Física 3: Electricidad y Magnetismo

Pablo Dmitruk

2do cuatrimestre 2020 - DF/FCEN/UBA

Carga eléctrica

Hago alguna acción sobre un material, por ejemplo froto con lana una piedra (o un globo) y observo que ese material atrae a otro material, por ejemplo, pedacitos de papel ----> aparecen fuerzas nuevas, a distancia, que no son las conocidas de Física 1 como las de contacto o la gravitatoria (se puede ver a posteriori que las de “contacto” en realidad tienen el mismo origen).

Decimos que un material (la piedra o el globo en este caso) quedó “cargado electricamente” o adquirió “carga eléctrica”. Lo mismo sucede con la lana que usamos para frotar, también queda “cargada”.

Las fuerzas pueden ser de atracción o repulsión ---> observación: en la acción sobre el material (frotamiento), uno de los materiales queda “cargado positivamente” (la lana) y otro queda “cargado negativamente” (la piedra o el globo). El signo de la carga lo tomamos por convención, y podemos cargar un cuerpo en mayor o menor medida (segun la acción de frotamiento que hagamos) pero sólo hay 2 tipos de carga: (+) y (-).

Si dos cuerpos cargados A y B se repelen y el cuerpo A atrae a otro cuerpo cargado C, entonces B y C también se atraen.

Hoy entendemos la carga como una propiedad de la materia ---> átomos formados de partículas con carga positiva (protones) y con carga negativa (electrones), además de partículas neutras, sin carga (neutrones). La carga del electrón es la mínima (en valor absoluto) carga posible no nula, y la indicamos por $q_e = -e$

La carga del protón es igual y opuesta, $q_p = +e$

En la acción de frotar la lana (o nuestro pelo) sobre la piedra (o el globo) estamos traspasando (arrancando) electrones de los átomos de la lana (o el pelo) a la piedra (o el globo). La piedra (o el globo) queda cargada negativamente por el exceso de electrones y la lana (o el pelo) queda cargada positivamente por la falta de electrones (asumimos que la materia se encontraba inicialmente con carga neutra).

En general la materia se encuentra en estado neutro por el balance exacto de cargas positivas y negativas, y tenemos que ejercer alguna acción para generar un desbalance de cargas, ya sea por traspaso directo de cargas de un cuerpo a otro o por inducción (movimiento de cargas en un mismo cuerpo).

Aca algunos videos de enseñanza con experimentos que ilustran fenómenos con cargas (electrostática)

https://www.youtube.com/watch?v=4UkRdN8aPmM

https://www.youtube.com/watch?v=NsxhbgCrrSQ

https://www.youtube.com/watch?v=ViZNgU-Yt-Y&t=151s

https://www.youtube.com/watch?v=t_d2PLoOGcI

https://www.youtube.com/watch?v=oU8Fe6846d4

Los fenómenos que vamos a estudiar siguen una descripción dentro de la física clásica, a distancias mayores que el radio de un átomo, $r > 10^{-10}$ m.
Para distancias menores, hay que entrar en la descripción cuántica.

De todas formas, introducimos una idealización:

carga *puntual* **--->** sus dimensiones son mucho menores que las distancias a otros cuerpos cargados (misma idea que *masa puntual* en F1)

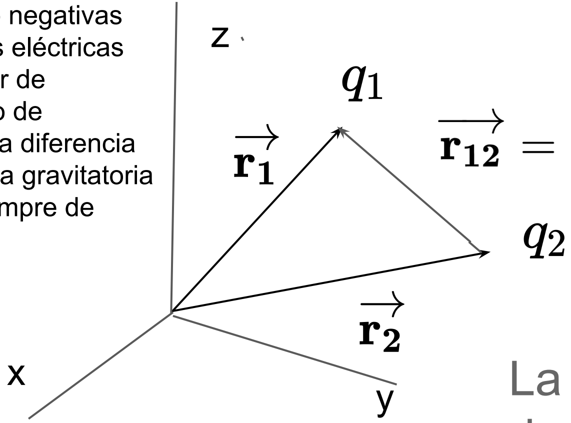
LEY DE COULOMB

[Charles-Augustin de Coulomb]

Supongamos dos cargas puntuales q_1 y q_2 en posiciones $\overrightarrow{\mathbf{r_1}}$ y $\overrightarrow{\mathbf{r_2}}$, en reposo (quietas). La **fuerza eléctrica** $\overrightarrow{\mathbf{F}_{12}}$ que ejerce q_2 sobre q_1 actúa en la dirección que une las dos cargas,es directamente proporcional a los valores de las cargas e inversamente proporcional a la distancia al cuadrado entre ellas. Es decir,

$$\overrightarrow{\mathbf{F}_{12}} = kq_1q_2 \frac{\hat{\mathbf{r}_{12}}}{\left|\overrightarrow{\mathbf{r}_{12}}\right|^2} = kq_1q_2 \frac{\overrightarrow{\mathbf{r}_{12}}}{\left|\overrightarrow{\mathbf{r}_{12}}\right|^3} = kq_1q_2 \frac{\overrightarrow{\mathbf{r}_1}-\overrightarrow{\mathbf{r}_2}}{\left|\overrightarrow{\mathbf{r}_1}-\overrightarrow{\mathbf{r}_2}\right|^3}$$

Notemos que como las cargas pueden ser positivas o negativas las fuerzas eléctricas pueden ser de atracción o de repulsión, a diferencia de la fuerza gravitatoria que es siempre de atracción.



$$\overrightarrow{\mathbf{r}_{12}} = \overrightarrow{\mathbf{r}_1} - \overrightarrow{\mathbf{r}_2}$$

La fuerza sobre q_2 debida a q_1 es de igual módulo y de signo opuesto $\overrightarrow{\mathbf{F}_{21}} = -\overrightarrow{\mathbf{F}_{12}}$, es decir, forman un par de acción y reacción.

La constante de proporcionalidad k se denomina *constante eléctrica*

Principio de Superposición

Supongamos tenemos N cargas puntuales q_i, con $i = 1, 2, 3, \ldots\ldots, N$
en posiciones $\overrightarrow{\mathbf{r}'_\mathbf{i}}$ y traemos otra carga puntual q a la posición $\overrightarrow{\mathbf{r}}$ (carga de prueba).
La fuerza sobre q es la suma de las fuerzas que ejerce cada una de las cargas q_i

$$\overrightarrow{\mathbf{F}}(\overrightarrow{\mathbf{r}}) = \sum_{i=1}^{N} k\, q\, q_i \ \frac{\overrightarrow{\mathbf{r}} - \overrightarrow{\mathbf{r}_\mathbf{i}{}'}}{|\overrightarrow{\mathbf{r}} - \overrightarrow{\mathbf{r}'_\mathbf{i}}|^3}$$

Unidades

Utilizamos el Sistema Internacional de unidades (SI), basado en el MKS. Se define la unidad de carga al Coulomb = C (o castellanizado “culombio”....) tal que la fuerza entre dos cargas de 1C a 1m de distancia es $8,9875\,10^9$ N.

Nota: en realidad en el Nuevo SI la unidad fundamental es el Ampere (A) que veremos a posteriori, como unidad de corriente eléctrica y el C se define como A.s

Póster sobre el Nuevo SI: https://www.inti.gob.ar/assets/uploads/metrologia/poster.pdf

Página del INTI sobre el Nuevo SI: https://www.inti.gob.ar/areas/metrologia-y-calidad/si

De la ley de Coulomb podemos despejar entonces el valor de la constante eléctrica

$$k = 8,9875\,10^9 \; N\,m^2/C^2$$

que aproximamos con un valor de 9.

Muchas veces se utiliza también la *constante dieléctrica del vacío*

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8,8542\,10^{-12}\,\frac{C^2}{Nm^2}$$

La carga del electrón es $e = 1.60219\,10^{-19}\,C$ que podríamos ver como una cantidad muy pequeña, pero también indica lo grande que es un Coulomb, ya que una carga de 1C corresponde a 10^{19} electrones.

La fuerza eléctrica es similar a la gravitatoria, ya que depende de la inversa de la distancia al cuadrado entre las dos cargas. Pero se puede ver que su intensidad es mucho mayor. Consideremos por ejemplo la interacción gravitatoria entre un protón y un electrón en un átomo, si están a una distancia r, será: $F_g = G\,m_p\,m_e/r^2$ mientras que la fuerza eléctrica es: $F_E = k\,q_p\,q_e/r^2$, por lo tanto, $F_E/F_g = (k\,q_p\,q_e)/(G\,m_p\,m_e)$.
Reemplazando por los valores numéricos, $q_p = -q_e = e = 1.6\,10^{-19}C$ y $m_e = 9\,10^{-31}kg,\ m_p = 1836\,m_e$ y con los valores de k y G conocidos, se obtiene $F_E/F_g \approx 10^{39}$!!!!!!

Esto da una idea de lo intensas que son las fuerzas eléctricas. La pregunta es...por qué no las sentimos en nuestra vida diaria ?

Campo Eléctrico

Supongamos nuevamente N cargas puntuales $q_i \quad (i = 1, 2, 3, \ldots, N)$
en posiciones $\vec{\mathbf{r}}'_{\mathbf{i}}$ y traemos otra carga puntual q a la posición $\vec{\mathbf{r}}$ (carga de prueba).
La fuerza eléctrica sobre q es

$$\vec{\mathbf{F}}(\vec{\mathbf{r}}) = \sum_{i=1}^{N} k\, q\, q_i \, \frac{\vec{\mathbf{r}} - \vec{\mathbf{r}_{\mathbf{i}}}'}{|\vec{\mathbf{r}} - \vec{\mathbf{r}}'_{\mathbf{i}}|^3}$$

Definimos el *campo eléctrico* (generado por la configuración de cargas q_i) al campo vectorial

$$\vec{\mathbf{E}}(\vec{\mathbf{r}}) = \vec{\mathbf{F}}/q = \sum_{i=1}^{N} k\, q_i \, \frac{\vec{\mathbf{r}} - \vec{\mathbf{r}_{\mathbf{i}}}'}{|\vec{\mathbf{r}} - \vec{\mathbf{r}}'_{\mathbf{i}}|^3}$$

Notemos que el campo eléctrico no depende de la carga de prueba que traigamos. Esto supone que esa carga de prueba no modifica a las cargas de la distribución de cargas que genera el campo. Formalmente, podemos asegurar esa suposición si definimos el campo eléctrico como el límite de la fuerza eléctrica por unidad de carga, $\vec{\mathbf{F}}/q$, cuando la carga de prueba $q \to 0$.

El campo eléctrico entonces podemos pensarlo como una propiedad del espacio (definido en cada punto del espacio mediante un campo vectorial), que depende de la distribución de cargas que lo genera y que nos dice cuánto vale la fuerza eléctrica que siente una carga de prueba q si la traemos a una posición $\vec{\mathbf{r}}$, $\vec{\mathbf{F}} = q\vec{\mathbf{E}}(\vec{\mathbf{r}})$

La idea que el campo eléctrico existe (dada una distribución de cargas que lo genera) independientemente de que uno traiga una carga de prueba para medirlo (a través de la medición de la fuerza sobre la carga) es conceptualmente *muy importante*.

El concepto de pensar un campo, como una *propiedad del espacio* (que afecta a una carga que uno trae a un punto dado) es conceptualmente distinto a pensar la fuerza sobre la carga como una acción a distancia (ejercida por otras cargas).

De la definición obtenemos las unidades de intensidad de campo eléctrico $[E] = N/C$.

Si colocamos una única carga puntual q_0 en una posición $\overrightarrow{\mathbf{r_0}}$ genera un campo eléctrico en todo el espacio, dado por:

$$\overrightarrow{\mathbf{E}}(\overrightarrow{\mathbf{r}}) = k\, q_0\, \frac{\overrightarrow{\mathbf{r}} - \overrightarrow{\mathbf{r_0}}}{|\overrightarrow{\mathbf{r}} - \overrightarrow{\mathbf{r_0}}|^3}$$

Este campo en coordenadas cartesianas tiene componentes:

$$E_x = k\, q_0\, \frac{x - x_0}{[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2]^{3/2}}$$

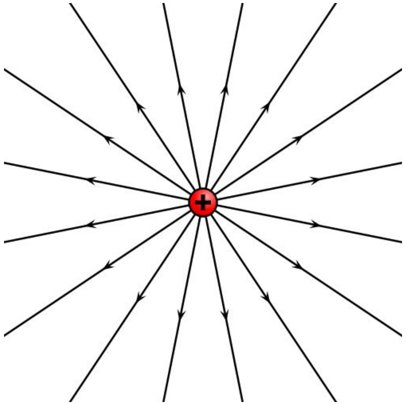
$$E_y = k\, q_0\, \frac{y - y_0}{[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2]^{3/2}}$$

$$E_z = k\, q_0\, \frac{z - z_0}{[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2]^{3/2}}$$

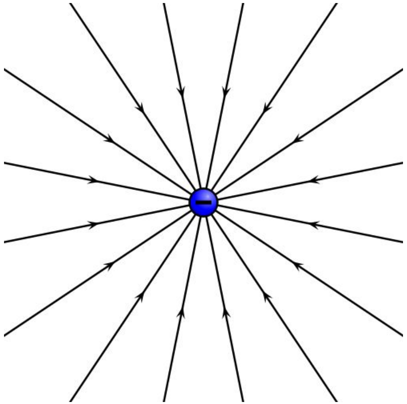
Si la carga q_0 está en el origen $\overrightarrow{\mathbf{r_0}} = 0$, el campo eléctrico que genera es

$$\overrightarrow{\mathbf{E}}(\overrightarrow{\mathbf{r}}) = k\, q_0\, \frac{\overrightarrow{\mathbf{r}}}{|\overrightarrow{\mathbf{r}}|^3} = k\, q_0\, \frac{\hat{\mathbf{r}}}{r^2}$$

Este es un campo radial (central) desde el origen, que podríamos representar gráficamente mediante *líneas de campo* que en este caso serán líneas radiales desde el origen:



si q_0 es positiva



si q_0 es negativa

Las *líneas de campo* se construyen con líneas tangentes al campo vectorial, es decir, indican la dirección del campo que representan. La ecuación de una línea de campo es entonces pedir que el diferencial sobre la línea $\overrightarrow{\mathbf{dr}}$ sea paralelo al campo, es decir

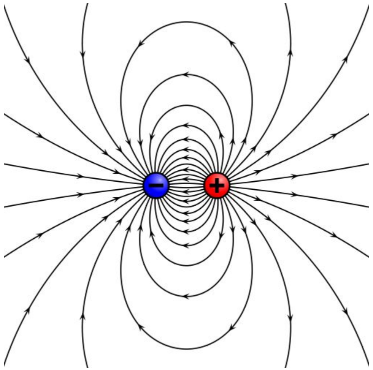
$$\overrightarrow{\mathbf{dr}} = \lambda \overrightarrow{\mathbf{E}}$$

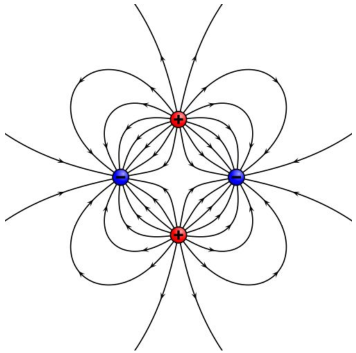
$$\rightarrow \quad \frac{dx}{E_x} = \frac{dy}{E_y} = \frac{dz}{E_z} = \lambda = cte$$

Para representar además la intensidad del campo se establece que la *densidad de líneas* por unidad de longitud sea proporcional a la intensidad (módulo) del campo. En el ejemplo de las cargas positiva o negativas en el origen, notar que la densidad de líneas aumenta al acercarse al origen y disminuye a medida que nos alejamos de la carga central (debería disminuir como la inversa de la distancia al cuadrado).

La idea de representar un campo mediante sus líneas de campo se utiliza también en fluidos para representar por ejemplo el campo de velocidades de un fluido. Las líneas dan allí una idea del movimiento del fluido, idea que no es muy adecuada para el campo eléctrico, ya que en este caso no hay algo que *fluya* (aunque en los estudios iniciales sobre la electricidad se pensaba en la existencia de un "*fluido eléctrico*").

Otras configuraciones de cargas y su representación con líneas de campo:



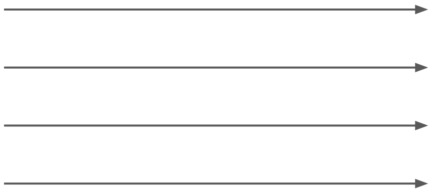


app para graficar líneas de campo de dos cargas: https://academo.org/demos/electric-field-line-simulator/

y otra app que grafica vectores para representar el campo de varias cargas:
https://www.physicsclassroom.com/Physics-Interactives/Static-Electricity/Electric-Field-Lines/Electric-Field-Lines-Interactive

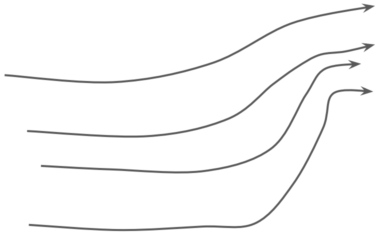
Si el campo es uniforme (constante) las líneas son rectas paralelas, equiespaciadas:

$$\overrightarrow{\mathbf{E}} = \overrightarrow{\mathbf{E_0}}$$



Un campo no uniforme que se intensifica:

E_1



$E_2 > E_1$