre una carga que coloquemos allí.
No es necesario conocer el valor ni la posición de las cargas que crean el campo.

Ejemplo: un ion Na^+ tiene una carga igual a q = e = 1,6 ×10^{-19} C.
Si el campo en una membrana celular es 10^6 N/C, la fuerza sobre el ion vale F= q.E

F= (1,6 ×10^{-19} C).(10^6 N/C) = 1,6 ×10^{-13} N

ATENCIÓN:
Siempre suponemos que la carga de prueba no perturba la distribución original de las cargas que crean el campo eléctrico.

LÍNEAS DE CAMPO ELÉCTRICO

Forma de visualizar los campos eléctricos: **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:

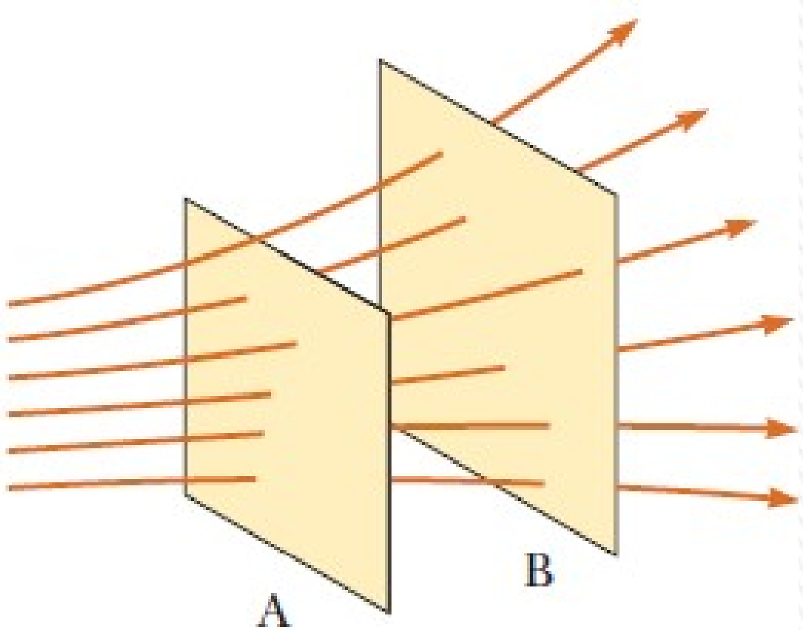
1. Las líneas deben empezar en una carga positiva y terminar en una carga negativa.

2. En caso de que haya exceso en cualquier carga, algunas líneas empezarán o terminarán en el infinito.

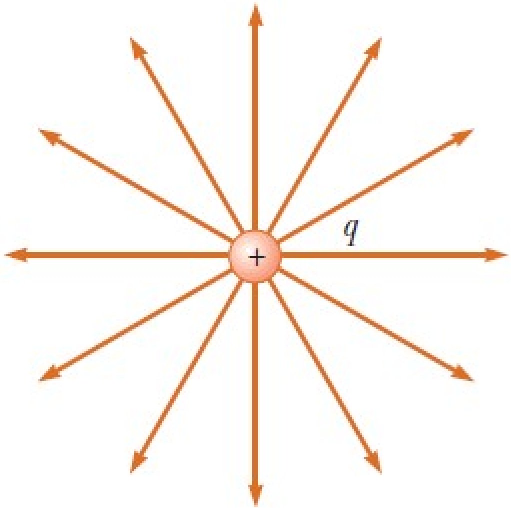
3. El número de líneas dibujadas que salen de una carga positiva o se acercan a una carga negativa será proporcional a la magnitud de dicha carga.

4. Dos líneas de campo no se pueden cruzar.

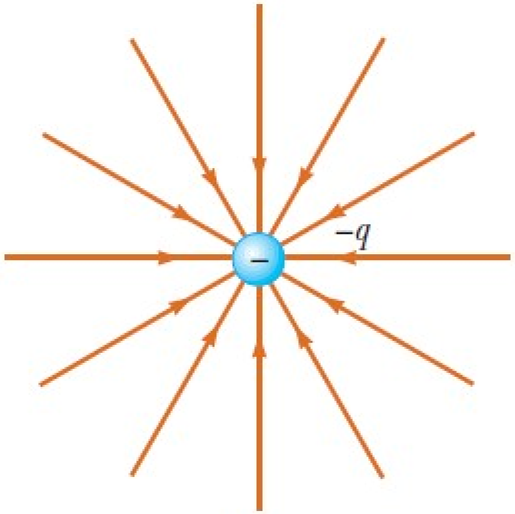
LÍNEAS DE CAMPO ELÉCTRICO



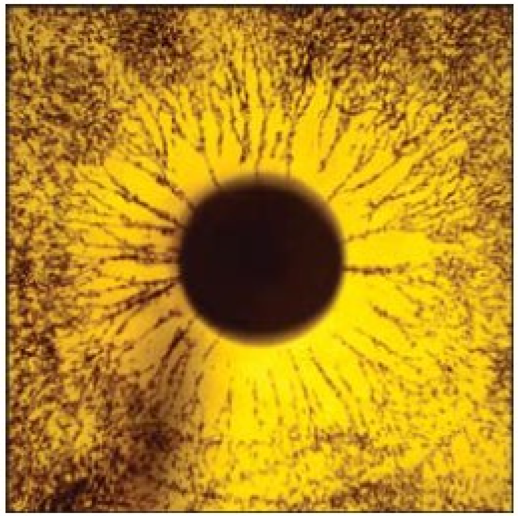
Líneas de campo eléctrico que atraviesan dos superficies.
La magnitud del campo es mayor en la superficie A que en la B.



a)

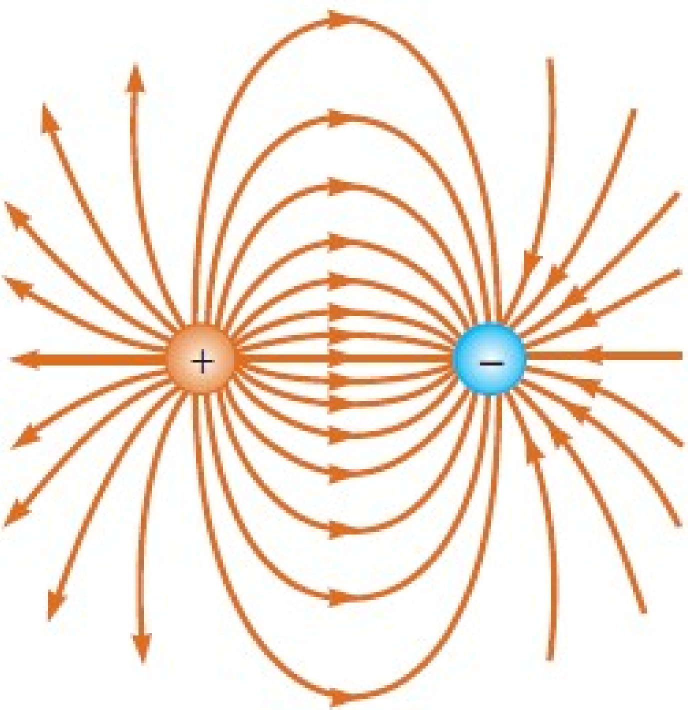


b)

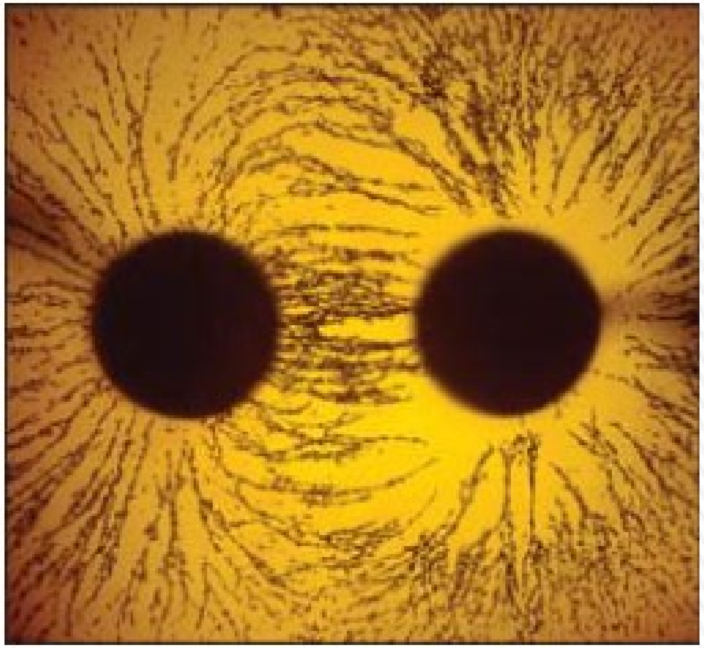


c)

LÍNEAS DE CAMPO ELÉCTRICO



a)



b)

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

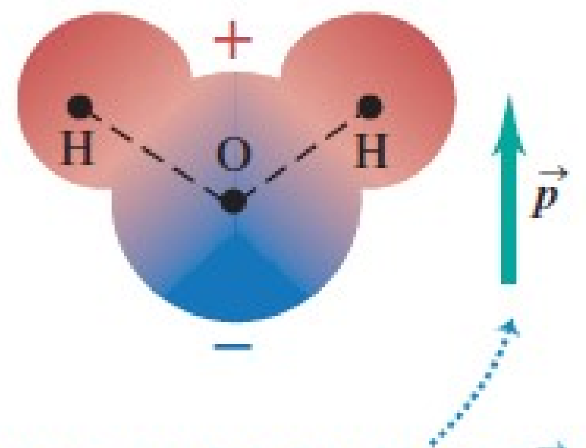
b) Pequeñas partículas suspendidas en aceite se alinean con el campo eléctrico.

DIPOLO ELÉCTRICO

Dipolo eléctrico es un par de cargas puntuales de igual magnitud y signos opuestos (una carga positiva *q y una carga negativa -q) separadas por una distancia d (ó 2a ó l).*
Muchos sistemas físicos, desde las moléculas hasta las antenas de televisión, se pueden describir como dipolos eléctricos.

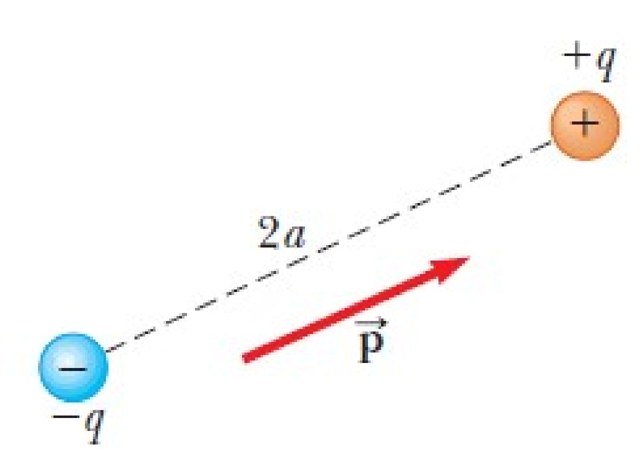
Una molécula de agua (H_2O), se comporta como un dipolo eléctrico. Si bien es eléctricamente neutra; los enlaces químicos dentro de la molécula ocasionan un desplazamiento de la carga.
Hay una carga neta negativa en el extremo del oxígeno de la molécula, y una carga neta positiva en el extremo del hidrógeno, formando así un dipolo eléctrico.
El efecto es equivalente al desplazamiento de un electrón de apenas 4×10^{-11} m (aprox. un el radio de átomo de hidrógeno).
Las consecuencias de este desplazamiento son profundas; el agua es un magnífico solvente para las sustancias iónicas como las sales porque la molécula de agua es un dipolo eléctrico .

a) Una molécula de agua, con la carga positiva en color rojo, y la carga negativa en azul



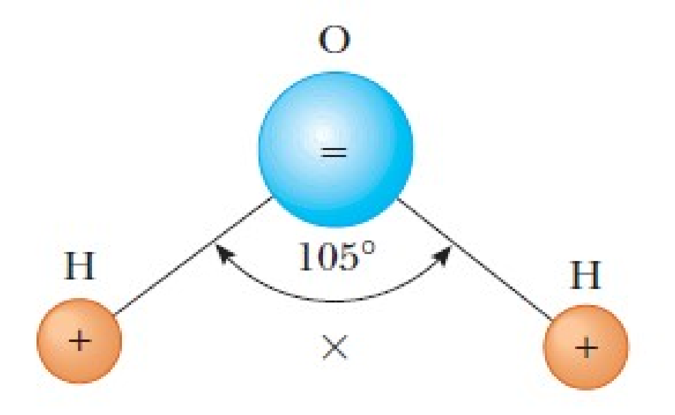
El momento dipolar eléctrico $\vec{p}$ está dirigido del extremo negativo al extremo positivo de la molécula.

DIPOLO ELÉCTRICO



Un **dipolo eléctrico** está formado por dos cargas de magnitudes iguales y signos opuestos separados por una distancia 2*a.*
El momento del dipolo eléctrico **p** está orientado desde -*q hacia* +*q.* *p = 2aq=ql*

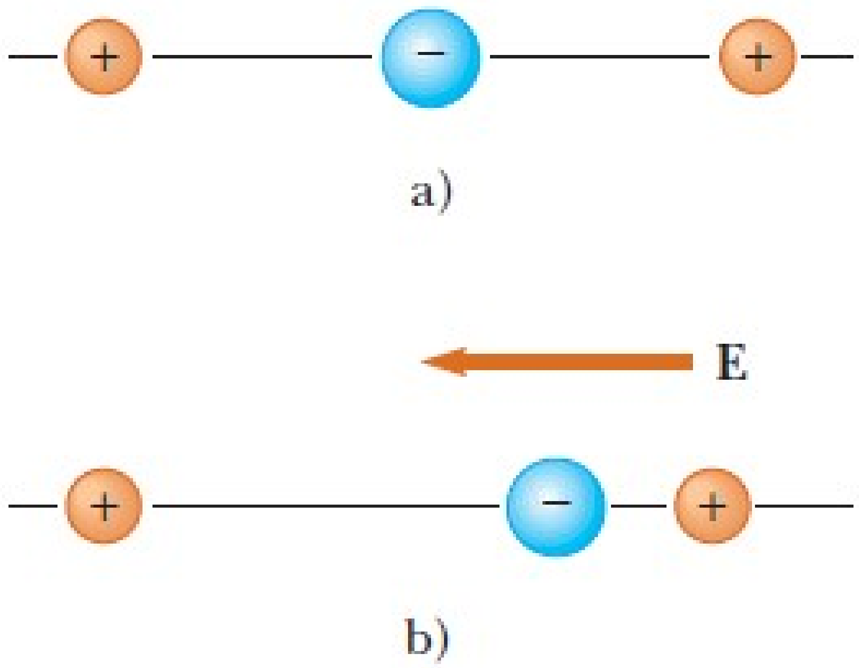
El dipolo eléctrico es un buen modelo de muchas moléculas.
Los átomos y moléculas neutros se comportan como dipolos cuando se colocan en un campo eléctrico externo.



La molécula de agua, H_2O, tiene una polarización permanente debido a su geometría no lineal.
El centro de la distribución de la carga positiva está en el punto × .

Veremos que el campo eléctrico que crea un dipolo para distancias grandes es proporcional a p y decrece como $1/r^3$.

DIPOLO ELÉCTRICO



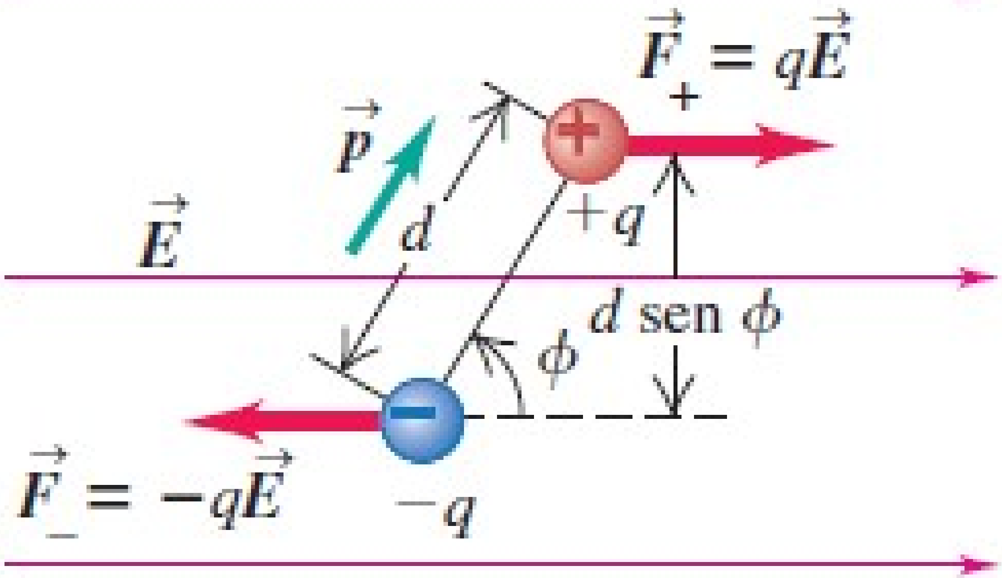
a) Una molécula lineal simétrica no tiene una polarización permanente.

Pero puede ser inducida colocando la molécula en un campo eléctrico: si tenemos un campo que se dirige hacia la izquierda:

b) Un campo eléctrico externo induce una polarización en la molécula.

En la figura el centro de la distribución de cargas positivas se desplaza hacia la izquierda en relación con su posición inicial, y que el centro de la distribución de cargas negativas se desplazara hacia la derecha. Esta *polarización inducida es el efecto predominante en la mayor parte de los* materiales que se utilizan como dieléctricos en los capacitores

DIPOLOS ELÉCTRICOS



Fuerza y torque sobre un dipolo por un campo uniforme

Dipolo colocado en un campo eléctrico externo;
Las fuerzas **F_+** y **F_-** sobre las dos cargas tienen una magnitud *qE, pero sus sentidos son opuestos y su* suma es igual a cero.

La fuerza neta sobre un dipolo eléctrico en un campo eléctrico externo uniforme es cero.

Sin embargo, estas fuerzas no actúan sobre la misma recta, por lo que originarán un torque. Como muestra la figura, el brazo de palanca (distancia entre las cargas perpendicular a la dirección de las fuerzas) vale: d.senΦ y por tanto

$$\tau = (qE)d\sin\phi$$

$$\bar{\boldsymbol{\tau}} = \bar{\boldsymbol{p}} \times \bar{\boldsymbol{E}}$$

ELECTRORRECEPCIÓN

La **electrorrecepción** es una habilidad biológica para recibir y hacer uso de impulsos eléctricos. Es mucho más común en criaturas acuáticas, ya que el agua es mejor conductor eléctrico que el aire.

Es usada principalmente para **electrolocalización**: la habilidad de usar los campos eléctrico para localizar objetos y ubicarse en el espacio.

Muchos peces tienen un sentido de electrorrecepción, asociado al sistema de la **línea lateral** (órgano sensorial de animales marinos).

El animal percibe los débiles campos eléctricos generados por otros animales. Los animales que usan la electrorrecepción pasiva incluyen los tiburones y las rayas.

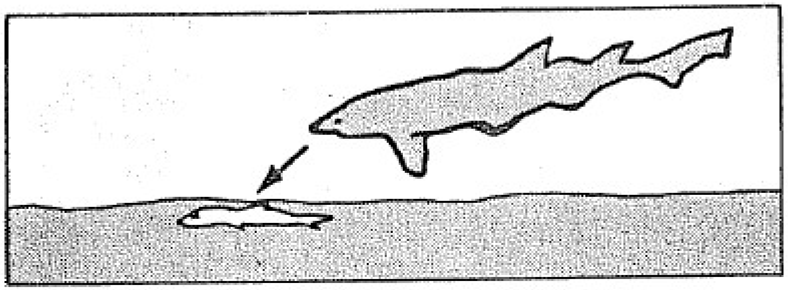
Los tiburones son los animales conocidos más sensibles eléctricamente, respondiendo a campos tan bajos como 5 nV/cm (0,5 μN/C).

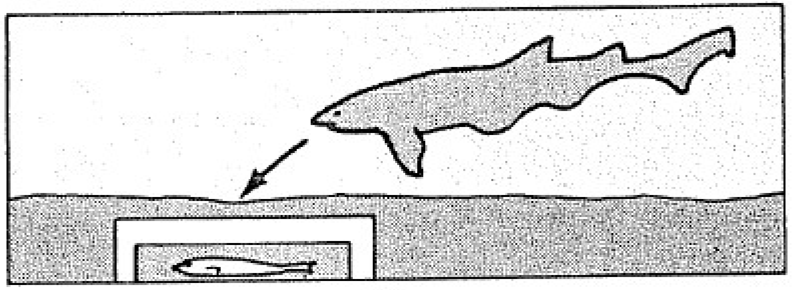
Cada vez que un animal se mueve, se generan cargas eléctricas que viajan a través del agua salada que contiene iones de sodio y cloro. La tensión eléctrica detectable es resultado del intercambio de electrones entre la carga del agua salada y la de las células vivas de los peces.

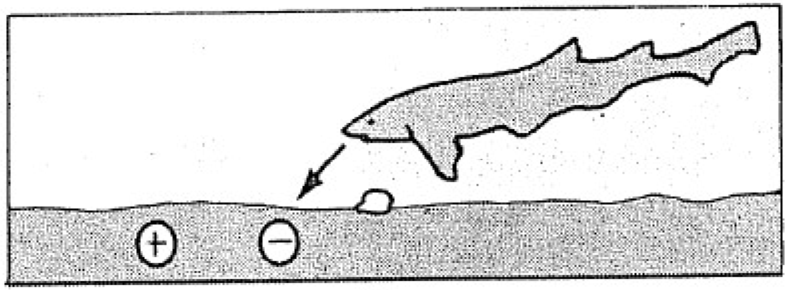
Los sensores de los tiburones a los campos eléctricos son llamados **ampollas de Lorenzini.** Consisten en **células electrorreceptoras** conectadas al agua marina a través de poros en sus hocicos y otras zonas de la cabeza.

La electrorrecepción es frecuente en los peces como los tiburones, las rayas, las lampreas y los bagres, pero además en ciertos mamíferos (monotremas) como los equidnas y los ornitorrincos.

ELECTRORRECEPCIÓN


(a)


(b)


(c)

E= 0,5 μN/C.

Los tiburones son sensibles a pequeñísimos campos eléctricos producidos por cargas en un cuerpo.

a) El tiburón ataca a un pez oculto bajo la arena.

b) Una cámara bloquea todo menos los estímulos eléctricos y el tiburón no obstante ataca.

c) Un campo eléctrico producido artificialmente consigue la misma respuesta. Aquí el tiburón aparece ignorando un trozo de alimento bien patente por seguir el estímulo eléctrico.

ELECTRORRECEPCIÓN DEL TIBURÓN

Los tiburones tienen la habilidad de localizar a sus presas aunque estén totalmente escondidas en la arena del fondo del océano. Hacen esto detectando los débiles campos eléctricos producidos por las contracciones musculares de sus presas.

La sensibilidad de los escualos a los campos eléctricos ("el sexto sentido") proviene de los canales gelatinosos que tienen en sus cuerpos.

Estos canales terminan en los poros de la piel del tiburón (mostrado en esta fotografía). Un campo eléctrico tan débil como 5×10^{-7} N/C genera una carga que fluye dentro de los canales y dispara una señal en el sistema nervioso del tiburón. Como el tiburón tiene canales con orientaciones diferentes, puede medir las distintas componentes del vector del campo eléctrico y determinar así la dirección del campo.

DISTRIBUCIONES DE CARGAS CONTINUAS

Frecuentemente el sistema de cargas se puede modelar como si fuera continuo y se consideran diferenciales de carga. Por ejemplo para el caso de cuerpos macroscópicos cargados (barras, cilindros, discos, esferas) y queremos calcular los campos que crean estos cuerpos

Si la carga está distribuida a lo largo de una línea, sobre una superficie o a través de un volumen, son muy útiles el uso de **densidades de carga**.

Para distribución de carga lineal (varilla de plástico cargada, larga y delgada), se usa **λ** (letra griega lambda) para representar la **densidad de carga lineal** **(carga** por unidad de longitud, medida en C/m).

Si la carga está distribuida sobre una superficie (en un plano), se usa **σ** (sigma) que representa la **densidad de carga superficial** (carga por unidad de área, medida en C/m^2).

Si la carga se distribuye a través de un volumen, se usa **ρ** (rho) para representar la **densidad de carga volumétrica** (carga por unidad de volumen, C/m^3)

$$dE = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{dq}{r^2} \qquad dq = \begin{cases} \lambda dx \\ \sigma dA \\ \rho dV \end{cases}$$

Si se distribuyen uniformemente:

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

Se dice que trabajamos en un ámbito macroscópicamente pequeño (para poder usar diferencial) y microscópicamente grande (para ignorar ek carácter discreto y suponer distribuciones continuas).

CONDUCTOR EN CONDICIONES ELECTROSTÁTICAS

Propiedades de un conductor en condiciones electrostáticas y aislado (no conectado a tierra):

1. En el interior del conductor el campo eléctrico es cero, si el conductor es sólido o hueco.

2. Si un conductor aislado tiene carga, ésta reside en su superficie.

3. El campo eléctrico justo fuera de un conductor con carga es perpendicular a la superficie del conductor y tiene una magnitud σ/ε_0, donde σ es la densidad de carga superficial en ese punto.

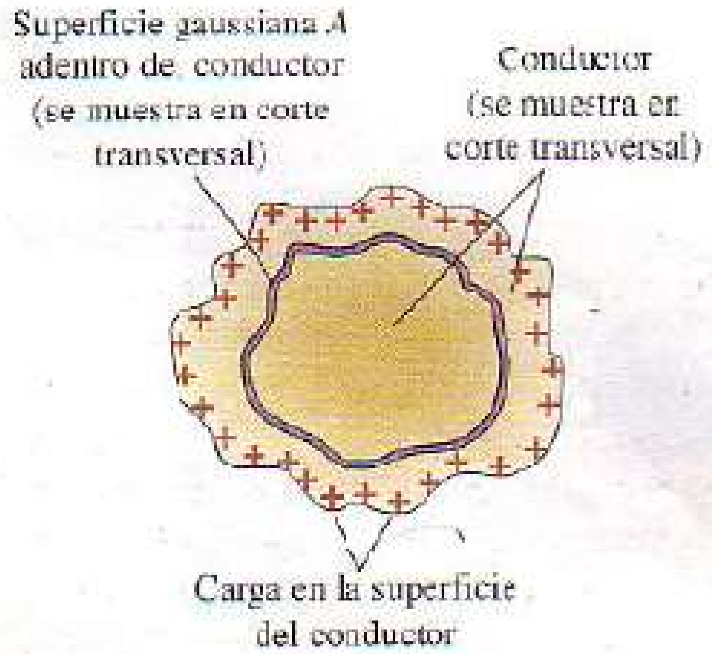
4. En un conductor de forma irregular, la densidad de carga superficial es máxima en aquellos puntos donde el radio de curvatura de la superficie es el menor.

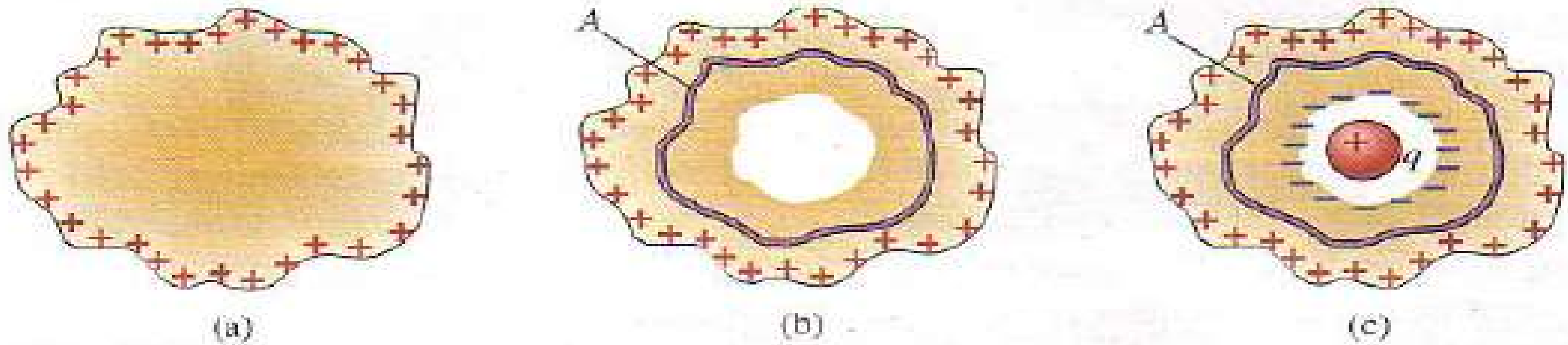
Conductor: campo eléctrico y distribución de carga

En **condiciones electrostáticas**, el campo eléctrico en el interior de un conductor es nulo.

¿Por qué? Porque si no fuese nulo, los portadores de carga del conductor se moverían y no estaríamos en condiciones electrostáticas!!!!

En condiciones electrostáticas, todo exceso de carga en un conductor sólido reside en si totalidad en la superficie del conductor.





22.24 (a) En un conductor sólido la carga reside en su totalidad en la superficie externa. (b) Si no hay carga en el interior de la cavidad del conductor, la carga neta en la superficie de la cavidad es cero. (c) Si hay una carga q adentro de la cavidad, la carga total en la superficie de la cavidad es $-q$.

Conductor: campo eléctrico y distribución de carga

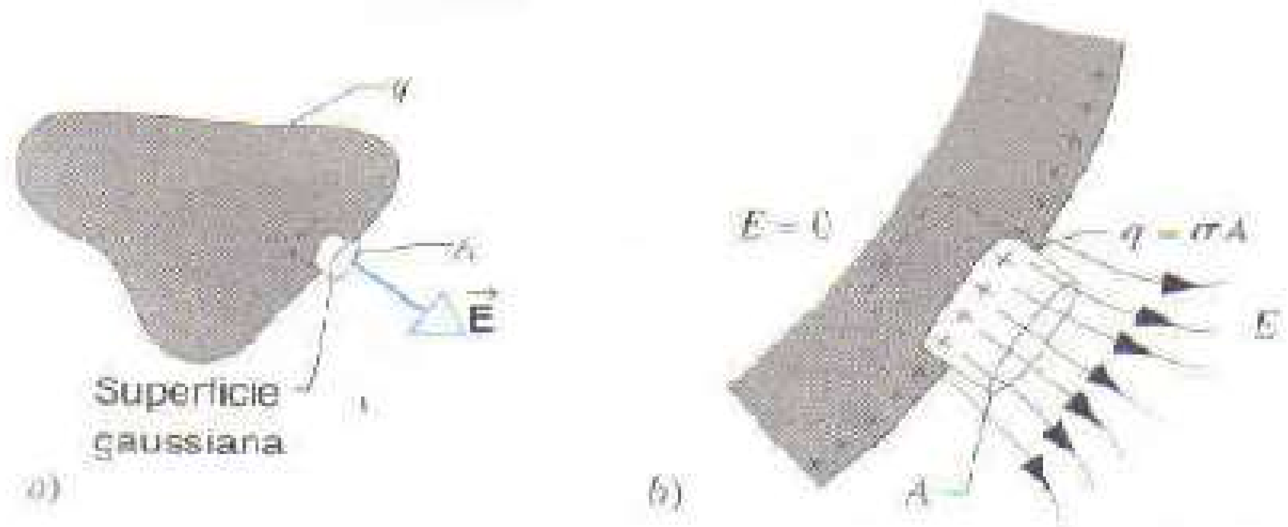
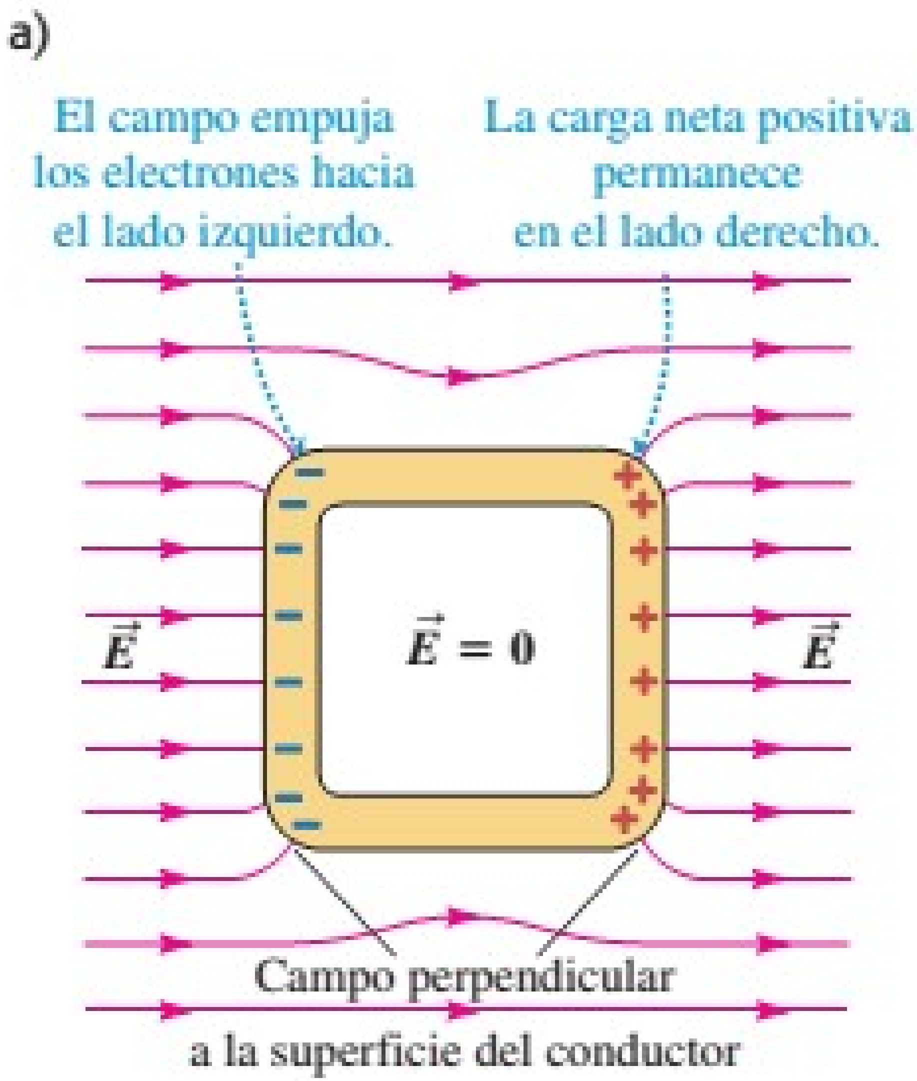


FIGURA 27-15. *a*) Una pequeña superficie gaussiana se colocó sobre la superficie de un conductor cargado. *b*) Vista ampliada de la superficie gaussiana que encierra una carga *q* igual a *σA*.

Sobre la superficie del conductor, el campo eléctrico es normal a la superficie y si la densidad de carga superficial vale σ entonces el campo es:

$$\mathbf{E} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}\hat{\mathbf{n}}$$

JAULA DE FARADAY



Caja conductora (jaula de Faraday) inmersa en un campo eléctrico uniforme.
El campo de las cargas inducidas sobre la caja se combina con el campo uniforme para dar un campo total igual a cero dentro de la caja.

Experimento rápido:
Prueba recubrir completamente un celular con papel aluminio…formarás una jaula de Faraday que lo recubre…
verás que el celular deja de funcionar!

CAMPO ELÉCTRICO DEBIDO A DISTRIBUCIONES DE CARGAS

El campo eléctrico total debido a dos o más cargas es la suma de sus campos individuales.
Si los campos eléctricos apuntan en direcciones distintas, se producirán algunas cancelaciones en la suma. Estas cancelaciones pueden hacer que la variación del campo total con la distancia sea muy diferente de la dependencia en $1/r^2$ del campo de una sola caga puntual.
Veremos, por ejemplo, que el campo puede variar como $1/r^3$ o incluso ser constante.

Presentaremos a continuación algunos resultados de algunas distribuciones de cargas, sin demstración.
Estos resultados se pueden obtener a través de integración de la expresión del diferencial del campo eléctrico d***E*** que crea un diferencial de carga dq:

$$dE = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{dq}{r^2}$$

Algunos de los resultados pueden obtenerse a través de la **ley de Gauss** la cual no veremos en este curso.

CAMPO DE UN PLANO CARGADO UNIFORMEMENTE

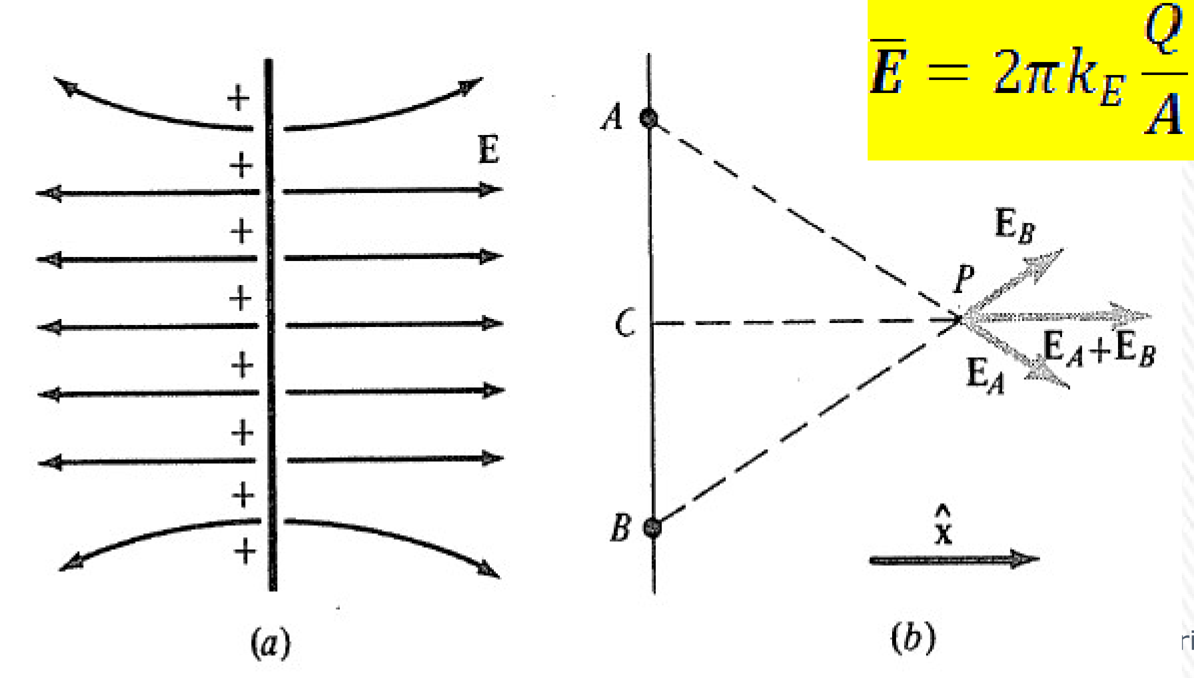
Campo creado por un plano de dimensiones infinitas: el campo es constante en módulo y dirección.

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

Esto no es cierto si las dimensiones no son infinitas.

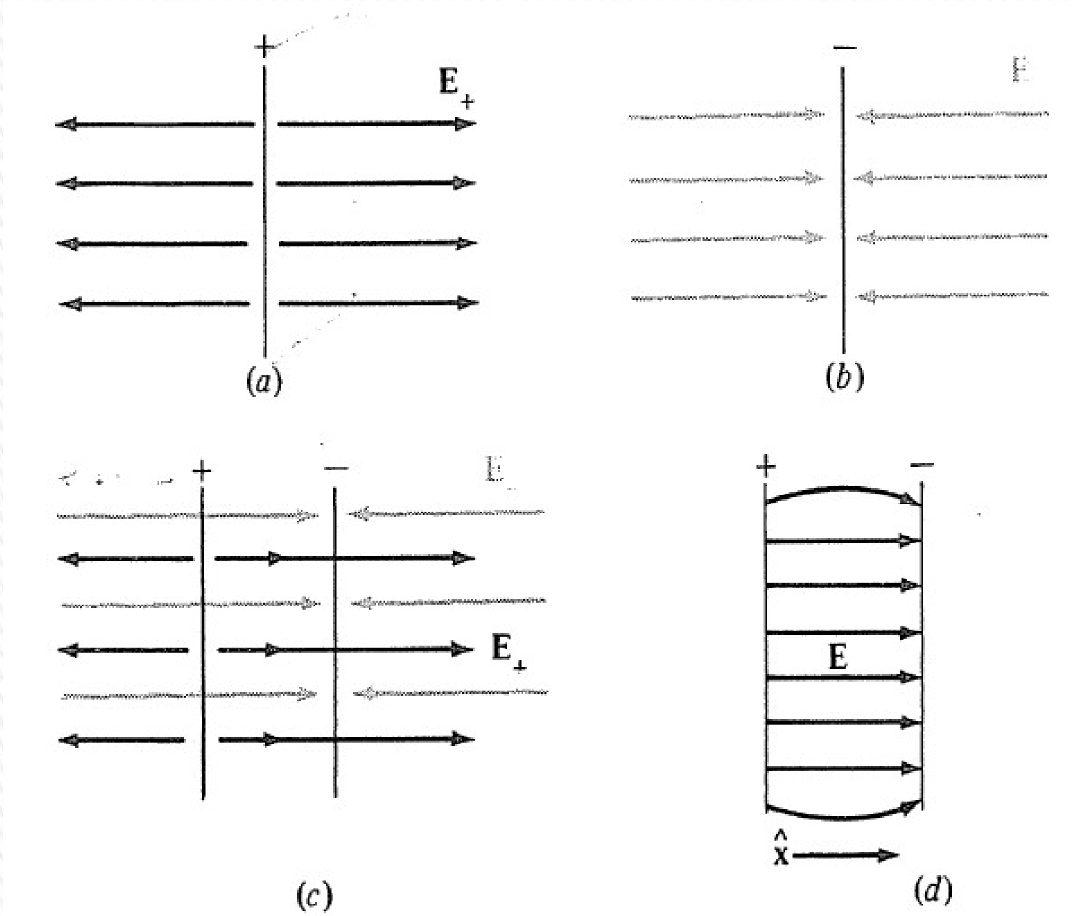
Sin embargo, los campos de estas cargas desapareadas y distantes no tienen importancia si P se halla próximo al plano y no está muy cerca de algún extremo Se prueba que su magnitud vale: .

$$\overline{E} = 2\pi k_E \frac{Q}{A}\,\hat{x} = 2\pi k_E \sigma\,\hat{x} = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}\,\hat{x}$$



rico

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.

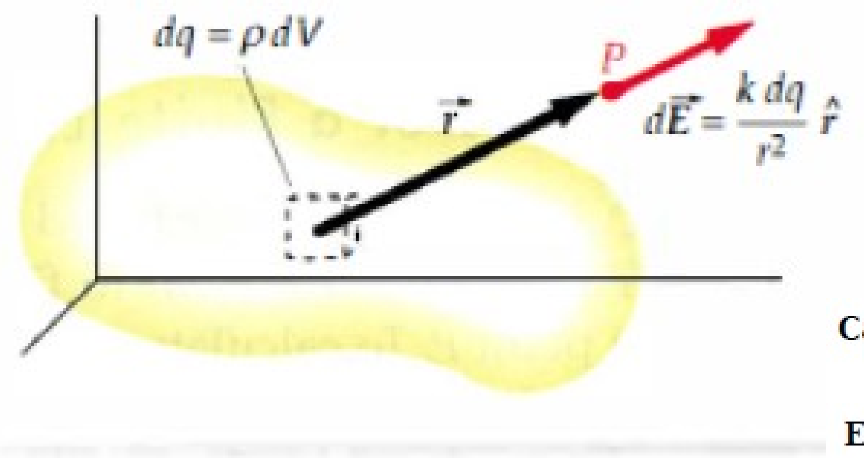
Por tanto, entre los campos (con la aproximación mencionada anteriormente):

$$\overline{\boldsymbol{E}} = 4\pi k_E \frac{Q}{A}\,\hat{\boldsymbol{x}} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}\,\hat{\boldsymbol{x}}$$

CAMPO ELÉCTRICO DEBIDO A DISTRIBUCIONES DE CARGAS

Veremos algunos resultados de campos eléctricos que se obtienen mediante integración directa o aplicado la ley de Gauss.

Estos resultados no son requeridos para este curso.



Campo eléctrico de distribuciones de carga continua

$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E} = \int_V \frac{kdq}{r^2}\hat{\mathbf{r}} \quad \text{donde}$$

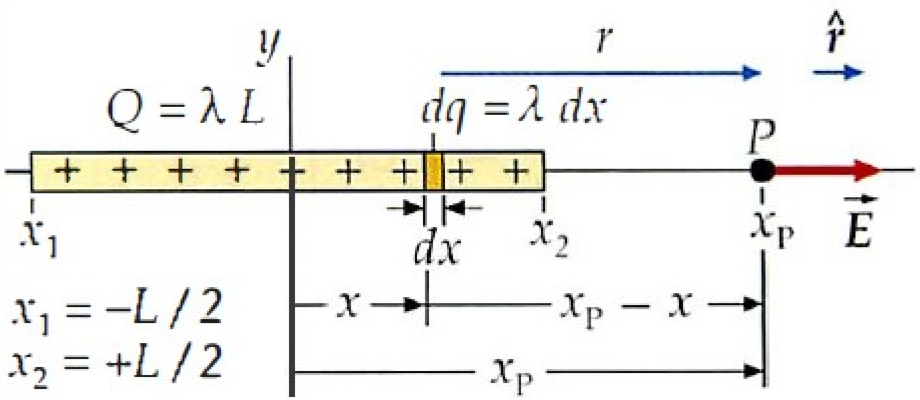
$dq = \rho\ dV$ para una carga distribuida en un determinado volumen, con ρ densidad de carga volumétrica

$dq = \sigma\ dA$ para una carga distribuida en una determinada superficie, con σ densidad de carga superficial

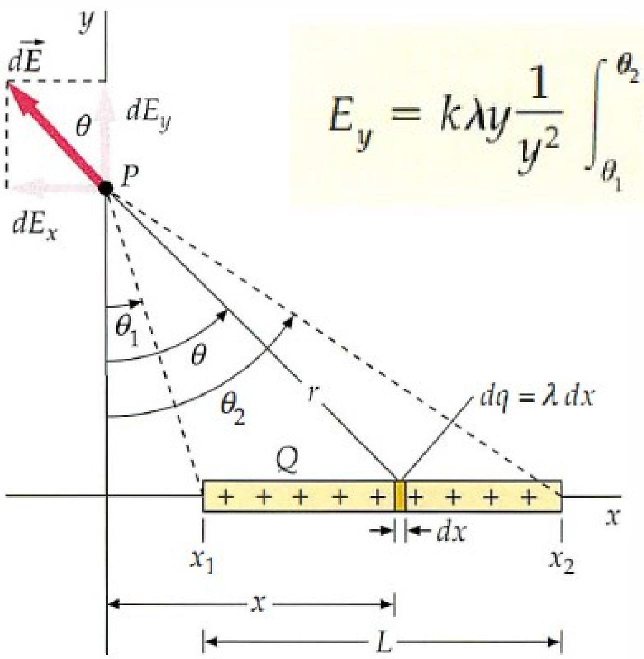
$dq = \lambda\ dL$ para una carga distribuida a lo largo de una línea, con λ densidad de carga lineal

$\hat{\mathbf{r}}$ es el versor que apunta desde el elemento dq al punto P donde se va a calcular el campo y r, la distancia entre los mismos.

Campo creado por una línea uniformemente carga (λ) finita



$$E_x = \frac{kQ}{x_P^2 - (\frac{1}{2}L)^2}, \qquad x_P > \tfrac{1}{2}L$$

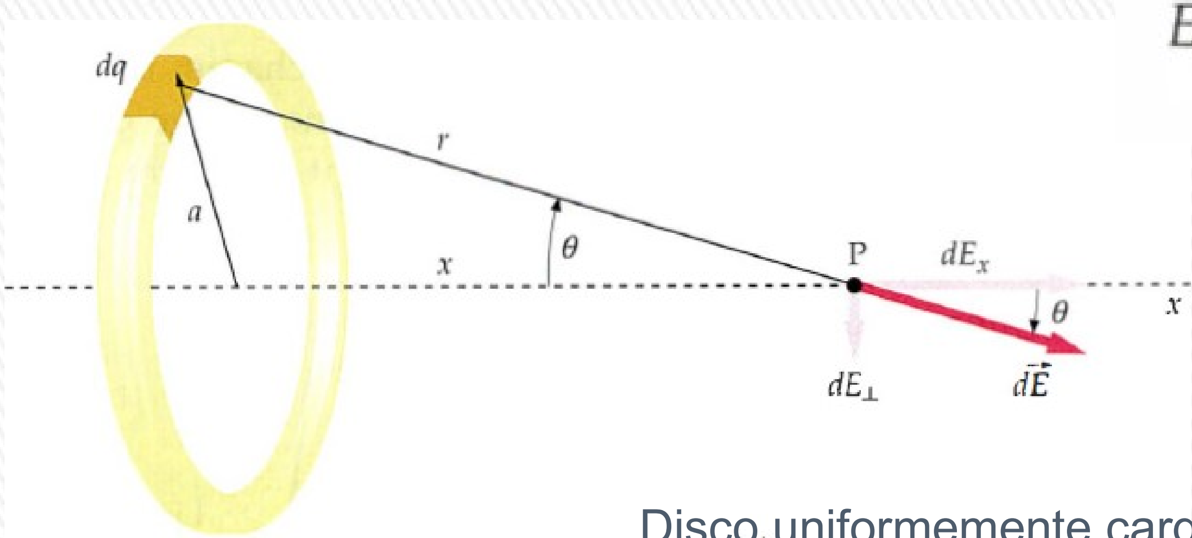


$$E_y = k\lambda y \frac{1}{y^2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos\theta\, d\theta = \frac{k\lambda}{y}(\sin\theta_2 - \sin\theta_1) = \frac{kQ}{Ly}(\sin\theta_2 - \sin\theta_1)$$

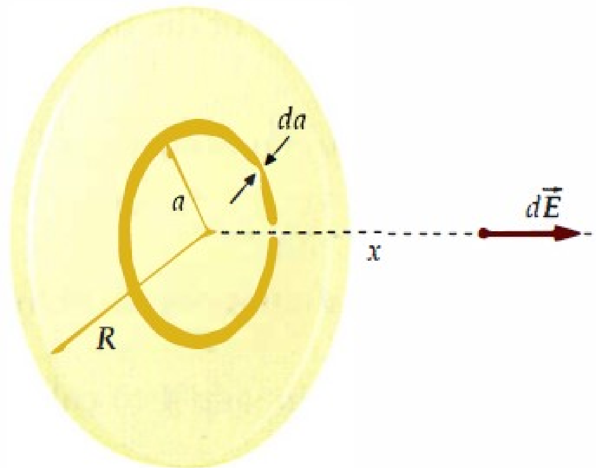
$$E_x = \frac{k\lambda}{y}(\cos\theta_2 - \cos\theta_1)$$

2.- Anillo de carga- Densidad de carga λ uniforme, con carga total Q, radio a y calculado sobre el eje.

$$E_x = \frac{kQx}{(x^2 + a^2)^{3/2}}$$



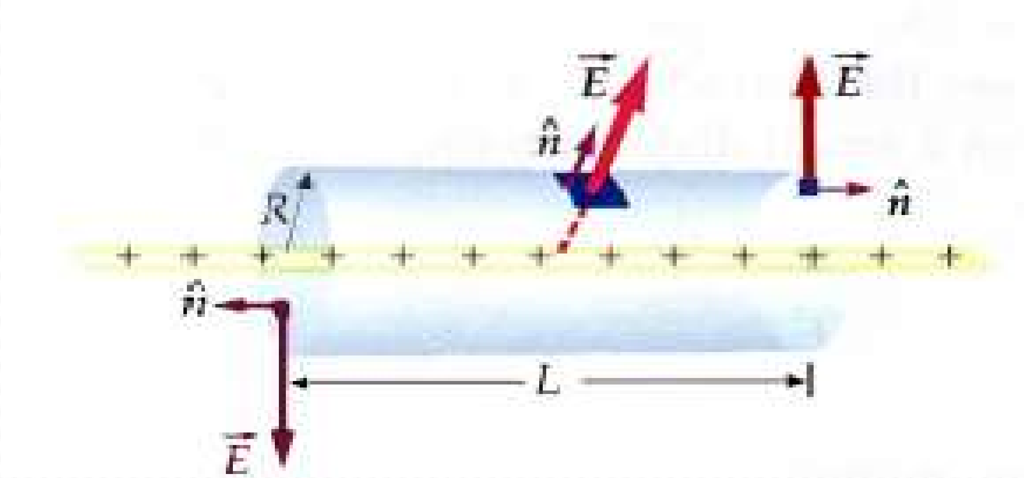
Disco uniformemente cargado. Campo sobre el eje.



$$E_x = 2\pi k\sigma\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{R^2}{x^2}}}\right), \qquad x > 0$$

Campo eléctrico mediante la ley de Gauss

Simetría cilíndrica
Línea infinita de carga con densidad de carga lineal λ



$$\mathbf{E}(r) = E(r)\hat{\mathbf{r}}$$

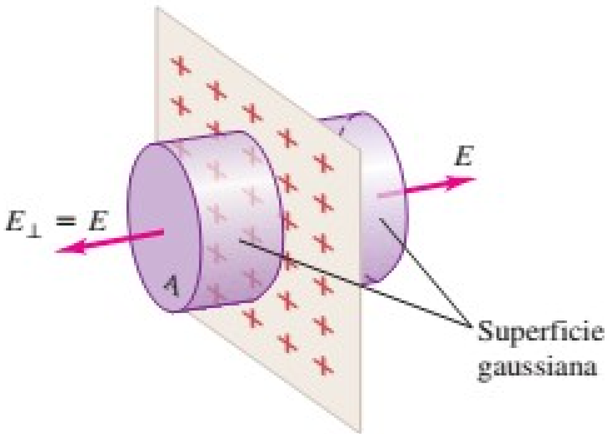
$$\mathbf{E}(r) = \frac{q}{2\pi\varepsilon_0 rL}\hat{\mathbf{r}}$$

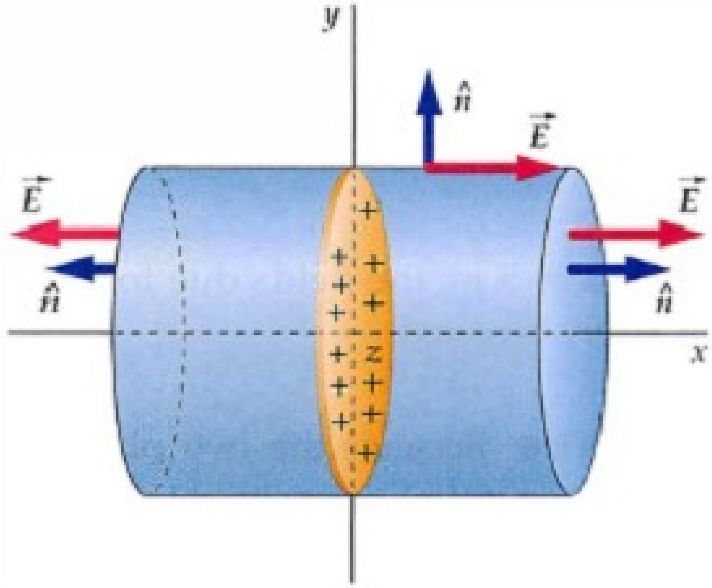
Campo eléctrico mediante la ley de Gauss

Simetría plana

Plano infinito de carga con densidad de carga superficial σ

22.20 Superficie gaussiana cilíndrica que se utiliza para encontrar el campo de una lámina plana infinita cargada.





$$\mathbf{E} = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}\,\widehat{\mathbf{n}}$$

$$\phi_{neto} = \oint E_n\, dA = \frac{1}{\epsilon_0}\, Q_{interior}$$

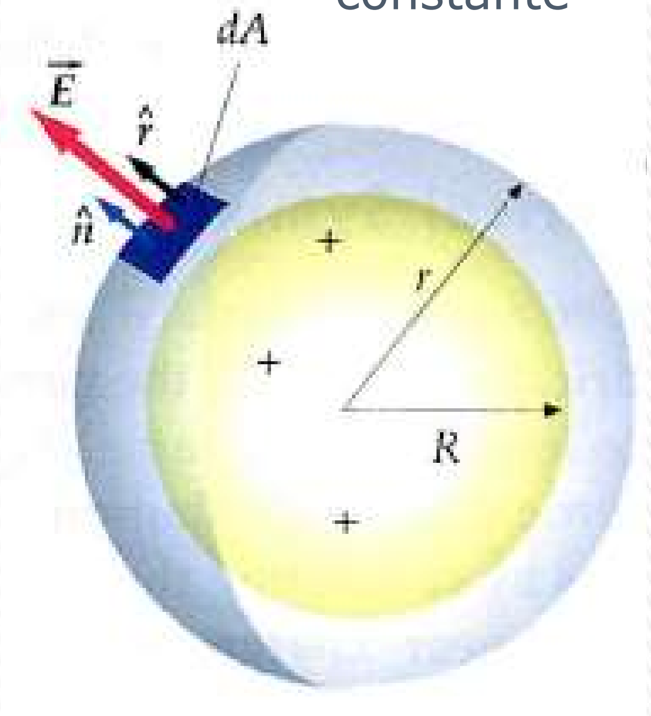
$$2E_nA = \frac{1}{\epsilon_0}\,\sigma A$$

Campo eléctrico mediante la ley de Gauss

Simetría esférica: $$\mathbf{E}(r) = E(r)\hat{\mathbf{r}}$$

Esfera de radio R cargada con carga q.

Si la carga se distribuye uniformemente en el volumen. Entonces hay una densidad de carga volumétrica ρ constante



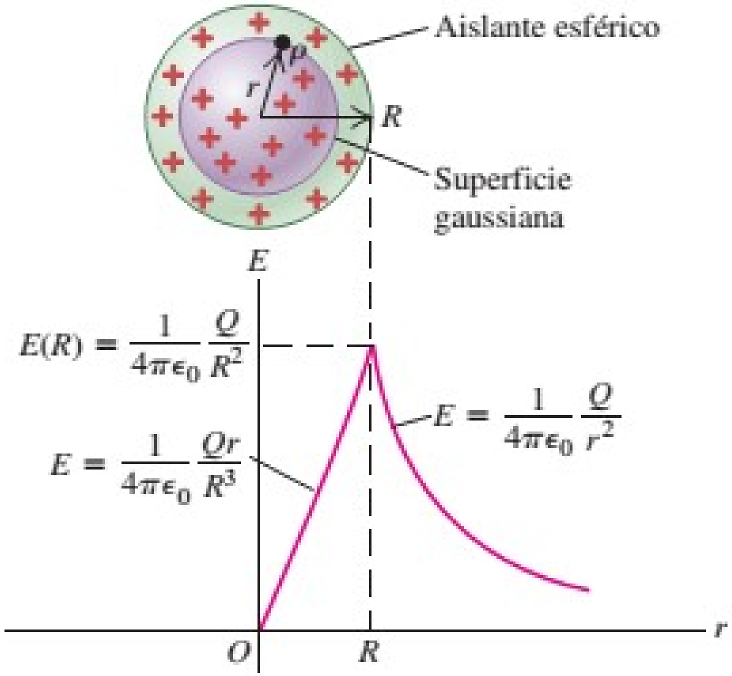
1) Para r > R

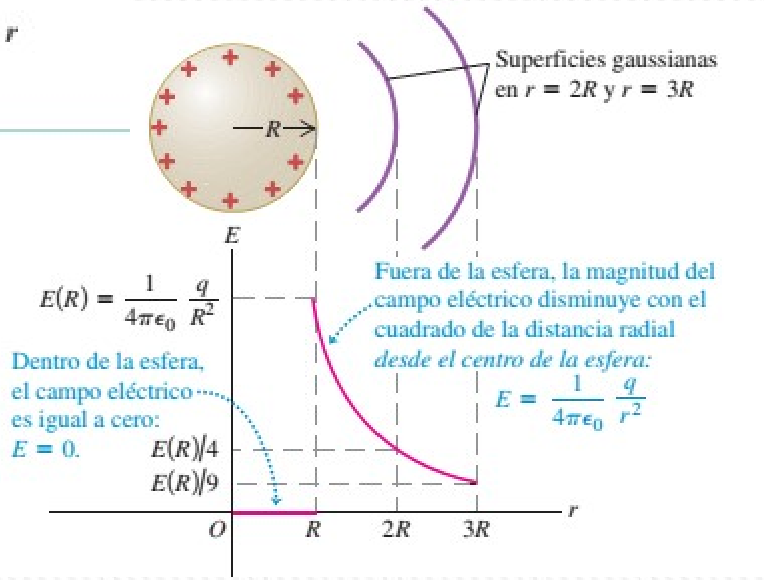
$$E(r) = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$$

2) Para r < R

$$E(r) = \frac{\rho r}{3\varepsilon_0} = \frac{q r}{4\pi\varepsilon_0 R^3}$$

22.22 Magnitud del campo eléctrico de una esfera aislante con carga uniforme. Compare esto con el campo de una esfera conductora (figura 22.18).





¿Cómo sería la gráfica si fuera una esfera conductora con carga Q?

Campo eléctrico de distribuciones simétricas de carga

Campo eléctrico de varias distribuciones simétricas de carga: En la siguiente tabla se listan los campos eléctricos generados por varias distribuciones simétricas de carga. En la tabla, q, Q, λ y σ se refieren a las *magnitudes* de las cantidades.

Distribución de la carga	Punto en el campo eléctrico	Magnitud del campo eléctrico
Una sola carga puntual	Distancia r desde q	$E = \dfrac{1}{4\pi\epsilon_0}\dfrac{q}{r^2}$
Carga q en la superficie de una esfera conductora de radio R	Esfera exterior, $r > R$	$E = \dfrac{1}{4\pi\epsilon_0}\dfrac{q}{r^2}$
	Esfera interior, $r < R$	$E = 0$
Alambre infinito, carga por unidad de longitud λ	Distancia r desde el alambre	$E = \dfrac{1}{2\pi\epsilon_0}\dfrac{\lambda}{r}$
Cilindro conductor infinito con radio R, carga por unidad de longitud λ	Cilindro exterior, $r > R$	$E = \dfrac{1}{2\pi\epsilon_0}\dfrac{\lambda}{r}$
	Cilindro interior, $r < R$	$E = 0$
Esfera aislante sólida con radio R, carga Q distribuida de manera uniforme en todo el volumen	Esfera exterior, $r > R$	$E = \dfrac{1}{4\pi\epsilon_0}\dfrac{Q}{r^2}$
	Esfera interior, $r < R$	$E = \dfrac{1}{4\pi\epsilon_0}\dfrac{Qr}{R^3}$
Placa infinita cargada con carga uniforme por unidad de área σ	Cualquier punto	$E = \dfrac{\sigma}{2\epsilon_0}$
Dos placas conductoras con cargas opuestas con densidades superficiales de carga $+\sigma$ y $-\sigma$	Cualquier punto entre las placas	$E = \dfrac{\sigma}{\epsilon_0}$