

ELECTROMAGNETISMO

La materia está constituida por partículas elementales y estas partículas poseen propiedades que les permiten responder a las interacciones fundamentales de la naturaleza para generar la estructura misma de la materia, sus propiedades y su evolución en el espacio y en el tiempo. Una de esas propiedades es la carga eléctrica, propiedad responsable de los eventos conocidos como fenómenos electromagnéticos. Estos fenómenos agrupan los eventos eléctricos y los eventos magnéticos, así como el acople de dichos eventos y además los eventos ópticos. Este conjunto de eventos son la manifestación de una interacción fundamental de la naturaleza llamada interacción electromagnética.

El electromagnetismo es la teoría física de la interacción electromagnética y, por tanto, el marco conceptual desde el cual, los fenómenos electromagnéticos son comprendidos y utilizados para el desarrollo de nuestra civilización.

CAMPOS ELECTROSTÁTICOS

INTRODUCCIÓN

El hecho observado en la naturaleza es que, objetos “electrificados” experimentan atracción o repulsión. Es decir, ¡los cuerpos electrificados experimentan una fuerza a distancia! Esta fuerza se denomina fuerza eléctrica y al igual que otras fuerzas de la naturaleza esta fuerza se debe a una propiedad de la materia; más precisamente a una propiedad de las partículas elementales que constituyen la materia. Esta propiedad se denomina **carga eléctrica**, se representa mediante el símbolo **q** , y es una **cantidad escalar**, es decir, es un número que le asociamos a cada partícula dependiendo de su interacción eléctrica con el resto del universo. Para estudiar las cualidades de la carga eléctrica se requieren observaciones experimentales muy elaboradas. Estas observaciones experimentales muestran lo siguiente:

- I. La carga eléctrica existe en dos variedades. Estos dos tipos de carga son etiquetados como **positivo** y **negativo**. Cuando dos partículas poseen carga del mismo tipo se **repelen**; mientras que, si poseen carga de diferente tipo se **atraen**

- II. La carga eléctrica está cuantizada. Esto es, se manifiesta en cantidades múltiplo de una cantidad fundamental de carga llamada el **cuanto de carga** y simbolizada **e**. Así, la carga eléctrica de una entidad física se expresa,

$$q = \pm Ne$$

donde q es la carga de la entidad física, N es la cantidad de cuantos de carga que posee la entidad, e es el cuánto de carga eléctrica y el signo depende del tipo de carga que posee la entidad física. La medida de un cuanto de carga eléctrica (Experimento de Millikan, 1911) es:

$$e = 1.60218 \times 10^{-19} C,$$

donde C representa la unidad de medida de la carga eléctrica en el sistema internacional, el **Coulomb**. El **protón** y el **electrón** tienen exactamente la misma cantidad de carga eléctrica, un cuánto de carga cada uno. Sin embargo son de tipo opuesto, así por convenio la carga del protón se considera del tipo positiva, $q_p = +e$, y la del electrón se considera del tipo negativa, $q_e = -e$. Si cambiáramos las etiquetas de las cargas del protón y el electrón igual seguirían teniendo carga opuesta con lo que la naturaleza de los procesos eléctricos sería la misma. Existen partículas que no poseen carga eléctrica, un tipo particular de estas partículas son los **neutrones**.

- III. La carga eléctrica se conserva. Cuando un sistema de N cargas está aislado, la carga eléctrica neta del sistema, q_n , permanece constante. Esto es,

$$q_n = \sum_{i=1}^N q_i = \text{Constante}$$

Ahora veamos lo que significan estos tres resultados experimentales y su contenido formal, en cuanto a la comprensión de los fenómenos eléctricos.

Todos los sistemas físicos están constituidos por partículas; básicamente protones, electrones y neutrones. Los electrones son partículas verdaderamente fundamentales; es decir, no tienen estructura interna. Los protones y neutrones por el contrario si tienen estructura interna, están hechos de partículas llamadas quarks. De acuerdo con estas observaciones la **carga neta** q_n de un sistema físico debe ser la suma de las cargas de las partículas que constituyen dicho sistema físico. Esto es,

$$q_n = \sum_{i=1}^N q_i$$

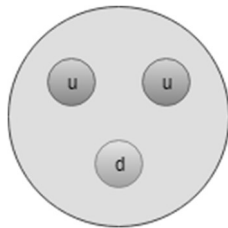
Donde q_i es la carga eléctrica de la partícula i -ésima dentro de la entidad física y N el número total de partículas que posee dicha entidad física.

Un átomo de litio, Li, por ejemplo, es una entidad física que consta de seis partículas, tres protones y tres electrones. La carga neta de un átomo de litio es

$$q_n = \sum_{i=1}^6 q_i = q_1 + q_2 + \cdots + q_6 = 3q_p + 3q_e = 3(+e) + 3(-e) = 0$$

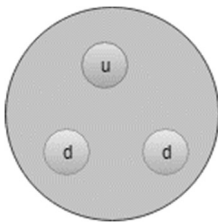
Luego un átomo de litio es neutro ya que su carga eléctrica neta es cero. Los átomos en general en su estado natural son neutros, pero existen procesos mediante los cuales los átomos pierden o ganan electrones, con lo que la carga neta se hace distinta de cero, el átomo deja de ser neutro y puede experimentar atracción o repulsión eléctrica con otro átomo. Esto explica porque los objetos (conjuntos de átomos) electrificados (sometidos a algún proceso físico que transfiere electrones) presentan atracción o repulsión. La carga neta de tales objetos, ha sido modificada debido a una acción externa (por ejemplo, frotar su superficie) y como consecuencia ahora experimentan fuerzas eléctricas.

Ahora bien, los protones y neutrones están hechos de quarks por consiguiente su carga neta debe ser debida a la carga de estos quarks. Veamos,



Un protón está constituido por dos quarks arriba con carga $q_{up} = +\frac{2}{3}e$ y un quark abajo con carga $q_{down} = -\frac{1}{3}e$, lo que le da al protón una carga neta

$$q_p = 2q_{up} + 1q_{down} = 2(+\frac{2}{3}e) + (1)(-\frac{1}{3}e) = +e$$



Un neutrón consta de un quark arriba y dos quarks abajo, lo que le da una carga neta

$$q_n = 1q_{up} + 2q_{down} = 1(+\frac{2}{3}e) + (2)(-\frac{1}{3}e) = 0$$

Los sistemas físicos pueden estar sometidos a interacciones con su entorno, conformado por otros sistemas físicos, o pueden estar aislados. En un sistema aislado (libre de interacción) como un átomo de litio, un protón o un neutrón, en el que no están entrando o saliendo partículas materiales, los experimentos muestran que la carga neta permanece invariable. Este principio fundamental refleja una simetría en la naturaleza,

ya que siempre que se crea carga eléctrica de un signo en el universo, se crea la misma cantidad de carga del signo opuesto y viceversa, siempre que se destruye carga de un tipo en el universo se destruye la misma cantidad de carga del tipo opuesto, con lo que la carga neta del universo ha permanecido constante desde el origen del mismo. Esto puede verse en los procesos de creación y aniquilación de pares partícula-antipartícula (materia-antimateria).

Volvamos al caso de los objetos electrificados. Un objeto que es frotado con otro obviamente no es un sistema aislado (hay tránsito de electrones), por tanto, su carga neta cambia ya que al frotar los electrones pueden pasar al objeto o salir de él. Este proceso de alterar la carga neta de un objeto se llama **carga electrostática**. La carga electrostática se da por fricción, por simple contacto y por inducción.

AISLANTES, CONDUCTORES Y SEMICONDUCTORES

En términos simples los materiales se clasifican en función de la facilidad con la que los electrones se mueven a través de ellos. Los **conductores** son aquellos materiales en los cuales los electrones tienen alta movilidad. Los **aislantes** son los materiales en los cuales los electrones tienen poca movilidad. Los semiconductores presentan un comportamiento que puede ser conductor o aislante dependiendo de las condiciones físicas como presión, campos externos y temperatura. Existe un cuarto estado llamado superconductor el cual es alcanzado por algunos materiales sometidos a muy bajas temperaturas, cercanas al cero absoluto.

LEY DE COULOMB

Experimentalmente se encuentra que la magnitud de **la fuerza eléctrica** entre dos cargas q y q' separadas una distancia r (el símbolo \propto significa proporcional) es:

- I. Proporcional al producto de las cargas:

$$F \propto |q||q'|$$

- II. Proporcional al inverso del cuadrado de la distancia que las separa:

$$F \propto \frac{1}{r^2}$$

En síntesis

$$F \propto \frac{|q||q'|}{r^2} \longrightarrow F = K \frac{|q||q'|}{r^2}$$

Para que la proporcionalidad obtenida de los experimentos, se convierta en una ecuación, se debe establecer experimentalmente el valor de la constante de proporcionalidad K ,

$$K = ?$$

El experimento consiste en utilizar dos cargas de la misma magnitud $|q| = |q'| = 1C$ y colocarlas separadas una distancia $r = 1m$. En estas condiciones se mide la magnitud de la fuerza entre las cargas y se encuentra el valor,

$$F = 9 \cdot 10^9 N$$

Llevando este resultado a la ecuación planteada para formalizar la proporcionalidad se encuentra que,

$$F = K \frac{|q| |q'|}{r^2}$$
$$9 \cdot 10^9 N = K \cdot \frac{1C^2}{1m^2}$$

Despejando la constante de proporcionalidad se encuentra que su valor es

$$9 \cdot 10^9 N \frac{m^2}{C^2} = K$$

Esta constante de proporcionalidad se denomina constante de Coulomb y su presencia en la ley de Coulomb implica algo que está sucediendo adicionalmente pero que no podemos conocer aún. La ley de Coulomb se expresa entonces,

$$F = 9 \cdot 10^9 N \frac{m^2}{C^2} \cdot \frac{|q| |q'|}{r^2}$$

O de manera simplificada,

$$F = K \frac{|q| |q'|}{r^2}$$

Pero la evidencia experimental nos dice mucho más todavía. De hecho, la fuerza eléctrica entre cargas actúa en la línea que une las cargas. Vectorialmente se puede expresar el siguiente enunciado,

Ley de Coulomb

La fuerza electrostática entre dos cargas puntuales q y q' separadas una distancia r , actúa a lo largo de la línea que une las cargas y viene dada por la expresión

$$\vec{F} = K \frac{q \cdot q'}{r^2} \hat{r}$$

Donde \hat{r} es el vector unitario utilizado por un observador inercial ubicado en una de las cargas.

Observe que:

- 1) Si las cargas q y q' tienen el mismo signo, la fuerza actúa en la dirección de observación, $\vec{F} \parallel \hat{r}$



- 2) Si las cargas q y q' tienen distinto signo, la fuerza actúa en dirección opuesta a la dirección de observación, $\vec{F} \parallel (-\hat{r})$



Principio de superposición

La fuerza eléctrica sobre una carga puntual, es la suma vectorial de las fuerzas eléctricas, \vec{F}_i , sobre la carga, debidas a todas las otras cargas presentes en el sistema.

$$\vec{F} = \sum_i \vec{F}_i$$

Problema

Dos cargas negativas de la misma magnitud $-q$ y $-q$, están fijas en las coordenadas $(-d, 0)$ y $(d, 0)$. Una carga positiva de la misma magnitud, q , y de masa m , está colocada en la coordenada $(0, 0)$, a la mitad de camino entre las dos cargas negativas. Si la carga positiva se mueve a una distancia $\delta \ll d$ en la dirección y positiva y luego se suelta, el movimiento resultante es el de un oscilador armónico simple: la carga positiva oscila entre las coordenadas $(0, \delta)$ y $(0, -\delta)$. Encuentre la fuerza neta que actúa sobre la carga positiva cuando se mueve $(0, \delta)$ y use el desarrollo del binomio $(1 + x)^n \approx 1 + nx$, para $x \ll 1$, a fin de encontrar una expresión para la frecuencia de la oscilación resultante. (*Sugerencia:* Mantenga sólo los términos que sean lineales en δ).