

Electrostática – Cargas eléctricas y Fuerza de Coulomb

Las interacciones del electromagnetismo implican partículas que tienen una propiedad llamada carga eléctrica, es decir, un atributo que es tan fundamental como la masa. De la misma forma que los objetos con masa son acelerados por las fuerzas gravitatorias, los objetos cargados eléctricamente también se ven acelerados por las fuerzas eléctricas. La descarga eléctrica inesperada que sientes cuando frota tus zapatos contra una alfombra, y luego tocas una perilla metálica, se debe a partículas cargadas que saltan de tu dedo a la perilla. Las corrientes eléctricas como las de un relámpago o un televisor tan sólo son flujos de partículas cargadas, que corren por cables en respuesta a las fuerzas eléctricas. Incluso las fuerzas que mantienen unidos a los átomos y que forman la materia sólida, evitando que los átomos de objetos sólidos se atraviesen entre sí, se deben en lo fundamental a interacciones eléctricas entre las partículas cargadas en el interior de los átomos.

Las interacciones electrostáticas se rigen por una relación sencilla que se conoce como ley de Coulomb, y es mucho más conveniente describirlas con el concepto de campo eléctrico. En capítulos posteriores incluiremos en nuestro análisis cargas eléctricas en movimiento, lo que nos llevará a entender el magnetismo y, en forma notable, la naturaleza de la luz.

Es interesante hacer notar que de las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza: nuclear fuerte, electromagnética, nuclear débil y gravitatoria, la interacción electromagnética (o electrostática cuando es entre cargas en reposo) es la segunda más fuerte. De hecho la interacción eléctrica entre dos electrones es aproximadamente 10^{42} veces más fuerte que su correspondiente interacción gravitatoria. Esto da una idea de la magnitud tan importante de las fuerzas eléctricas. No obstante, en la naturaleza hay muchas situaciones en las que la interacción eléctrica no se manifiesta debido a la compensación tan precisa que ocurre en la materia entre cargas positivas y negativas. De hecho los agregados de materia se presentan generalmente en forma neutra y por ello las interacciones entre grandes cantidades de materia (planetas, estrellas, etc) es fundamentalmente de carácter gravitatorio. No obstante, esto no implica que la interacción entre cargas eléctricas sea irrelevante sino que por el contrario, estas interacciones están en la base de multitud de fenómenos fundamentales, por ejemplo: la formación y estabilidad de los átomos, las fuerzas moleculares, las fuerzas de rozamiento, las tensiones mecánicas, las fuerzas de contacto, etc.

Carga eléctrica

En una época tan remota como 600 A.C., los griegos de la antigüedad descubrieron que cuando frotaban ámbar contra lana, el ámbar atraía otros objetos. En la actualidad decimos que con ese frotamiento el ámbar adquiere una carga eléctrica neta o que se carga. La palabra “eléctrico” se deriva del vocablo griego elektron, que significa ámbar. Cuando al caminar una persona frota sus zapatos sobre una alfombra de nailon, se carga eléctricamente; también carga un peine si lo pasa por su cabello seco.

Las varillas de plástico y un trozo de piel (verdadera o falsa) son especialmente buenos para demostrar la electrostática, es decir, la interacción entre cargas eléctricas en reposo (o casi en reposo). La figura 1 muestra dos varillas de plástico y un trozo de piel. Observamos que después de cargar las dos varillas frotándolas contra un trozo de piel, las varillas se repelen.

21.1 Experimentos de electrostática. a) Los objetos cargados negativamente se repelen entre sí. b) Los objetos cargados positivamente se repelen entre sí. c) Los objetos con carga positiva se atraen con los objetos que tienen carga negativa.

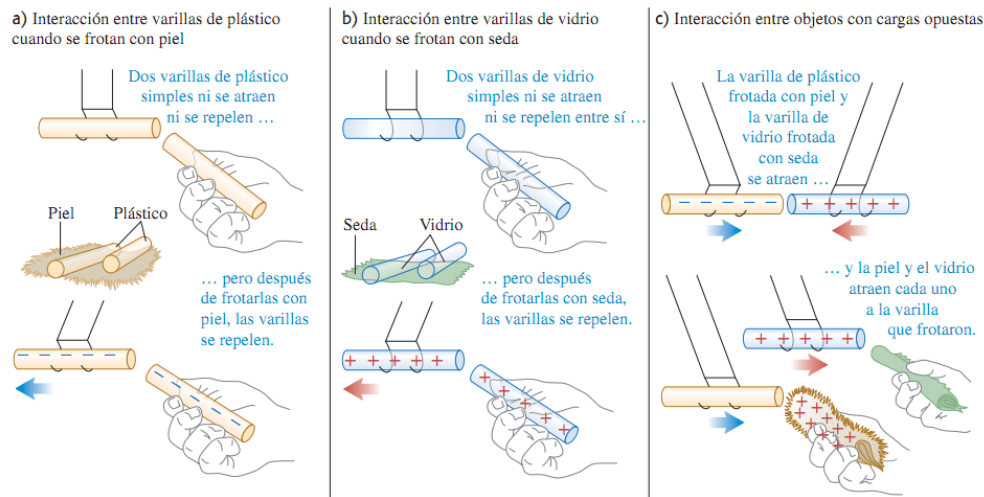


Figura 1

Cuando frotamos varillas de vidrio con seda, las varillas de vidrio también se cargan y se repelen entre sí (figura 1 b). Sin embargo, una varilla de plástico cargada atrae otra varilla de vidrio también cargada; además, la varilla de plástico y la piel se atraen, al igual que el vidrio y la seda (figura 1 c).

Estos experimentos y muchos otros parecidos han demostrado que hay exactamente dos tipos de carga eléctrica: la del plástico cuando se frota con piel y la del vidrio al frotarse con seda. Benjamín Franklin (1706-1790) sugirió llamar a esas dos clases de carga negativa y positiva, respectivamente, y tales nombres aún se utilizan. La varilla de plástico y la seda tienen carga negativa; en tanto que la varilla de vidrio y la piel tienen carga positiva.

Dos cargas positivas se repelen entre sí, al igual que dos cargas negativas. Una carga positiva y una negativa se atraen

Una aplicación tecnológica de las fuerzas entre cuerpos cargados es una impresora láser (figura 2). Al inicio del proceso de impresión, se da una carga positiva al tambor formador de imágenes que es sensible a la luz. Mientras el tambor gira, un rayo láser ilumina áreas seleccionadas del tambor, lo cual deja tales áreas con carga negativa. Partículas cargadas positivamente de la tinta se adhieren sólo en las superficies del tambor en que el láser "escribió". Cuando una hoja del papel entra en contacto con el tambor, partículas de la tinta se adhieren a la hoja y forman la imagen.

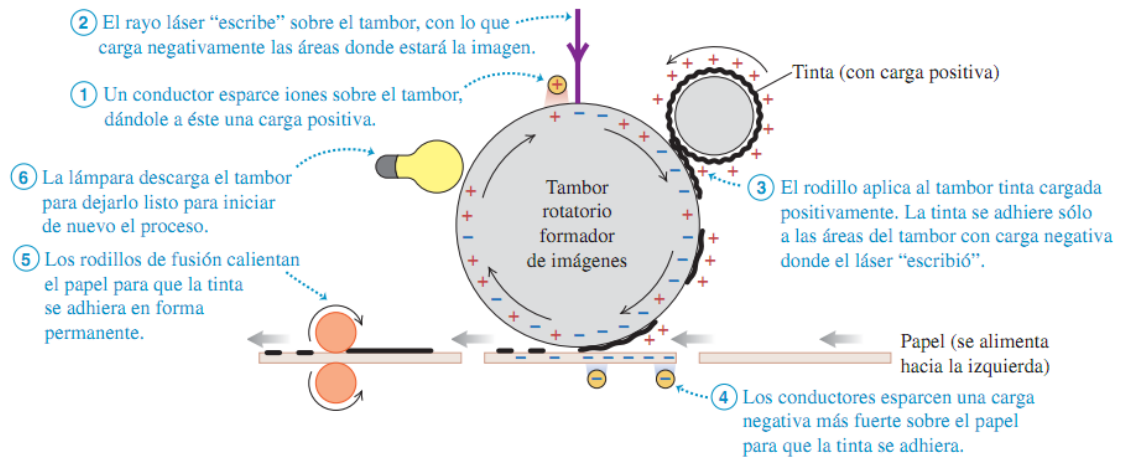


Figura 2

Carga eléctrica y la estructura de la materia

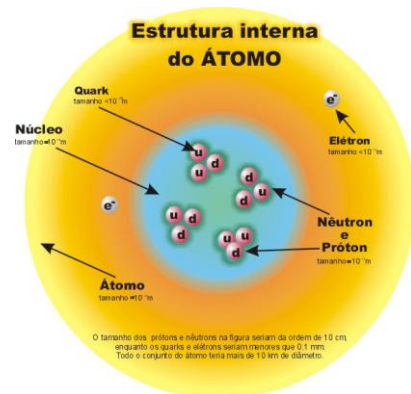
Cuando se carga una varilla frotándola con piel o con seda, no hay ningún cambio visible en la apariencia de la varilla. Entonces, ¿qué es lo que realmente sucede a la varilla cuando se carga? Para responder esta pregunta, debemos analizar más de cerca la estructura y las propiedades eléctricas de los átomos, que son los bloques que constituyen la materia ordinaria de todas clases.

La estructura de los átomos se describe en términos de tres partículas: el electrón, con carga negativa; el protón, cuya carga es positiva; y el neutrón, sin carga. El protón y el neutrón son combinaciones de otras entidades llamadas quarks.

Los protones y los neutrones en un átomo forman el núcleo, pequeño y muy denso, cuyas dimensiones son del orden de 10^{-15} m. Los electrones rodean al núcleo a distancias del orden de 10^{-10} m. Si un átomo midiera

algunos kilómetros de diámetro, su núcleo tendría el tamaño de una pelota de tenis. Los electrones cargados negativamente se mantienen dentro del átomo gracias a fuerzas eléctricas de atracción que se extienden hasta ellos, desde el núcleo con carga positiva. (Los protones y los neutrones permanecen dentro del núcleo estable de los átomos, debido al efecto de atracción de la fuerza nuclear fuerte, que vence la repulsión eléctrica entre los protones. La fuerza nuclear fuerte es de corto alcance, por lo que sus efectos no llegan más allá del núcleo.)

Las masas de las partículas individuales, con la



- + **Protón:** carga positiva
Masa = 1.673×10^{-27} kg
- **Neutrón:** sin carga
Masa = 1.675×10^{-27} kg
- **Electrón:** carga negativa
Masa = 9.109×10^{-31} kg

Las cargas del electrón y del protón tienen igual magnitud.

precisión que se conocen actualmente, son

$$\text{Masa del electrón} = m_e = 9.1093826(16) \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$\text{Masa del protón} = m_p = 1.67262171(29) \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\text{Masa del neutrón} = m_n = 1.67492728(29) \times 10^{-27} \text{ kg}$$

Los números entre paréntesis son las incertidumbres en los dos últimos dígitos. Observe que las masas del protón y del neutrón son casi iguales y aproximadamente 2000 veces la masa del electrón. Más del 99.9% de la masa de cualquier átomo se concentra en el núcleo.

La carga negativa del electrón tiene (dentro del error experimental) exactamente la misma magnitud que la carga positiva del protón. En un átomo neutro, el número de electrones es igual al número de protones en el núcleo; en tanto que la carga eléctrica neta (la suma algebraica de todas las cargas) es exactamente igual a cero. El número de protones o electrones en un átomo neutro de un elemento se denomina **número atómico** del tal elemento. Si se pierden uno o más electrones, la estructura con carga positiva que queda se llama **ion positivo**. Un átomo negativo es aquel que ha ganado uno o más electrones. Tal ganancia o pérdida de electrones recibe el nombre de **ionización**.

Cuando el número total de protones en un cuerpo macroscópico es igual al número total de electrones, la carga total es igual a cero y el cuerpo en su totalidad es eléctricamente neutro. Para dar a un cuerpo una carga excedente negativa, se puede tanto sumar cargas negativas como eliminar cargas positivas de dicho cuerpo. En forma similar, un exceso de carga positiva se crea cuando se agregan cargas positivas, o cuando se eliminan cargas negativas. En la mayoría de casos, se agregan o se eliminan electrones con carga negativa (y muy móviles); un “cuerpo cargado positivamente” es aquel que ha perdido algunos de su complemento normal de electrones.

Cuando hablamos de la carga de un cuerpo, siempre nos referimos a su carga neta, la cual siempre es una fracción muy pequeña de la carga total positiva o negativa en el cuerpo.

Dos principios importantes

La carga eléctrica se conserva

En el análisis anterior hay implícitos dos principios muy importantes. El primero es el principio de conservación de la carga:

La suma algebraica de todas las cargas eléctricas en cualquier sistema cerrado es constante.

Si se frota una varilla de plástico con un trozo de piel, ambas sin carga al inicio, la varilla adquiere una carga negativa (pues toma electrones de la piel), y la piel adquiere una carga positiva de la misma magnitud (ya que ha perdido el mismo número de electrones que ganó la varilla). De ahí que no cambie la carga eléctrica total en los dos cuerpos tomados en conjunto. En cualquier proceso de carga, ésta no se crea ni se destruye, solo se transfiere de un cuerpo a otro.

Se considera que el principio de conservación de la carga es una ley universal, pues no se ha observado ninguna evidencia experimental de que se contravenga. Aun en las interacciones de alta energía donde se crean y destruyen partículas, como en la creación de pares electrón-positrón, la carga total de cualquier sistema cerrado es constante con toda exactitud.

El segundo principio importante es:

La magnitud de la carga del electrón o del protón es la unidad natural de carga.

Toda cantidad observable de carga eléctrica siempre es un múltiplo entero de esta unidad básica. Decimos que la carga está **cuantizada**. La carga eléctrica no se divide en cantidades menores que la carga de un electrón o un protón. Entonces, la carga de cualquier cuerpo macroscópico siempre es igual a cero o a un múltiplo entero (negativo o positivo) de la carga del electrón.

La comprensión de la naturaleza eléctrica de la materia abre la perspectiva de muchos aspectos del mundo físico. Los enlaces químicos que mantienen unidos a los átomos para formar moléculas se deben a las interacciones eléctricas entre ellos. Incluyen los enlaces iónicos fuertes que unen a los átomos de sodio y cloro para formar la sal de mesa, y los enlaces relativamente débiles entre las cadenas de DNA que contienen nuestro código genético. La fuerza normal que ejerce sobre usted la silla en que se sienta proviene de fuerzas eléctricas entre las partículas cargadas, en los átomos de usted y los de la silla. La fuerza de tensión en una cuerda que se estira y la fuerza de adhesión de un pegamento se parecen en que se deben a las interacciones eléctricas de los átomos.

Conductores, aislantes y cargas inducidas

Ciertos materiales permiten que las cargas eléctricas se muevan con facilidad de una región del material a la otra, mientras que otros no lo hacen. Por ejemplo, en la figura 3 se ilustra un alambre de cobre sostenido por una cuerda de nailon. Suponga que usted toca un extremo del alambre con una varilla de plástico cargado, y su otro extremo lo une con una esfera metálica que, al principio, está sin carga; después, quita la varilla cargada y el alambre. Cuando acerca otro cuerpo cargado a la esfera (figuras 3b y 3c), ésta se ve atraída o repelida, lo cual demuestra que se cargó eléctricamente. Se transfirió carga eléctrica entre la esfera y la superficie de la varilla de plástico, a través del alambre de cobre.

El alambre de cobre recibe el nombre de **conductor de electricidad**.

Si se repite el experimento con una banda de caucho o un cordón de nailon en vez del alambre, se verá que no se transfiere carga a la esfera. Esos materiales se denominan **aislantes**.

Los conductores permiten el movimiento fácil de las cargas a través de ellos; mientras que los aislantes no lo hacen.

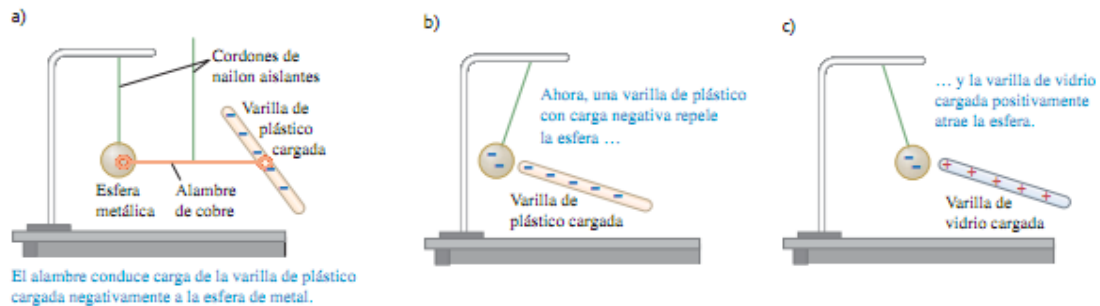


Figura 3

Por ejemplo, las fibras de una alfombra en un día seco son buenos aislantes. Cuando usted camina sobre ella, la fricción de los zapatos contra las fibras hace que la carga se acumule en su cuerpo y ahí permanezca, porque no puede fluir por las fibras aislantes. Si después usted toca un objeto conductor, como una perilla, ocurre una transferencia rápida de la carga entre sus dedos y la perilla, por lo que siente una descarga. Una forma de evitarlo consiste en enrollar algunas de las fibras de la alfombra alrededor de los centros conductores, de modo que cualquier carga que se acumule sobre una persona se transfiera a la alfombra de manera inofensiva. Otra solución es cubrir la alfombra con una sustancia antiestática que no transfiera fácilmente electrones hacia los zapatos o desde éstos; así se evita que se acumulen cargas en el cuerpo.

La mayor parte de metales son buenos conductores; en tanto que los no metales son aislantes en su mayoría. Dentro de un sólido metálico, como el cobre, uno o más de los electrones externos de cada átomo se liberan y mueven con libertad a través del material, en forma parecida a como las moléculas de un gas se desplazan por los espacios entre los granos de un recipiente de arena. El movimiento de esos electrones con carga negativa lleva la carga a través del metal. Los demás electrones permanecen unidos a los núcleos con carga positiva, que a la vez están unidos en posiciones casi fijas en el material. En un material aislante no hay electrones libres, o hay muy pocos, y la carga eléctrica no se mueve con facilidad a través del material. Algunos materiales se denominan semiconductores porque tienen propiedades intermedias entre las de buenos conductores y buenos aislantes.

Carga por inducción

Una esfera de metal se puede cargar usando un alambre de cobre y una varilla de plástico eléctricamente cargada, como se indica en la figura 3a. En este proceso, algunos de los electrones excedentes en la varilla se transfieren hacia la esfera, lo cual

deja a la varilla con una carga negativa más pequeña. Hay otra técnica diferente con la que la varilla de plástico da a otro cuerpo una carga de signo contrario, sin que pierda una parte de su propia carga. Este proceso se llama **carga por inducción**.

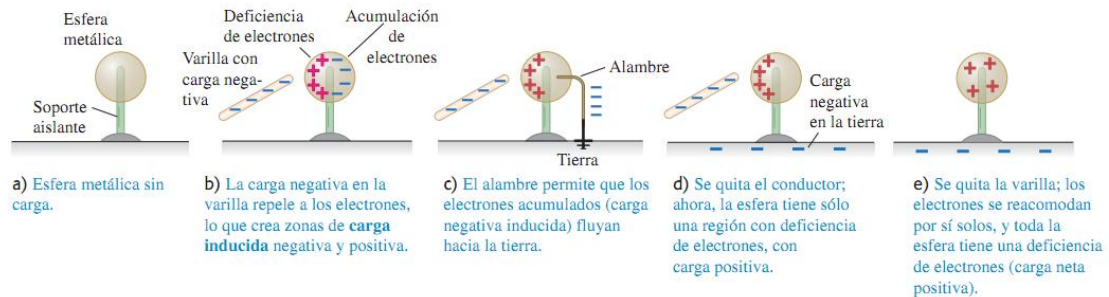


Figura 4

En la figura 4 se muestra un ejemplo de carga por inducción. Una esfera metálica sin carga se sostiene usando un soporte aislante (figura 4a). Cuando se le acerca una varilla con carga negativa, sin que llegue a tocarla (figura 4b), los electrones libres en la esfera metálica son repelidos por los electrones excedentes en la varilla, y se desplazan hacia la derecha, lejos de la varilla. No pueden escapar de la esfera porque tanto el soporte como el aire circundante son aislantes. Por lo tanto, existe un exceso de carga negativa en la superficie derecha de la esfera y una deficiencia de carga negativa (es decir, hay una carga positiva neta) en su superficie izquierda.

Estas cargas excedentes se llaman **cargas inducidas**.

No todos los electrones libres se mueven a la superficie derecha de la esfera. Tan pronto como se desarrolla cualquier carga inducida, ejerce fuerzas hacia la izquierda sobre los demás electrones libres. Estos electrones son repelidos por la carga negativa inducida a la derecha y atraídos hacia la carga positiva inducida a la izquierda. El sistema alcanza el equilibrio donde la fuerza hacia la derecha sobre un electrón, debida a la varilla cargada, queda equilibrada por la fuerza hacia la izquierda debida a la carga inducida. Si se retira la varilla cargada, los electrones libres regresan a la izquierda y se restablece la condición de neutralidad original.

¿Qué pasaría si, mientras la varilla de plástico se encuentra cerca, el extremo de un alambre conductor se pusiera en contacto con la superficie derecha de la esfera, y el otro extremo de éste se conectara a tierra (figura 4c)? La Tierra es un conductor, y es tan grande que actúa como una fuente prácticamente infinita de electrones adicionales o como un receptor de los electrones no deseados. Algunas de las cargas negativas fluyen a tierra a través del alambre. Ahora suponga que desconecta el alambre (figura 4d) y luego se quita la varilla (figura 4e); en la esfera queda una carga positiva neta. Durante este proceso, no cambió la carga negativa de la varilla. La tierra adquiere una carga negativa de magnitud igual a la carga positiva inducida que queda en la esfera.

La carga por inducción funcionaría igual de bien si las cargas móviles en la esfera fueran positivas, en vez de electrones cargados negativamente, o incluso si estuvieran presentes cargas tanto positivas como negativas. En un conductor metálico, las cargas móviles siempre son electrones negativos; sin embargo, con frecuencia conviene describir un proceso como si las cargas en movimiento fueran positivas. En las soluciones iónicas y los gases ionizados, las cargas que se mueven son tanto positivas como negativas.

Fuerzas eléctricas en objetos sin carga

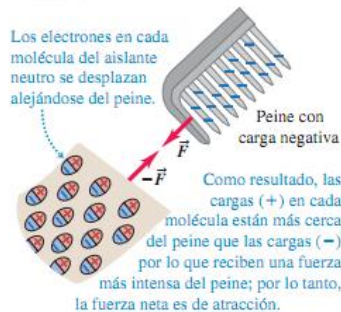
Por último, se observa que un cuerpo con carga ejerce fuerzas aun sobre objetos que no están cargados. Si usted frota un globo contra la alfombra y después lo coloca junto al techo, el globo se adherirá a éste, aun cuando el techo no tiene carga eléctrica neta. Después de que electrifica un peine pasándolo por su cabello, puede atraer con tal peine trocitos de papel o de plástico que no estén cargados (figura 5a). ¿Cómo es posible esto?

21.8 Las cargas dentro de las moléculas de un material aislante se intercambian un poco. Como resultado, un peine con carga de cualquier signo atrae a un material aislante neutro. Según la tercera ley de Newton, el aislante neutro ejerce una fuerza de atracción de igual magnitud sobre el peine.

a) Un peine cargado levanta trocitos de plástico sin carga



b) Cómo un peine con carga negativa atrae un aislante



c) Cómo un peine con carga positiva atrae un aislante

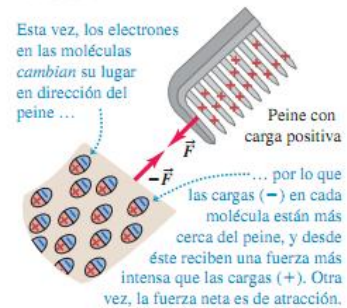


Figura 5

Esta interacción es un efecto de carga inducida. Incluso en un aislante, las cargas eléctricas pueden desplazarse un poco en un sentido u otro cuando hay otra carga cerca. En la figura 5b; el peine de plástico cargado negativamente ocasiona un cambio ligero de carga dentro de las moléculas del aislante neutro: el efecto llamado **polarización**. Las cargas positivas y negativas en el material se hallan presentes en cantidades iguales; no obstante, las cargas positivas están más cerca del peine de plástico, por lo que reciben una fuerza de atracción mayor que la fuerza de repulsión que se ejerce sobre las cargas negativas, dando así una fuerza de atracción neta. Observe que un aislante neutro también es atraído por un peine cargado positivamente (figura 5c). Ahora las cargas en el aislante se mueven en la dirección opuesta; las cargas negativas en el aislante están más cerca del peine y reciben una fuerza de atracción mayor que la fuerza de repulsión ejercida sobre las cargas positivas del aislante. Por lo tanto, un objeto con carga de cualquier signo ejerce una fuerza de atracción sobre un aislante sin carga.

La atracción entre un objeto cargado y uno descargado tiene muchas aplicaciones prácticas importantes como, por ejemplo, el proceso de pintura electrostática que se utiliza en la industria automotriz (figura 6). El objeto metálico que va a pintarse se conecta a tierra (al “suelo”, en la figura 6), y a las gotitas de pintura se les da una carga eléctrica conforme salen de la boquilla rociadora. Al acercarse las gotitas de pintura al objeto que se pinta, aparecen en éste cargas inducidas del signo opuesto, que atraen las gotitas a la superficie. Este proceso minimiza la formación de nubes de partículas dispersas de pintura y da un acabado particularmente liso.

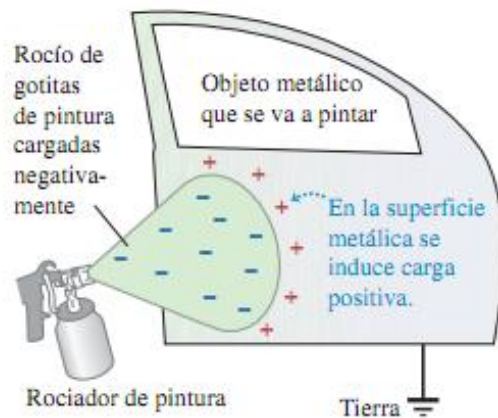


Figura 6

Ley de Coulomb

En 1784 Charles Augustin de Coulomb (1736-1806) estudió con mucho detalle las fuerzas de atracción de partículas cargadas. Usó una balanza de torsión similar a la que Cavendish emplearía 13 años después para estudiar la mucho más débil interacción gravitacional. Para cargas puntuales, cuerpos cargados muy pequeños en comparación con la distancia r que los separa, Coulomb descubrió que la fuerza eléctrica es proporcional a $1/r^2$. Es decir, cuando se duplica la distancia r , la fuerza disminuye a $1/4$ de su valor inicial; cuando la distancia disminuye a la mitad, la fuerza incrementa cuatro veces su valor inicial.

La fuerza eléctrica entre dos cargas puntuales también depende de la cantidad de carga en cada cuerpo, la que se denotará con q o Q . Para estudiar esta dependencia, Coulomb dividió una carga en dos partes iguales poniendo en contacto un conductor esférico con carga pequeño, con una esfera idéntica pero sin carga; por simetría, la carga se compartía por igual entre las dos esferas. De esa manera, él podía obtener un medio, un cuarto, etcétera, de cualquier carga inicial. Descubrió que las fuerzas que dos cargas puntuales q_1 y q_2 ejercían una sobre la otra eran proporcionales a cada carga, por lo que también eran proporcionales a su producto q_1q_2 .

De ese modo, Coulomb estableció la que ahora se conoce como ley de Coulomb:

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

En términos matemáticos, la magnitud F de la fuerza que cada una de las dos cargas puntuales, q_1 y q_2 , separadas una distancia r , ejerce sobre la otra se expresa como

$$F = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$

(1)

donde k es una constante de proporcionalidad cuyo valor numérico depende del sistema de unidades que se emplee. En la ecuación precedente se utiliza la notación de valor absoluto porque las cargas q_1 y q_2 pueden ser positivas o negativas; en tanto que la magnitud de la fuerza F siempre es positiva.

Las direcciones de las fuerzas que las dos cargas ejercen sobre la otra siempre son a lo largo de la recta que las une. Cuando las cargas q_1 y q_2 tienen el mismo signo, positivo o negativo, las fuerzas son de repulsión; cuando las cargas tienen signos opuestos, las fuerzas son de atracción (figura 7 a y b, respectivamente).

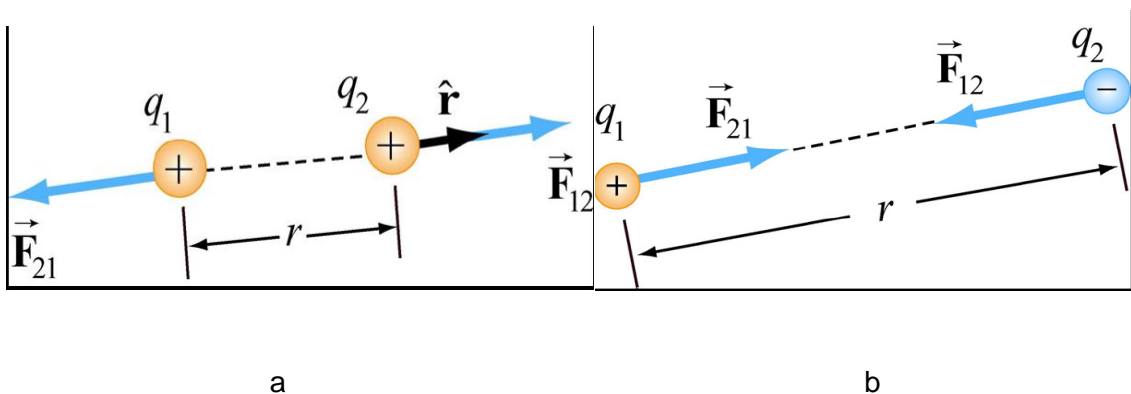


Figura 7

Las dos fuerzas obedecen la **tercera ley de Newton**; siempre tienen la misma magnitud y dirección opuesta, aun cuando las cargas no tengan igual magnitud.

La proporcionalidad de la fuerza eléctrica con respecto a $1/r^2$ es algo que se ha comprobado con gran precisión. No hay razón para sospechar que el exponente sea distinto de 2. Así que la forma de la ecuación (1) es la misma que la forma de la ley de la gravitación. No obstante, las interacciones eléctricas y gravitacionales son dos clases distintas de fenómenos. Las interacciones eléctricas dependen de las cargas eléctricas y pueden ser de atracción o de repulsión; mientras que las gravitacionales dependen de la masa y siempre son de atracción (porque no existe algo como la masa negativa).

Constantes eléctricas fundamentales

El valor de la constante de proporcionalidad k en la ley de Coulomb depende del sistema de unidades que se emplee. En nuestro estudio de la electricidad y el magnetismo, tan sólo usaremos unidades del SI, las cuales incluyen la mayoría de las unidades con que estamos familiarizados, como el volt, ampere, ohm y watt. (No existe un sistema inglés de unidades eléctricas.) La unidad del SI para la carga eléctrica se llama coulomb (1 C). En unidades del SI, la constante k que aparece en la ecuación (1) es

$$k = 8.987551787 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2 \cong 8.988 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$$

En unidades del SI, la constante k de la ecuación (1) se escribe por lo general como $1/4\pi\epsilon_0$, donde ϵ_0 (“épsilon cero”) es otra constante. Esto parece complicado, pero en realidad simplifica muchas de las fórmulas que encontraremos al desarrollar los siguientes temas.

De aquí en adelante, en general escribiremos la ley de Coulomb como

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1q_2|}{r^2}$$

Las constantes de la ecuación son aproximadamente

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2 \quad \text{y} \quad \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = k = 8.988 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$$

En la resolución de problemas será frecuente que se utilice el valor aproximado

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$$

La unidad más fundamental de carga es la magnitud de la carga de un electrón o un protón, que se denota con **e**. El valor más preciso actualmente es

$$e = 1.60217653(14) \times 10^{-19} \text{ C}$$

Un coulomb representa el negativo de la carga total de aproximadamente 6×10^{18} electrones. En comparación, un cubo de cobre de 1 cm por lado contiene cerca de 2.4×10^{24} electrones. Por el filamento incandescente de una bombilla de linterna pasan cada segundo alrededor de 10^{19} electrones.

En problemas de electrostática es muy raro encontrar cargas tan grandes como de 1 coulomb. ¡Dos cargas de 1 C separadas 1 m ejercerían fuerzas entre sí de 9×10^9 N (cerca de 1 millón de toneladas)!

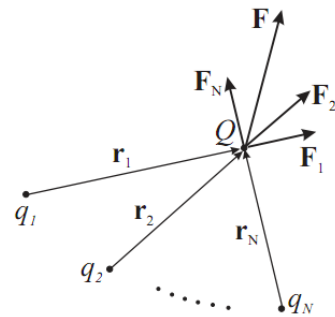
La carga total de todos los electrones en una moneda de cobre de un centavo es aún mayor, de 1.4×10^5 C, lo cual demuestra que no podemos alterar mucho la neutralidad eléctrica sin usar fuerzas demasiado grandes. Los valores más comunes de cargas fluctúan desde 10^{-9} hasta 10^{-6} C. Es frecuente usar al microcoulomb ($1 \mu\text{C} = 10^{-6}$ C) y al nanocoulomb ($1 \text{nC} = 10^{-9}$ C) como unidades de carga prácticas.

Superposición de fuerzas

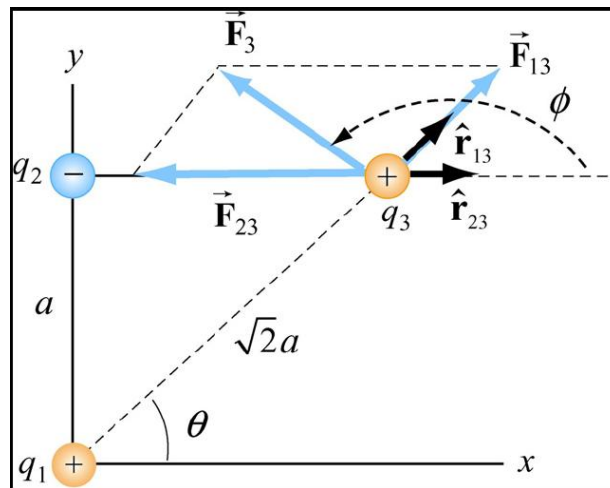
Según la enunciamos, la ley de Coulomb describe sólo la interacción entre dos cargas puntuales. Los experimentos demuestran que cuando dos cargas ejercen fuerzas de manera simultánea sobre una tercera carga, la fuerza total que actúa sobre esa carga es la suma vectorial de las fuerzas que las dos cargas ejercerían individualmente. Esta propiedad importante, llamada **principio de superposición de fuerzas**, se cumple para cualquier número de cargas.

Esto significa que para calcular el efecto de un conjunto de cargas q_i sobre cierta carga Q , se puede proceder calculando el efecto de cada una de las cargas q_i sobre la carga Q y obtener el efecto total como la suma de los efectos parciales (esto es, $F = F_1 + F_2 + \dots$).

De este modo, la fuerza que produce el conjunto de cargas q_i sobre la carga prueba Q situada en el punto P puede calcularse como



$$\begin{aligned} \mathbf{F}(P) &= \sum_{i=1}^N \mathbf{F}_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^N \frac{q_i Q}{r_i^2} \hat{\mathbf{r}}_i \\ &= \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{r_i^2} \hat{\mathbf{r}}_i . \end{aligned}$$



En sentido estricto, la ley de Coulomb tal como fue establecida debería usarse tan sólo para cargas puntuales en el vacío. Si hay materia presente entre las cargas, la fuerza neta que actúa sobre cada una se altera, debido a las cargas inducidas en las moléculas del material interpuesto. Este efecto se describirá más adelante. No obstante, es práctico utilizar la ley de Coulomb sin modificar para cargas puntuales en el aire, ya que a presión atmosférica normal, la presencia del aire cambia la fuerza eléctrica en aproximadamente una parte en 2000 de su valor en el vacío

Densidad de carga

Aunque el carácter discreto de la materia (naturaleza atómica) es bien conocido, en multitud de situaciones prácticas, este carácter discreto puede “obviarse” y considerar que la materia puede describirse como un continuo. Desde un punto de vista matemático, esto implica que la materia se describirá como una superposición de elementos diferenciales infinitesimales, por ejemplo para calcular su masa: $m = \int dm$ (en vez de describir la materia como un agregado de partículas individuales, donde: $m = \sum m_i$). Esta consideración del continuo para la masa de la materia también es extensible a su carga, de modo que en múltiples situaciones la carga se considerará como una distribución continua. En este caso, la carga total q de una distribución de carga se obtendrá como

$$q = \int dq$$

Para resolver algunos casos prácticos, se introduce el concepto de **densidad de carga**, que relaciona la cantidad de carga existente en cada elemento diferencial con el volumen, superficie o longitud de dicho elemento. En función del carácter geométrico del elemento diferencial de carga pueden distinguirse tres tipos distintos de distribuciones de carga

Para una distribución lineal de carga se define la **densidad lineal de carga** λ , de tal forma que:

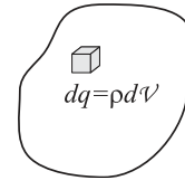
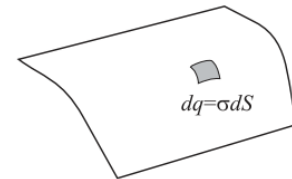
$$dq = \lambda dl$$

En el caso de una distribución superficial de carga, tenemos la **densidad superficial de carga** σ , y :

$$dq = \sigma dS$$

Para una distribución volumétrica de carga, la **densidad volumétrica de carga es** ρ , y:

$$dq = \rho dV$$



Referencia: Sear Zemansky. Física Universitaria Volumen 2. Addison-Wesley Ed.

Recomendado:

Ejercitar con los programas de simulación para Fuerzas de Coulomb y Pendulo de Coulomb, del EJS Coulomb Force simulation que puede bajarse desde **comPADRE National Digital Library**: < <http://www.compadre.org/OSP/items/detail.cfm?ID=9683>>

Autor: Anne J Cox. Editado por: Mario Belloni and Wolfgang Christian

Guías en castellano se encuentran en la página de la asignatura.

Dra. María Luján Castro

Marzo 2016