

La fuerza eléctrica

Los rayos son una de las manifestaciones más bellas de la naturaleza. Con temperaturas cercanas a aquellas de la superficie del Sol y ondas de choque que provocan daños, también representan un peligro significativo para los seres humanos y las estructuras físicas. Son resultado de una concentración sustancial de carga en las nubes, la cual finalmente se descarga en el suelo junto con una ruta de ionización creada por una columna de electrones que se extiende desde las nubes hacia el suelo.

Objetivos

Cuando termine de estudiar este capítulo el alumno:

1. Aprenderá la existencia de dos clases de carga eléctrica.
2. Explicará el proceso de carga por contacto y por inducción.
3. Establecerá la ley de Coulomb y la aplicará en la resolución de problemas en los que intervengan fuerzas eléctricas.
4. Definirá el electrón, el coulomb y el microcoulomb como unidades de carga eléctrica.

Un peine o una barra de plástico adquieren la curiosa capacidad de atraer otros objetos después de frotarlos con una prenda de lana; en algunas ocasiones se siente una sacudida molesta cuando se toca la manija de la puerta de un automóvil después de que se desliza uno en el asiento; en un montón de hojas de papel, éstas ofrecen resistencia cuando se intenta separarlas. Todos estos fenómenos son ejemplos de electrificación y ocurren con frecuencia como resultado del frotamiento de objetos entre sí. Hace ya mucho tiempo que a ese proceso de frotamiento se le conoce como cargar, y se decía que el objeto electrificado se había cargado. En este capítulo comenzaremos a estudiar la electrostática, ciencia que se ocupa de las cargas eléctricas en reposo.

La carga eléctrica

La mejor forma de empezar el estudio de la electrostática es experimentar con objetos que se electrifican por medio del frotamiento. Todos los materiales ilustrados en la figura 23.1 se encuentran comúnmente en un laboratorio de física; según el orden en que aparecen en la figura se trata de: una barra de ebonita (plástico duro) sobre un pedazo de piel de gato, una barra de vidrio sobre un pedazo de seda, un electroscopio de esferas de médula de saúco, esferas de médula de saúco suspendidas y un electroscopio de hoja de oro.

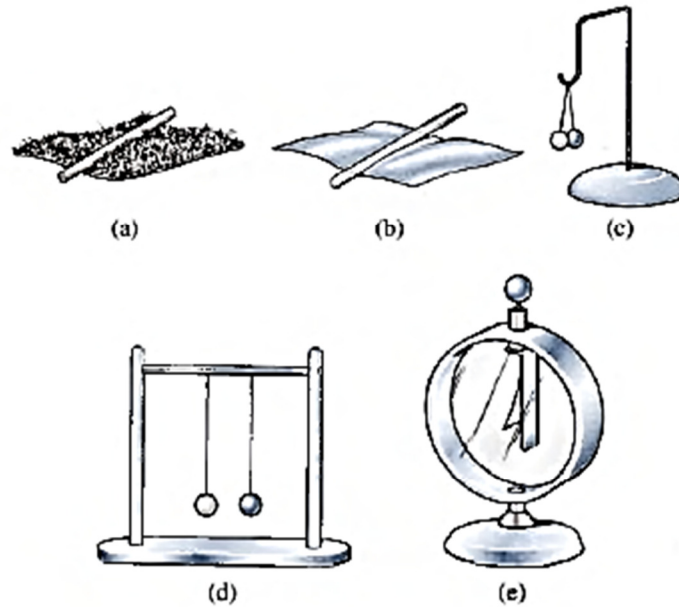


Figura 23.1 Materiales de laboratorio para estudiar la electrostática: (a) una barra de ebonita descansa sobre un trozo de piel de gato, (b) una barra de vidrio descansa sobre un pedazo de seda, (c) el electroscopio de esferas de médula de saúco, (d) dos esferas de médula de saúco suspendidas y (e) el electroscopio de hoja de oro.

Una esfera de médula de saúco es una esfera ligera hecha con la madera de ese árbol y recubierta con pintura metálica, que casi siempre se utiliza suspendida de un hilo de seda. El electroscopio es un instrumento de laboratorio que se utiliza para detectar la presencia de carga eléctrica.

El electroscopio de esferas de médula de saúco se puede utilizar para estudiar los efectos de la electrificación. Considere dos esferas de médula de saúco con pintura metálica suspendidas de un punto común mediante hilos de seda. Empezamos por frotar vigorosamente la barra de ebonita con el pedazo de piel de gato (o con un paño de lana). Si posteriormente la barra de ebonita se acerca al electroscopio, ésta atraerá a las esferas de médula de saúco suspendidas, como se muestra en la figura 23.2a. Después de permanecer por un instante en contacto con la barra, las esferas serán repelidas por dicha barra y también entre sí. Cuando se retira la barra, las esferas permanecen separadas, tal como se aprecia en la figura. La repulsión se debe a alguna propiedad adquirida por las esferas como resultado de su contacto con la barra cargada. Se supone, en forma razonable, que parte de la carga se ha transferido de la barra a las esferas y que los tres objetos se encuentran cargados de igual forma. A partir de estas observaciones, podemos enunciar la siguiente conclusión:

Existe una fuerza de repulsión entre dos sustancias que están electrificadas de la misma

manera.

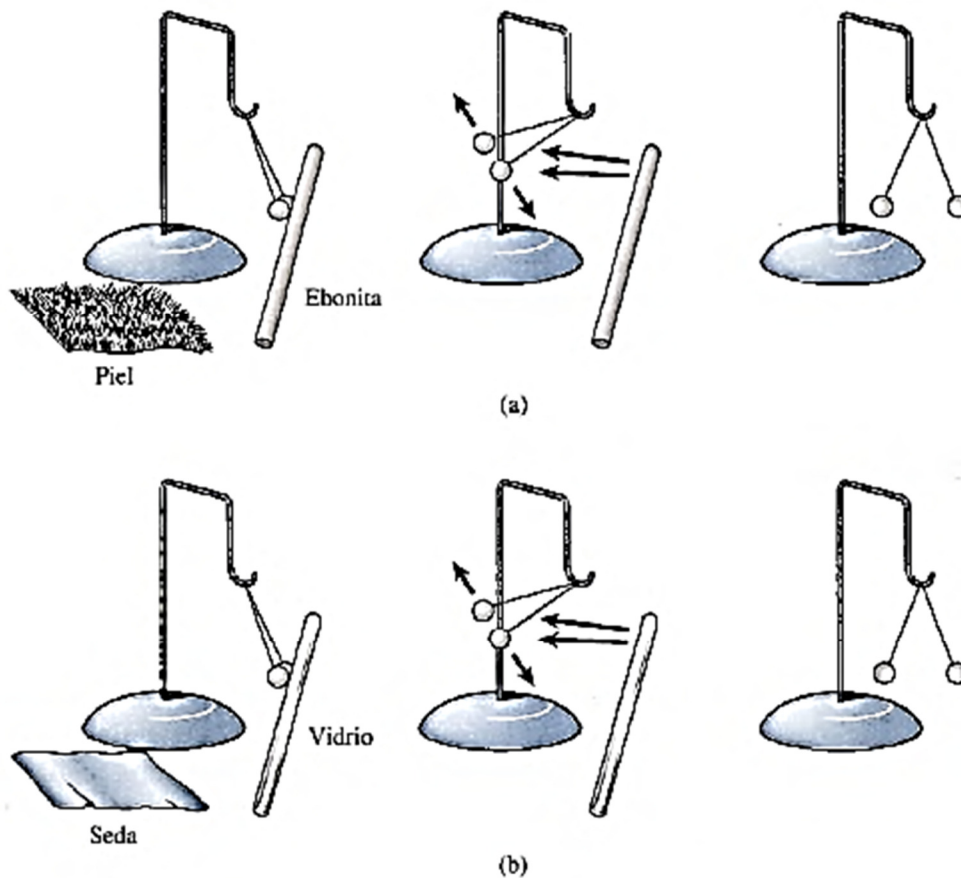


Figura 23.2 (a) Cómo proporcionar carga a un electroscopio de esferas de médula de saúco con una barra de ebonita. (b) Cómo proporcionar carga a las esferas de médula de saúco con una barra de vidrio.

Continuando con la experimentación, se toma la barra de vidrio y se frota vigorosamente con un pedazo de seda. Cuando la barra cargada se acerca a las esferas de saúco, se presenta la misma secuencia de hechos que los que se observaron con la barra de ebonita (véase la figura 23.2b). ¿Significa esto que la naturaleza de la carga es la misma en ambas barras? Nuestro experimento ni aprueba ni desaprueba esta suposición. En cada caso, la barra y las esferas se electrificaron de la misma manera, y también en cada caso hubo una repulsión.

Para investigar si los dos procesos son idénticos, carguemos una de las esferas mediante la barra de vidrio y la otra con la de ebonita. Como se aprecia en la figura 23.3, existe una fuerza de atracción entre las esferas cargadas en esta forma. Se puede concluir que las cargas producidas en las barras de vidrio y de ebonita son opuestas.

Experimentos similares con un gran número de materiales diferentes demuestran que la totalidad de los objetos electrificados se pueden dividir en dos grupos: (1) los que tienen una

carga como la que se produjo en el vidrio y (2) los que tienen una carga como la que se produjo en la ebonita. De acuerdo con una convención establecida por Benjamín Franklin se dice que los objetos del primer grupo tienen una carga positiva (+) y que los pertenecientes

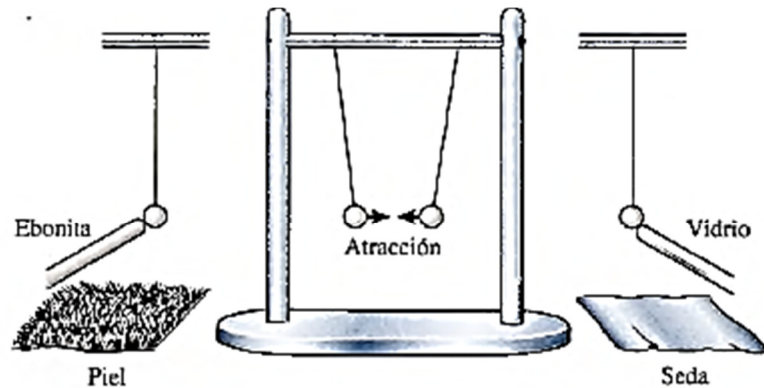


Figura 23.3 Existe una fuerza de atracción entre dos sustancias que tienen carga opuesta.

al segundo grupo, una carga negativa (—). En realidad, estos términos no tienen un significado matemático, sencillamente se refieren a los dos tipos contrarios de carga eléctrica. Ahora ya estamos en condiciones de enunciar la primera ley de la electrostática, la cual está basada en nuestra experimentación anterior:

Las cargas del mismo signo se repelen y las cargas de signo contrario se atraen.

Dos objetos cargados negativamente o dos objetos cargados positivamente se repelen entre sí, como se observa en la figura 23.2a y b, respectivamente. La figura 23.3 demuestra que un objeto cargado positivamente atrae a un objeto cargado negativamente.

El electrón

¿Qué ocurre en realidad durante el proceso de frotamiento con el cual se produce el fenómeno de electrificación? Benjamín Franklin pensaba que todos los cuerpos contenían una determinada cantidad de fluido eléctrico que servía para mantenerlos en un estado sin carga (neutro).

Él postuló que cuando dos sustancias diferentes se frotaban entre sí, una de ellas acumulaba un exceso de fluido y quedaba cargada positivamente, mientras que la otra perdía fluido y quedaba cargada negativamente. Ahora se sabe que la sustancia transferida no es un fluido, sino pequeñas cantidades de electricidad negativa llamadas electrones.

La teoría atómica moderna sobre la materia sostiene que todas las sustancias están formadas por átomos y moléculas. Cada átomo tiene una parte central cargada positivamente a la que se le llama núcleo, que está rodeado de una nube de electrones cargados negativamente.

El núcleo consta de cierto número de protones, cada uno de ellos con una sola unidad de carga

positiva y (excepto para el hidrógeno) uno o más neutrones. Como su nombre lo sugiere, un neutrón es una partícula eléctricamente neutra. Normalmente, un átomo de materia se encuentra en un estado neutro o sin carga debido a que contiene el mismo número de protones en su núcleo que de electrones alrededor de éste. Un diagrama esquemático del átomo de neón se muestra en la figura 23.4. Si, por alguna razón, un átomo neutro pierde uno o más de sus electrones exteriores, el átomo tiene una carga neta positiva y se le conoce como un ion positivo. Un ion negativo es un átomo que ha ganado una o más cargas adicionales.

Cuando dos materiales particulares se ponen en contacto estrecho, algunos de los electrones más débilmente retenidos se pueden transferir de un material al otro. Por ejemplo, cuando una barra de ebonita se frota contra un pedazo de piel, los electrones se transfieren de la piel a la barra, dejando un exceso de electrones sobre la barra y una deficiencia de electrones en la piel. En forma similar, cuando una barra de vidrio se frota con un pedazo de seda, los electrones se transfieren del vidrio a la seda. Ahora podemos plantear este enunciado:

“Un objeto que tiene un exceso de electrones está cargado negativamente, y un objeto que tiene una deficiencia de electrones está cargado positivamente.”

En la figura 23.5 se ilustra una demostración de laboratorio acerca de la transferencia de carga. Una barra de ebonita se frota fuertemente sobre un pedazo de piel; una esfera de médula de saúco se carga negativamente con la barra y la otra se pone en contacto con la piel. La atracción resultante demuestra que la piel tiene carga opuesta. El proceso de frotamiento ha provocado una deficiencia de electrones en la piel.

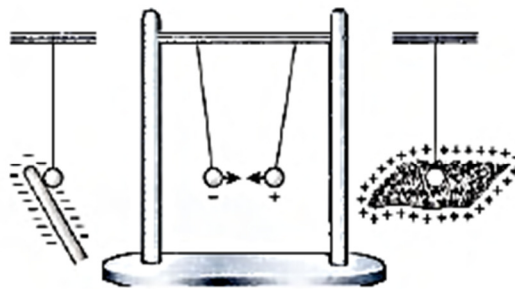


Figura 23.5 Al frotar una barra de ebonita con un pedazo de piel se transfieren electrones de la piel a la barra.

Aislantes y conductores

Un trozo de materia está compuesto de muchos átomos dispuestos de una manera peculiar de acuerdo con el material. Algunos materiales, principalmente los metales, tienen un gran número

de electrones libres, que pueden moverse a través del material. Estos materiales tienen la habilidad de transferir carga de un objeto a otro, y se les llama conductores.

“Un conductor es un material a través del cual se transfiere fácilmente la carga.”

La mayoría de los metales son buenos conductores. En la figura 23.6 una varilla de cobre está sostenida por una base de vidrio. Las esferas de médula de saúco se pueden cargar al tocar el extremo derecho de la varilla de cobre que a su vez toca una barra de caucho cargada. Los electrones se transfieren o son conducidos a través de la varilla hasta las esferas de saúco. Tome nota de que la carga no se transfiere ni a la base de vidrio ni al pedazo de seda. Estos materiales son malos conductores y se les conoce como aislantes.

“Un aislante es un material que se resiste al flujo de carga.”

Otros ejemplos de buenos aislantes son la ebonita, el plástico, la mica, la baquelita, el azufre y el aire.

“Un semiconductor es un material con capacidad intermedia para transportar carga.”

Algunos ejemplos de materiales semiconductores son el silicio, el germanio y el arseniuro de galio. La facilidad con la que un semiconductor transporta carga puede variar mucho a causa de la adición de impurezas o por un cambio de temperatura.

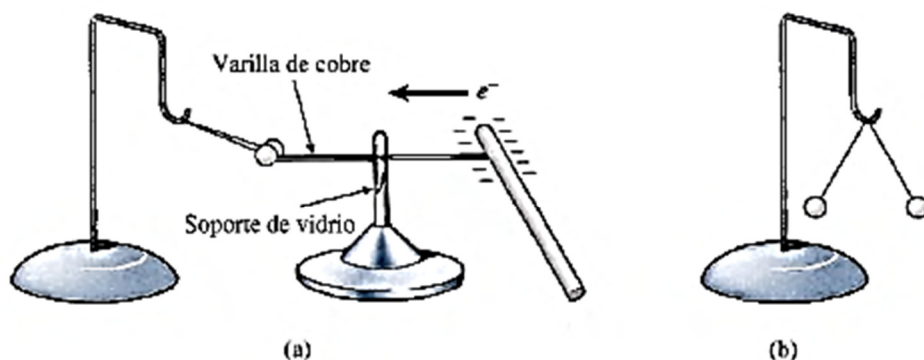


Figura 23.6 Los electrones son conducidos por la varilla de cobre para cargar las esferas de médula de saúco.

El electroscopio de hojas de oro

El electroscopio de hoja de oro que muestra la figura 23.7

consiste en una lámina u hoja de oro muy delgada, unida a una barra conductora. La barra y la hoja se protegen de corrientes de aire por medio de una cubierta cilíndrica con ventanas de vidrio. La barra está unida a la parte superior por medio de una perilla esférica y se aisló de la cubierta mediante una barra cilíndrica de ebonita o ámbar. Cuando se suministra cierta carga a la perilla, la repulsión de las cargas iguales de la barra y la hoja de oro provocan que la hoja se aparte de la barra.



Figura 23.7 Electroscopio de hoja de oro.

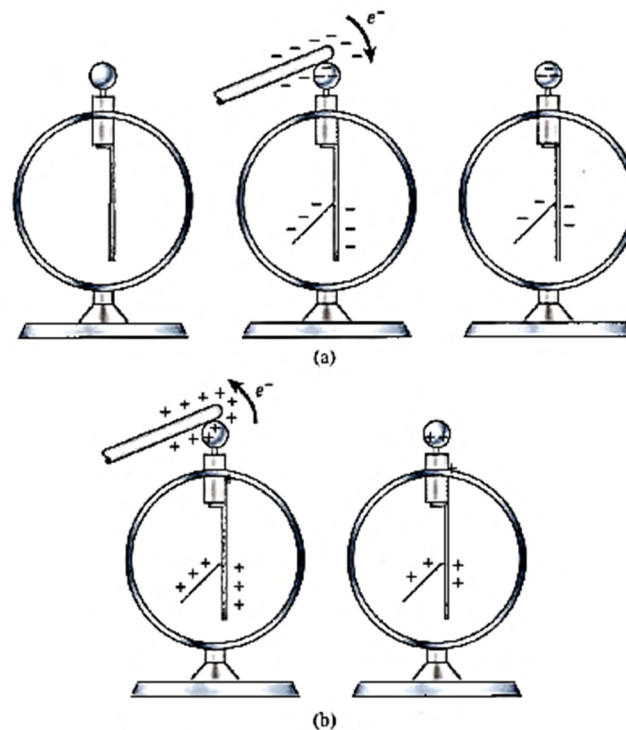


Figura 23.8 Carga del electroscopio por contacto con (a) una barra cargada negativamente y (b) una barra cargada positivamente.

La figura 23.8 ilustra la forma de cargar un electroscopio por contacto. Cuando la perilla se toca con la barra cargada negativamente, los electrones fluyen desde la barra hasta la hoja, dejando un exceso de electrones en el electroscopio. Cuando la perilla se toca con una barra cargada positivamente, los electrones se transfieren de la perilla a la barra, lo cual deja al electroscopio con una deficiencia de electrones. Observe que en el electroscopio y en la barra de carga la carga residual tiene el mismo signo.

Academia de Física.

Ing. Rafael A. Sánchez Rodríguez.

Una vez que el electroscopio está cargado, ya sea positiva o negativamente, se puede usar para detectar la presencia y la naturaleza de otros objetos cargados (véase la figura 23.9).

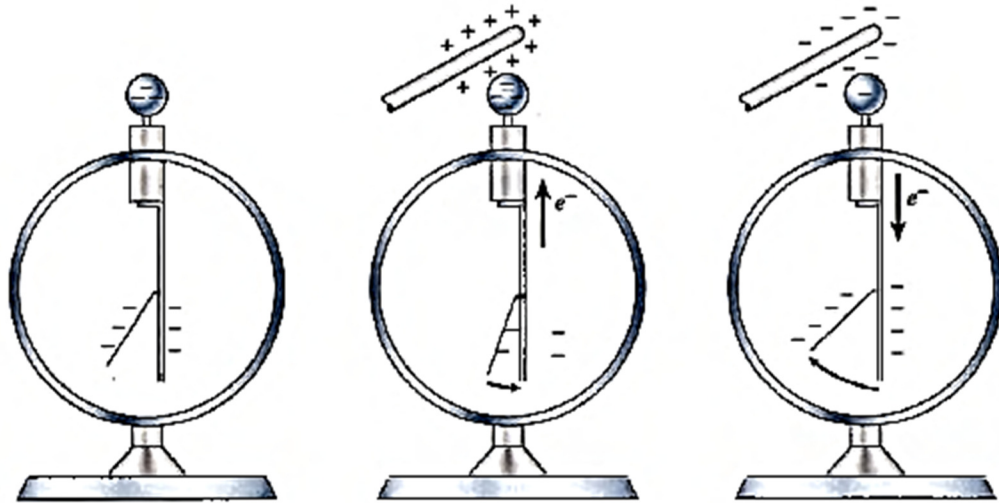


Figura 23.9 Un electroscopio cargado negativamente se puede usar para detectar la presencia de otra carga.

Por ejemplo, considere lo que le sucede a la hoja de un electroscopio cargado negativamente cuando una barra con carga positiva se acerca a la perilla. Algunos electrones se desalojan de la hoja y se desplazan hacia la perilla. Como resultado, la hoja converge. Al acercar más la barra se produce una convergencia proporcional de la hoja mientras mayor número de electrones se atraen hacia la perilla. Esto parece indicar que existe una proporcionalidad directa entre el número de cargas acumuladas en la hoja y en la barra, respecto a la fuerza de repulsión que surge entre ellas. Más aún, debe existir una relación inversa entre la separación de la barra cargada y la perilla respecto a la fuerza de atracción de los electrones de la hoja y la barra del electroscopio; esta fuerza se vuelve más fuerte cuando la separación disminuye. Las observaciones anteriores nos ayudarán a comprender la ley de Coulomb, que se desarrollará en una sección posterior.

Un razonamiento similar nos mostrará que la hoja de un electroscopio cargado negativamente será repelida más lejos de la barra cuando la perilla esté colocada cerca de un objeto cargado negativamente. Por lo tanto, un electroscopio cargado puede usarse para indicar tanto la polaridad como la presencia de cargas en el espacio circundante.

Redistribución de carga

Cuando una barra cargada negativamente se acerca a una esfera de médula de saúco sin cargar existe una atracción inicial, como muestra la figura 23.10. La atracción del objeto sin cargar se debe a la separación de la electricidad positiva y negativa dentro del cuerpo neutro. La proximidad de la barra cargada negativamente repele a los electrones retenidos débilmente

hasta el lado opuesto del objeto no cargado, dejando una deficiencia (carga positiva) en el costado cercano y un exceso (carga negativa) en el costado alejado. Puesto que cargas diferentes se encuentran cerca de la barra, la fuerza de atracción excederá a la de repulsión y el objeto eléctricamente neutro será atraído hacia la barra. No se gana ni se pierde carga alguna durante este proceso; simplemente, la carga del cuerpo neutro se redistribuye.

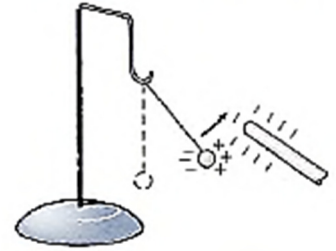


Figura 23.10 Atracción de un cuerpo neutro debido a la redistribución de la carga.

Carga por inducción

La redistribución de carga a causa de la presencia cercana de un objeto cargado es útil para cargar objetos eléctricamente sin hacer contacto. Este proceso, conocido como carga por inducción, se puede realizar sin ninguna pérdida de carga en el cuerpo cargado. Por ejemplo, consideremos dos esferas metálicas neutras que se tocan entre sí, como se muestra en la figura 23.11. Cuando una barra cargada negativamente se acerca a la esfera de la izquierda (sin tocarla), tiene lugar una redistribución de carga. Los electrones son forzados a desplazarse desde la esfera de la izquierda hasta la esfera de la derecha, a través del punto de contacto. Ahora bien, si las esferas se separan en presencia de la barra de carga, los electrones no pueden regresar a la esfera de la izquierda. A consecuencia de esto, la esfera de la izquierda tendrá una deficiencia de electrones (una carga positiva) y la de la derecha tendrá un exceso de electrones (una carga negativa).

Una carga también se puede inducir en una sola esfera. Este proceso se ilustra con el electroscopio

de la figura 23.12. Una barra cargada negativamente se coloca cerca de la perilla

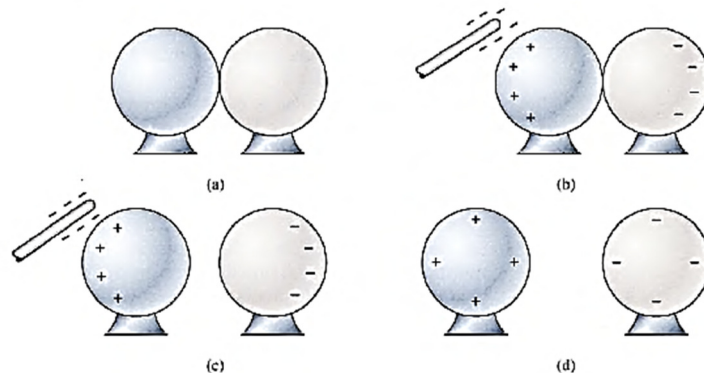


Figura 23.11 Carga de dos esferas metálicas por inducción.

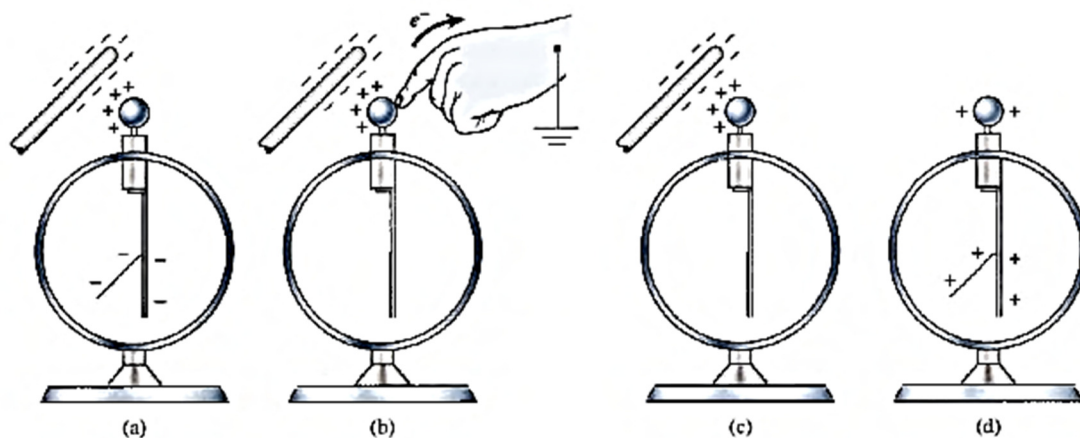


Figura 23.12 Carga de un electroscopio por inducción. Observe que la carga residual es opuesta a la del cuerpo de carga.

de metal, provocando una redistribución de carga. Los electrones repelidos hacen que la hoja se separe, dejando una deficiencia de electrones en la perilla. Al tocar la perilla con un dedo o al conectar un alambre de la perilla a tierra, se proporciona una vía para que los electrones repelidos dejen el electroscopio. El cuerpo o la tierra adquirirán una carga negativa igual a la carga positiva (deficiencia) que quedó en el electroscopio. Cuando se retira la barra cargada, la hoja del electroscopio de nuevo se separa, como muestra la figura. La carga por inducción siempre deja una carga residual que es opuesta a la carga del cuerpo.

Ley de Coulomb

Como de costumbre, la tarea del físico consiste en medir de forma cuantitativa las interacciones entre los objetos cargados. No es suficiente con establecer que existe una fuerza eléctrica; debemos ser capaces de predecir su magnitud.

La primera investigación teórica acerca de las fuerzas eléctricas entre cuerpos cargados fue realizada por Charles Augustin de Coulomb en 1784. Él llevó a cabo sus investigaciones con una balanza de torsión para medir la variación de la fuerza con respecto a la separación y la cantidad de carga. La separación r entre dos objetos cargados se define como la distancia en línea recta entre sus respectivos centros. La cantidad de carga q se puede considerar como el número de electrones o de protones que hay en exceso, en un cuerpo determinado.

Coulomb encontró que la fuerza de atracción o de repulsión entre dos objetos cargados es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa. En otras palabras, si la distancia entre dos objetos cargados se reduce a la mitad, la fuerza de atracción o de repulsión entre ellos se cuadruplicará.

El concepto de cantidad de carga no se comprendía con claridad en la época de Coulomb. No se había establecido aún la unidad de carga y no había forma de medirla, pero en sus experimentos se demostraba claramente que la fuerza eléctrica entre dos objetos cargados es directamente proporcional al producto de la cantidad de carga de cada objeto. Actualmente, estas conclusiones se enuncian en la ley de Coulomb:

“La fuerza de atracción o de repulsión entre dos cargas puntuales es directamente proporcional al producto de las dos cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa.”

Para lograr la expresión matemática de la ley de Coulomb consideremos las cargas de la figura 23.13. En dicha figura se indica la fuerza de atracción F entre dos cargas contrarias, así como la fuerza de repulsión entre dos cargas similares. En cualquier caso, la magnitud

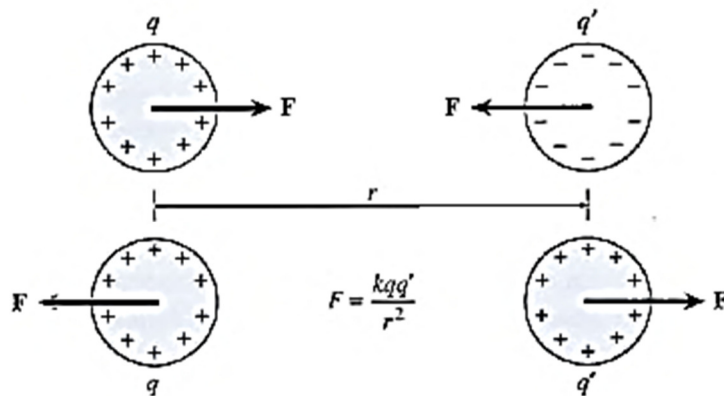


Figura 23.13 Ilustración de la ley de Coulomb.

de la fuerza se determina mediante las magnitudes de las cargas q y q' y por su separación r . Partiendo de la ley de Coulomb, escribimos

$$F \propto \frac{qq'}{r^2} \quad \text{o bien}$$

$$F = \frac{kqq'}{r^2}$$

La constante de proporcionalidad k incluye las propiedades del medio que separa los cuerpos cargados y tiene las dimensiones que dicta la ley de Coulomb.

En unidades del SI, el sistema práctico para el estudio de la electricidad, la unidad de carga se expresa en coulombs (C). En este caso, la cantidad de carga no se define por medio de la ley de Coulomb sino que se relaciona con el flujo de una carga a través de un conductor.

Posteriormente veremos que esta velocidad de flujo se mide en amperes. Una definición formal del coulomb es la siguiente:

“Un coulomb es la carga transferida en un segundo a través de cualquier sección transversal de un conductor, mediante una corriente constante de un ampere.”

Puesto que la teoría sobre la corriente eléctrica no se incluye en este capítulo, será suficiente comparar el coulomb con la carga de un electrón.

$$1 \text{ C} = 6.25 \times 10^{18} \text{ electrones}$$

Obviamente el coulomb es una unidad extremadamente grande desde el punto de vista de la mayoría de los problemas en electrostática. La carga de un electrón expresada en coulombs es

$$e^- = -1.6 \times 10^{-19}$$

donde e^- es el símbolo para el electrón y el signo menos denota la naturaleza de la carga.

Una unidad más conveniente para la electrostática es el microcoulomb (μC), definido por

$$1 \mu\text{C} = 10^{-6} \text{ C}$$

Puesto que las unidades de fuerza, carga y distancia del SI no dependen de la ley de Coulomb, la constante de proporcionalidad k debe determinarse experimentalmente. Un gran número de experimentos han mostrado que cuando la fuerza está en newtons, la distancia en metros y la carga en coulombs, la constante de proporcionalidad es, en forma aproximada,

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

Cuando se aplica la ley de Coulomb en unidades del SI, se debe sustituir este valor para k en la ecuación:

$$F = \frac{kqq'}{r^2}$$

$$F = \frac{(9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) qq'}{r^2}$$

Conviene recordar que F representa la fuerza sobre una partícula cargada y es, por tanto, una cantidad vectorial. La dirección de la fuerza se determina tan sólo por la naturaleza (+ o —) de las cargas q y q' . Para dos cargas, cada una ejercerá la misma fuerza sobre la otra con la excepción de que las fuerzas estarán en direcciones opuestas (la atracción o repulsión es mutua). Por tanto, primero se debe decidir cuál carga considerar y luego determinar la dirección de la fuerza sobre esa carga debida a la otra carga. La dirección se determina por medio de las leyes de atracción y repulsión; cargas iguales se repelen y cargas distintas se atraen.

La magnitud de la fuerza F se obtiene a partir de la ley de Coulomb al sustituir los valores absolutos para q , q' y r . Las unidades de las cargas deben ser coulombs y las de la distancia deben ser metros si las fuerzas se van a medir en newtons.

Ejemplo

Dos cargas, $q_1 = -8\mu\text{C}$ y $q_2 = +12\mu\text{C}$, se colocan a 12 cm de distancia entre sí en el aire. ¿Cuál es la fuerza resultante sobre una tercera carga, $q_3 = -4\mu\text{C}$, colocada a medio camino entre las otras dos fuerzas?

Plan: Primero dibujamos una línea recta horizontal e indicamos las posiciones y magnitudes de las tres cargas, como muestra la figura 23.14. Nos centramos en la carga central q_3 e indicamos las direcciones de las fuerzas F_1 y F_2 que actúan sobre q_3 debido a las cargas q_1 y q_2 . La ley de Coulomb nos permite obtener las magnitudes de las fuerzas, y su resultante puede calcularse como la suma de vectores.

Solución: Primero se convierte la distancia a metros ($12\text{ cm} = 0.12\text{ m}$) y se obtiene el punto medio, es decir, se saca la mitad de 0.12 m , que es igual a 0.06 m . Las cargas se convierten a coulombs ($1\mu\text{C} = 1 \times 10^{-6}\text{ C}$). La fuerza F_1 sobre q_3 debida a q_1 se calcula a partir de la ley de Coulomb. Recuerde que el signo de la carga se usa sólo para hallar la dirección de las fuerzas. Los valores absolutos sólo se necesitarán para sustitución.

$$F_1 = \frac{kq_1q_3}{r^2} = \frac{(9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)(8 \times 10^{-6} \text{ C})(4 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0.06 \text{ m})^2}$$

$$F_1 = 80 \text{ N, repulsión (a la derecha)}$$

De manera similar, la fuerza F_2 en q_3 es igual a

$$F_2 = \frac{kq_2q_3}{r^2} = \frac{(9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)(12 \times 10^{-6} \text{ C})(4 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0.06 \text{ m})^2}$$

$$F_2 = 120 \text{ N, atracción (también a la derecha)}$$

Finalmente, la fuerza resultante es la suma de vectores de F_1 y F_2 .

$$F = 80 \text{ N} + 120 \text{ N} = 200 \text{ N, a la derecha}$$

Finalmente, la fuerza resultante es la suma de vectores de F_1 y F_2 .

$$F = 80 \text{ N} + 120 \text{ N} = 200 \text{ N, a la derecha}$$

Observe que los signos de las cargas se usaron sólo para determinar la dirección de las fuerzas; no se usaron en la ley de Coulomb.

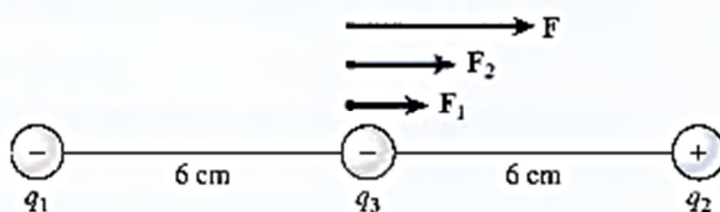


Figura 23.14 Cálculo de la fuerza resultante sobre una carga que está colocada en el punto medio de la distancia entre las otras dos cargas.

Ejemplo:

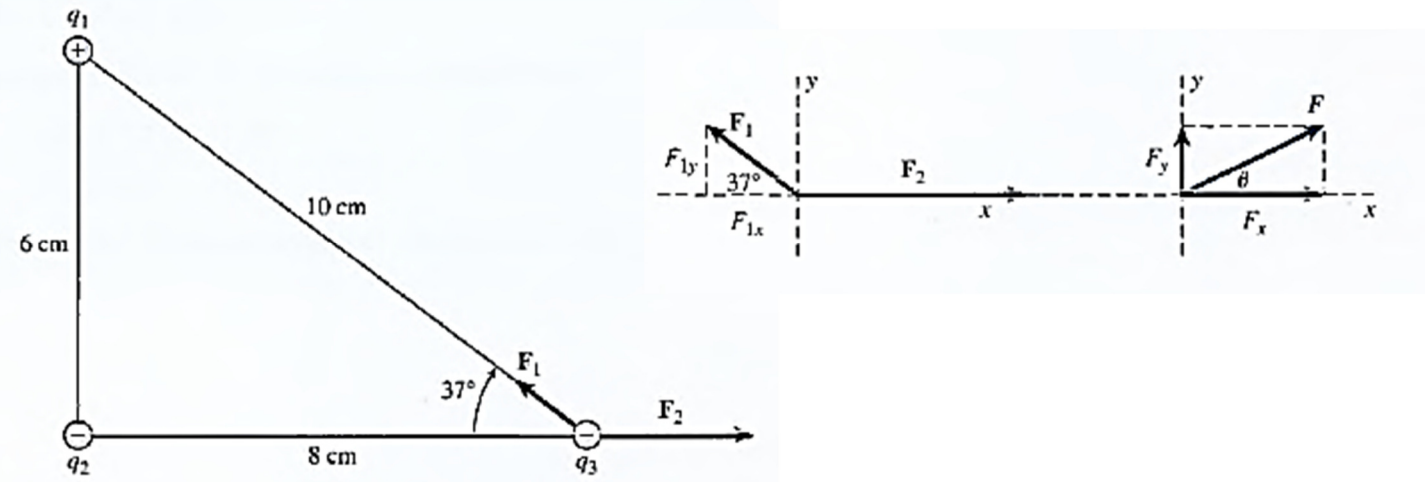
Tres cargas, $q_1 = +4 \times 10^{-9} \text{ C}$, $q_2 = -6 \times 10^{-9} \text{ C}$ y $q_3 = -8 \times 10^{-9} \text{ C}$, están separadas como muestra la figura 23.15. ¿Cuál es la fuerza resultante sobre q_3 debida a las otras dos cargas?

Plan: Trazamos un esquema y un diagrama de cuerpo libre, marcando toda la información proporcionada, como se aprecia en la figura 23.15. Consideramos la carga q_3 para calcular de manera independiente la magnitud y la dirección de cada fuerza debida a las otras cargas. La fuerza resultante se determina mediante el método de las componentes. (En la sección 3.12 se incluye un repaso de la suma de vectores.)

Ejemplo:

Tres cargas, $q_1 = +4 \times 10^{-9} \text{ C}$, $q_2 = -6 \times 10^{-9} \text{ C}$ y $q_3 = -8 \times 10^{-9} \text{ C}$, están separadas como muestra la figura 23.15. ¿Cuál es la fuerza resultante sobre q_3 debida a las otras dos cargas?

Plan: Trazamos un esquema y un diagrama de cuerpo libre, marcando toda la información proporcionada, como se aprecia en la figura 23.15. Consideramos la carga q_3 para calcular de manera independiente la magnitud y la dirección de cada fuerza debida a las otras cargas. La fuerza resultante se determina mediante el método de las componentes.



Solución: Sea F_1 la fuerza sobre q_3 debida a q_1 , y sea F_2 la fuerza sobre q_3 debida a q_2 . F_1 es la fuerza de atracción (*cargas distintas*) y F_2 es una fuerza de repulsión (*cargas iguales*), como muestra la figura 23.15. La *magnitud* y la *dirección* de cada fuerza se determinan como sigue:

$$\begin{aligned}
 F_1 &= \frac{kq_1q_3}{r^2} = \frac{(9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)(4 \times 10^{-9} \text{ C})(8 \times 10^{-9} \text{ C})}{(0.100 \text{ m})^2} \\
 &= 2.88 \times 10^{-5} \text{ N} = 28.8 \mu\text{N} \text{ (} 37^\circ \text{ N del O)} \\
 F_2 &= \frac{kq_2q_3}{r^2} = \frac{(9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)(6 \times 10^{-9} \text{ C})(8 \times 10^{-9} \text{ C})}{(0.080 \text{ m})^2} \\
 &= 6.75 \times 10^{-5} \text{ N} = 67.5 \mu\text{N, este}
 \end{aligned}$$

La fuerza resultante se determina usando el método de componentes de la suma de vectores. Las componentes x y y de F_1 y F_2 se resumen en la tabla 23.1.

Tabla 23.1

Vector	Ángulo ϕ_x	Componente x	Componente y
$F_1 = 28.8 \mu\text{N}$	37°	$F_{1x} = -(28.8 \mu\text{N})(\cos 37^\circ)$ $= -23.0 \mu\text{N}$	$F_{1y} = (28.8 \mu\text{N})(\sin 37^\circ)$ $= 17.3 \mu\text{N}$
$F_2 = 67.5 \mu\text{N}$	0°	$F_{2x} = +67.5 \mu\text{N}$	$F_{2y} = 0 \mu\text{N}$
F	θ	$F_x = \Sigma F_x = +44.5 \mu\text{N}$	$F_y = \Sigma F_y = +17.3 \mu\text{N}$

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

$$= \sqrt{(44.5 \mu\text{N})^2 + (17.3 \mu\text{N})^2} = 47.7 \mu\text{N}$$

A continuación, se encuentra la dirección a partir de la función tangente.

$$\tan \theta = \left| \frac{F_y}{F_x} \right| = \left| \frac{17.3 \mu\text{N}}{44.5 \mu\text{N}} \right| \quad y \quad \theta = 213^\circ \text{ N del E}$$

Por consiguiente, la fuerza resultante sobre q_3 es $47.7 \mu\text{N}$, dirigida a 21.2° N del E.

Resumen y repaso

La electrostática es la ciencia que estudia las cargas en reposo. Hemos visto que existen dos tipos de cargas en la naturaleza. Si un objeto tiene un exceso de electrones, se dice que está cargado negativamente; si tiene una deficiencia de electrones, está cargado positivamente. La ley de Coulomb fue presentada para proveer una medida cuantitativa de las fuerzas eléctricas que existen entre esas cargas. Los principales conceptos se mencionan a continuación.

- La primera ley de la electrostática establece que las cargas del mismo signo se repelen entre sí y las cargas de diferente signo se atraen unas a otras.

- * La ley de Coulomb establece que la fuerza de atracción o repulsión entre dos cargas puntuales es directamente proporcional al producto de las dos cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia (separación) entre las dos cargas.

$$F = \frac{kqq'}{r^2} \quad \text{Ley de Coulomb}$$

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

La fuerza F está en newtons (N) cuando la distancia r está en metros (m) y la carga q se mide en coulombs (C).

- Al resolver los problemas de este capítulo, es importante usar el signo de las cargas para determinar la dirección de las fuerzas, y la ley de Coulomb para determinar sus magnitudes. La fuerza resultante sobre una carga en particular se calcula con los métodos de la mecánica vector

Estrategia para resolver problemas.

Fuerzas Eléctricas y Ley de Coulumb.

1. Lea el problema, dibuje un esquema y marque en él los datos. Indique las cargas positivas y negativas junto con las distancias conocidas. Las cargas deben estar en coulombs y las distancias deben estar en metros.

Recuerde que $1 \mu\text{C} = 1 \times 10^{-6} \text{ C}$ y que $1 \text{ nC} = 1 \times 10^{-9} \text{ C}$.

2. Tenga cuidado de no confundir la naturaleza de la carga (+ o —) con el signo correspondiente a las fuerzas y sus componentes. La atracción o repulsión determina la dirección de las fuerzas eléctricas.

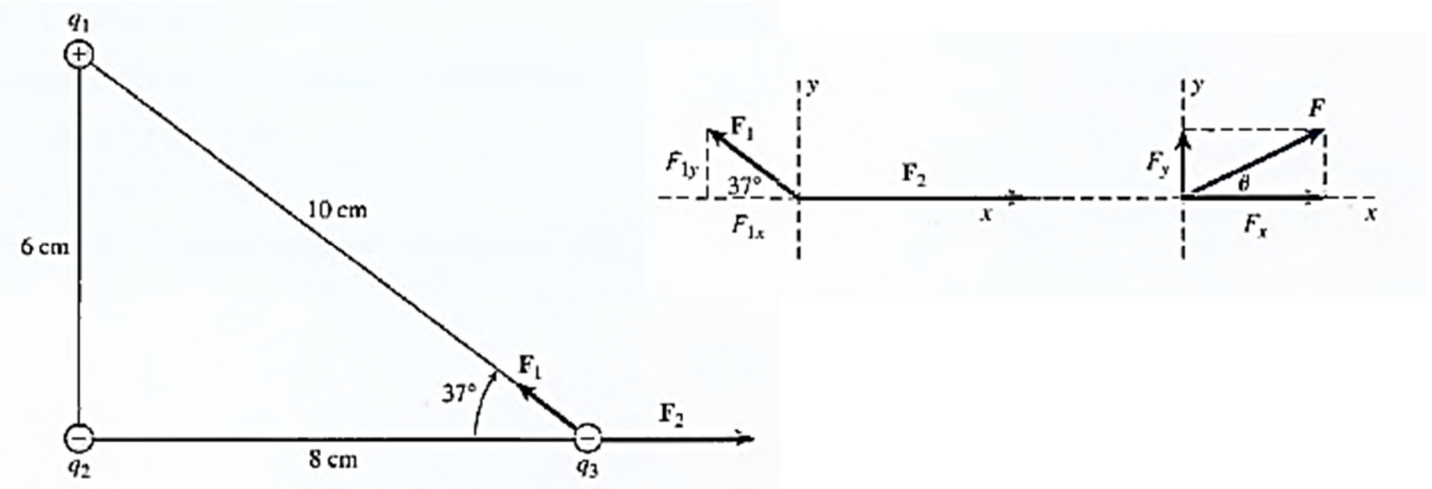
3. La fuerza resultante sobre una determinada carga a causa de una o varias cargas vecinas se determina por medio de la suma vectorial de la fuerza que cada carga ejercería si actuara sola. La magnitud de cada fuerza se calcula a partir de la ley de Coulomb; la dirección se determina partiendo del hecho de que cargas iguales se repelen y cargas diferentes se atraen. Construya un diagrama de cuerpo libre y prosiga con la suma vectorial como se estudió en los ejemplos del texto. Tal vez le convenga revisar la suma vectorial por el método de las componentes que se estudió en el capítulo 3.

4. Para cargas en equilibrio recuerde que la primera condición para el equilibrio indica que la suma de las componentes en x es cero y que la suma de las componentes en y es cero.

Ejemplo:

Tres cargas, $q_1 = +4 \times 10^{-9} \text{ C}$, $q_2 = -6 \times 10^{-9} \text{ C}$ y $q_3 = -8 \times 10^{-9} \text{ C}$, están separadas como muestra la figura 23.15. ¿Cuál es la fuerza resultante sobre q_3 debida a las otras dos cargas?

Plan: Trazamos un esquema y un diagrama de cuerpo libre, marcando toda la información proporcionada, como se aprecia en la figura 23.15. Consideramos la carga q_3 para calcular de manera independiente la magnitud y la dirección de cada fuerza debida a las otras cargas. La fuerza resultante se determina mediante el método de las componentes.



Problemas Ley de Coulomb

- 23.1. Dos esferas, cada una con una carga de $3 \mu\text{C}$, están separadas a 20 mm. ¿Cuál es la fuerza de repulsión entre ellas?
- 23.2. Dos cargas puntuales de -3 y $+4 \mu\text{C}$ están separadas 12 mm en el vacío. ¿Cuál es la fuerza electrostática entre ellas?
- 23.3. Una partícula alfa consiste en dos protones ($q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$) y dos neutrones (sin carga). ¿Cuál es la fuerza de repulsión entre dos partículas alfa separadas 2 mm entre sí?
- 23.4. Suponga que el radio de la órbita del electrón alrededor del protón, en un átomo de hidrógeno, es de $5.2 \times 10^{-11} \text{ m}$ aproximadamente. ¿Cuál es la fuerza electrostática de atracción?
- 23.5. ¿Cuál es la separación de dos cargas de $-4 \mu\text{C}$ si la fuerza de repulsión entre ellas es 200 N
- 23.6. Dos cargas idénticas separadas 30 mm son sujetas a una fuerza de repulsión de 980 N. ¿Cuál es la magnitud de cada carga?
- *23.7. Una carga de $10 \mu\text{C}$ y una carga de $-6 \mu\text{C}$ están separadas 40 mm. ¿Qué fuerza existe entre ellas? Las esferas se ponen en contacto unos cuantos segundos y luego se separan de nuevo 40 mm. ¿Cuál es la nueva fuerza? ¿Es de atracción o de repulsión?
- *23.8. Dos cargas puntuales se atraen inicialmente entre sí con una fuerza de 600 N. Si su separación se reduce a un tercio de su valor original, ¿cuál es la nueva fuerza de atracción?
- 23.9. Una carga de $+60 \mu\text{C}$ se coloca 60 mm a la izquierda de una carga de $+20 \mu\text{C}$. ¿Cuál es la fuerza resultante sobre una carga de $-35 \mu\text{C}$ colocada en el punto medio entre las dos cargas?
- 23.10. Una carga puntual de $+36 \mu\text{C}$ se coloca 80 mm a la izquierda de una segunda carga puntual de $-22 \mu\text{C}$. ¿Qué fuerza se ejerce sobre una tercera carga de $+10 \mu\text{C}$ colocada en el punto medio?