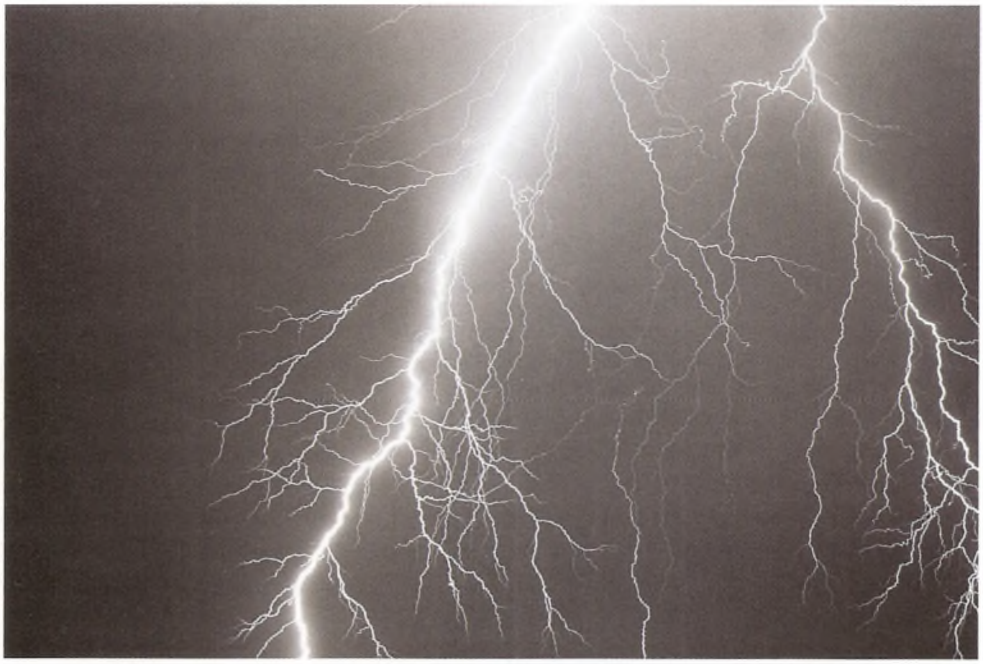
23 La fuerza eléctrica



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. (*Fotografía © vol. 1 PhotoDisc/Getty.*)

Objetivos

Cuando termine de estudiar este capítulo el alumno:

1. Demostrará la existencia de dos clases de carga eléctrica y comprobará la *primera ley de la electrostática* usando materiales de laboratorio.
2. Explicará y demostrará el proceso de carga por *contacto* y por *inducción*, y usará un *electroscopio* para determinar la naturaleza de una carga desconocida.
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, estás 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.

23.1 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. 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 sensible que se utiliza para detectar la presencia de carga eléctrica.

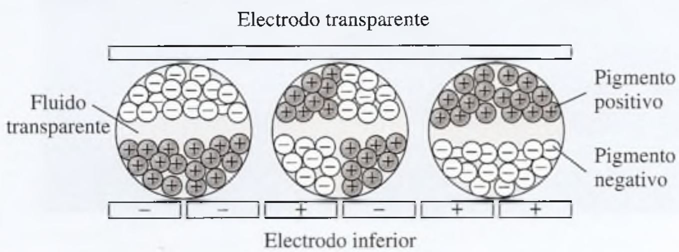
El electroscopio de esferas de médula de saúco se puede utilizar para estudiar los efectos de la electrificación. Considere dos esferas de médula de saúco con pintura metálica suspendidas de un punto común mediante hilos de seda. Empezamos por frotar vigorosamente la barra de ebonita con el pedazo de 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.

FÍSICA HOY

Imagine un periódico que no necesita reciclarse o desecharse. Las noticias se transmiten cada mañana en forma electrónica a un material preparado especialmente parecido al papel o a otros dispositivos. Además, el texto y los gráficos son estables y no requieren baterías. Usted puede leer un libro o transportar la información con usted a la playa o a cualquier otra parte. Varias compañías como Xerox y E-Ink están desarrollando aplicaciones como ésta.

Una aplicación utiliza millones de microcápsulas diminutas que contienen partículas negras con carga positiva suspendidas en un fluido transparente. La manipulación de un campo eléctrico entre un electrodo superior transparente y un electrodo inferior puede controlar la posición de las partículas blancas y negras. Por tanto, el texto y los gráficos pueden mostrarse en forma de píxeles, de un modo parecido a como se muestran en un monitor de computadora.



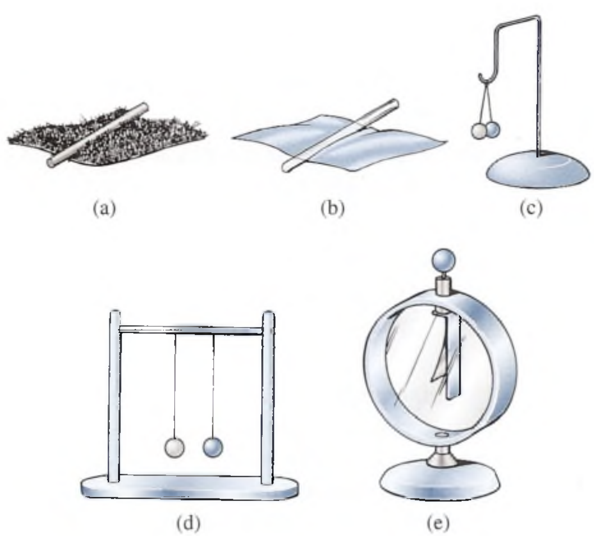


Figura 23.1 Materiales de laboratorio para estudiar la electrostática: (a) una barra de ebonita descansa sobre un trozo de piel de gato, (b) una barra de vidrio descansa sobre un pedazo de seda, (c) el electroscopio de esferas de médula de saúco, (d) dos esferas de médula de saúco suspendidas y (e) el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

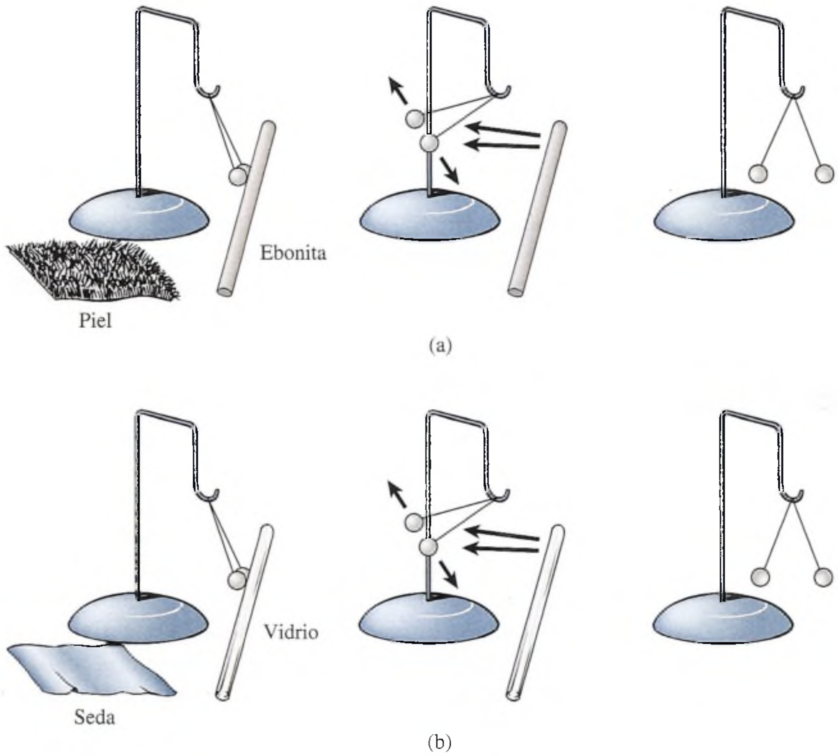


Figura 23.2 (a) Cómo proporcionar carga a un electroscopio de esferas de médula de saúco con una barra de ebonita. (b) Cómo proporcionar carga a las esferas de médula de saúco con una barra de vidrio.

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

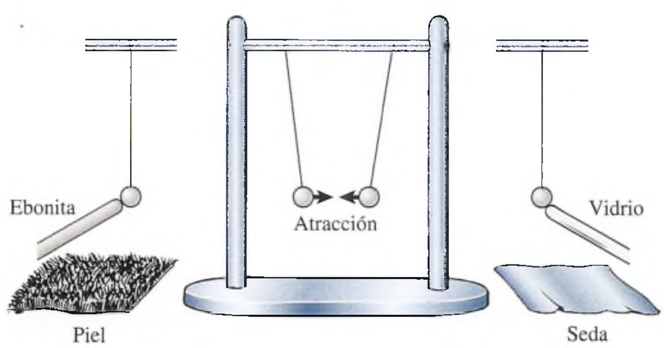


Figura 23.3 Existe una fuerza de atracción entre dos sustancias que tienen carga opuesta.

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.

23.2 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.

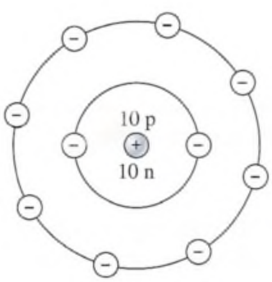


Figura 23.4 El átomo de neón consiste en un núcleo estrechamente compactado que contiene diez protones (p) y diez neutrones (n). El átomo es eléctricamente neutro debido a que está rodeado por diez electrones.

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.

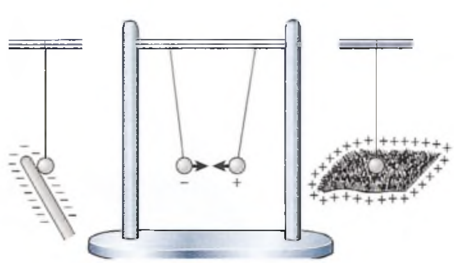


Figura 23.5 Al frotar una barra de ebonita con un pedazo de piel se transfieren electrones de la piel a la barra.

23.3 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.

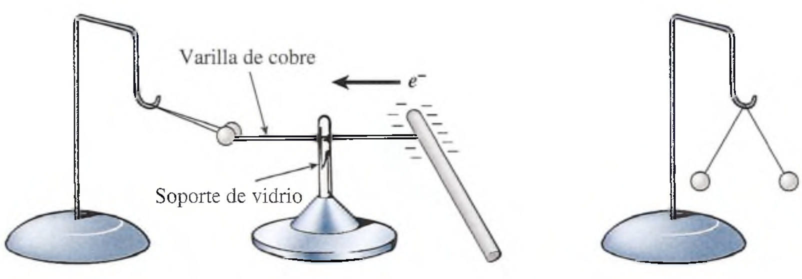


Figura 23.6 Los electrones son conducidos por la varilla de cobre para cargar las esferas de médula de saúco.

23.4 El electroscopio de hojas de oro

Figura 23.7 Electroscopio de hoja 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.

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.

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).

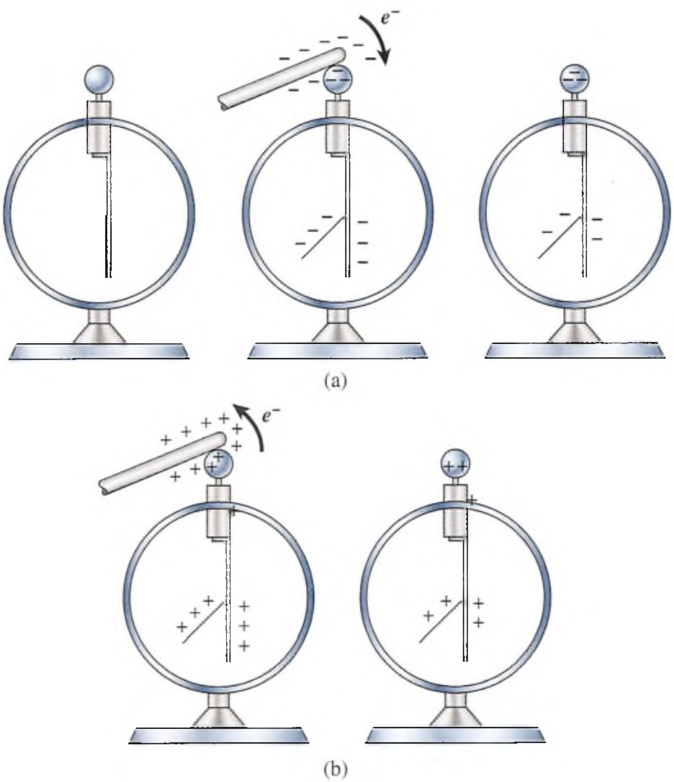


Figura 23.8 Carga del electroscopio por contacto con (a) una barra cargada negativamente y (b) una barra cargada positivamente.

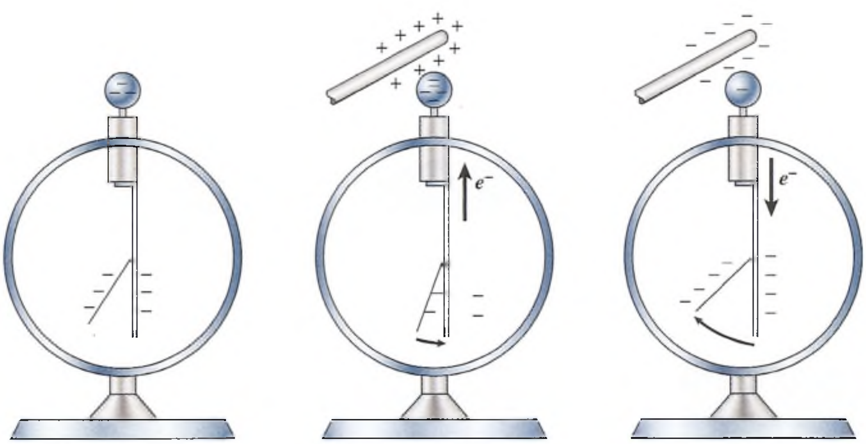


Figura 23.9 Un electroscopio cargado negativamente se puede usar para detectar la presencia de otra carga.

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.

23.5 Redistribución de carga

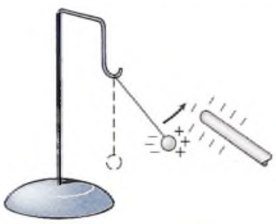


Figura 23.10 Atracción de un cuerpo neutro debido a la redistribución de la carga.

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.

23.6 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

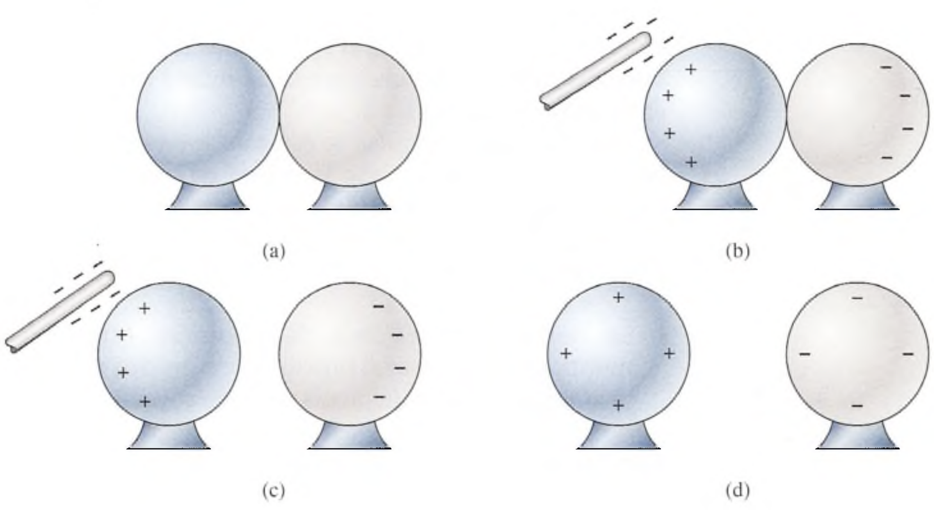


Figura 23.11 Carga de dos esferas metálicas por inducción.

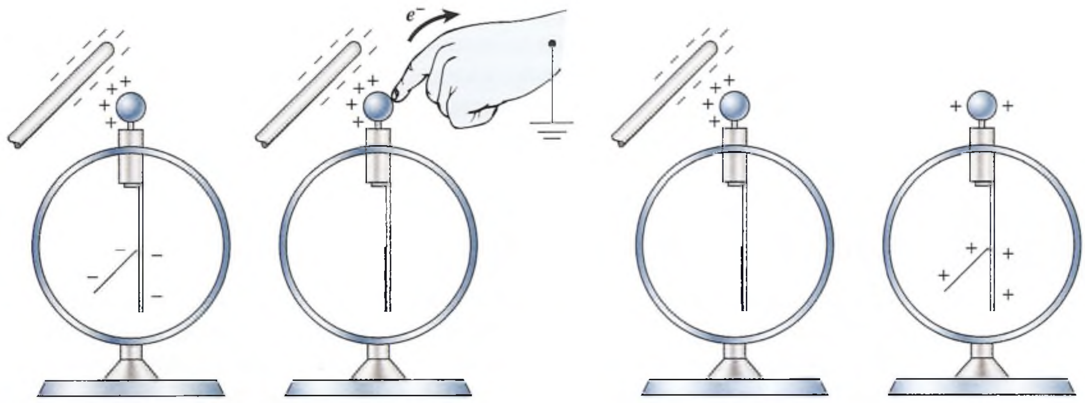


Figura 23.12 Carga de un electroscopio por inducción. Observe que la carga residual es opuesta a la del cuerpo de carga.

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.

23.7 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

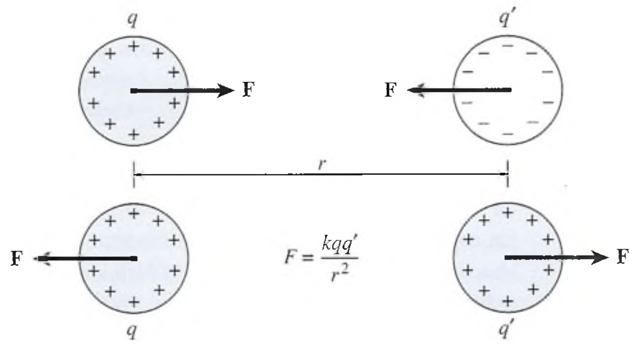


Figura 23.13 Ilustración de la ley de Coulomb.

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

$$F \propto \frac{qq'}{r^2}$$

o bien

$$F = \frac{kqq'}{r^2} \tag{23.1}$$

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

$$e^- = -1.6 \times 10^{-19}\ \text{C} \tag{23.2}$$

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

$$1\ \mu\text{C} = 10^{-6}\ \text{C} \tag{23.3}$$

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,

$$k = 9 \times 10^9\ \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2 \tag{23.4}$$

Cuando se aplica la ley de Coulomb en unidades del SI, se debe sustituir este valor para k en la ecuación (23.1):

$$F = \frac{(9 \times 10^9\ \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)\, qq'}{r^2} \tag{23.5}$$

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 23.1

Dos cargas, $q_1 = -8\mu C$ y $q_2 = +12\mu C$, se colocan a 12 cm de distancia entre sí en el aire. ¿Cuál es la fuerza resultante sobre una tercera carga, $q_3 = -4\mu C$, 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 $\mathbf{F}_1$ y $\mathbf{F}_2$ 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 cm = 0.12 m) y se obtiene el punto medio, es decir, se saca la mitad de 0.12 m, que es igual a 0.6 m. Las cargas se convierten a coulombs (1 μC = 1 × 10^{-6} C). La fuerza $\mathbf{F}_1$ 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.

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

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

De manera similar, la fuerza $\mathbf{F}_2$ en q_3 es igual a

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

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

Finalmente, la fuerza resultante es la suma de vectores de $\mathbf{F}_1$ y $\mathbf{F}_2$.

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

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.

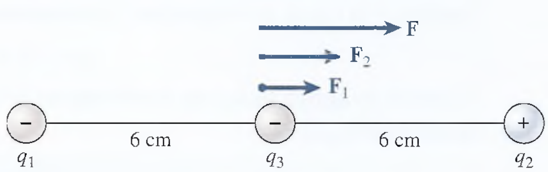


Figura 23.14 Cálculo de la fuerza resultante sobre una carga que está colocada en el punto medio de la distancia entre las otras dos cargas.

Estrategia para resolver problemas

Fuerzas eléctricas y ley de Coulomb

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 μC = 1×10^{-6} C y que 1 nC = 1×10^{-9} 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 23.2

Tres cargas, $q_1 = +4 \times 10^{-9}$ C, $q_2 = -6 \times 10^{-9}$ C y $q_3 = -8 \times 10^{-9}$ 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.)

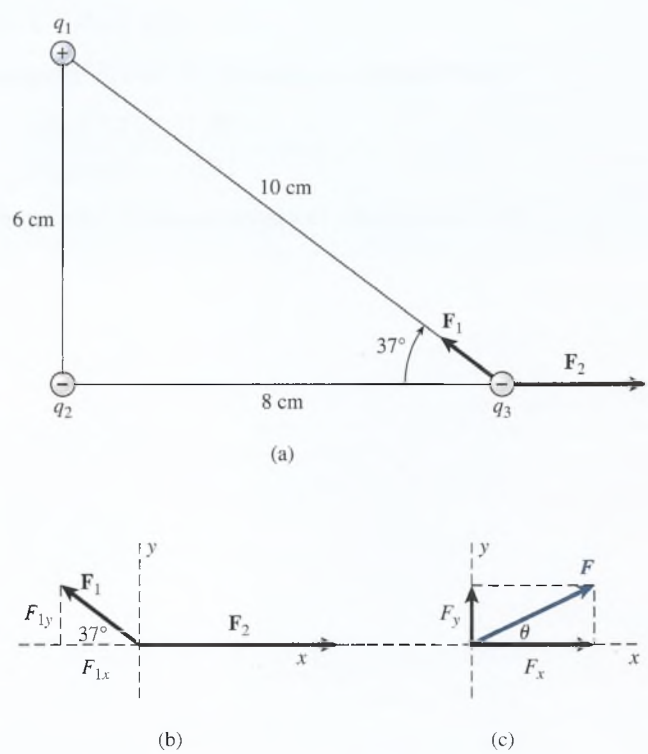


Figura 23.15

Solución: Sea $\mathbf{F}_1$ la fuerza sobre q_3 debida a q_1, y sea $\mathbf{F}_2$ la fuerza sobre q_3 debida a q_2. $\mathbf{F}_1$ es la fuerza de atracción (*cargas distintas*) y $\mathbf{F}_2$ 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:

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

La fuerza resultante se determina usando el método de componentes de la suma de vectores. Las componentes x y y de $\mathbf{F}_1$ y $\mathbf{F}_2$ 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°	$F_{1x} = -(28.8\ \mu\text{N})(\cos 37°)$ $= -23.0\ \mu\text{N}$	$F_{1y} = (28.8\ \mu\text{N})(\text{sen}\,37°)$ $= 17.3\ \mu\text{N}$
$F_2 = 67.5\ \mu\text{N}$	0°	$F_{2x} = +67.5\ \mu\text{N}$	$F_{2y} = 0\ \mu\text{N}$
F	θ	$F_x = \Sigma F_x = +44.5\ \mu\text{N}$	$F_y = \Sigma F_y = +17.3\ \mu\text{N}$

En la figura 23.15c, aplicamos el teorema de Pitágoras para determinar la magnitud de la fuerza resultante F sobre q_3:

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

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

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

Por consiguiente, la fuerza resultante sobre q_3 es 47.7 μN, dirigida a 21.2° N del E.

Resumen y repaso

Resumen

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.*

$$\boxed{F = \frac{kqq'}{r^2} \qquad \textit{Ley de Coulomb}}$$

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

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 vectorial.

Conceptos clave

Preguntas de repaso

23.1. Comente varios ejemplos de electricidad estática, además de los mencionados en el texto.

23.2. ¿Se *crea* alguna carga en el proceso de frotar una varilla de vidrio con un pedazo de seda? Explique su respuesta.

23.3. ¿Cuál es la naturaleza de la carga que aparece en el pedazo de seda de la pregunta 23.2?

23.4. En el laboratorio, un soporte aislado sujeta una esfera metálica eléctricamente cargada. Describa varios procedimientos para determinar la naturaleza de la carga en esa esfera.

23.5. En un experimento de laboratorio se observa que dos cuerpos se atraen entre sí. ¿Es ésta una prueba concluyente de que ambos están cargados? Explique su respuesta.

23.6. Se observa que dos cuerpos se repelen mutuamente con una fuerza eléctrica. ¿Es ésta una prueba concluyente de que ambos están cargados? Explique su respuesta.

23.7. Uno de los principios fundamentales de la física es el principio de la conservación de la carga, según el cual *la cantidad total de carga eléctrica en el universo no cambia.* ¿Puede exponer razones para aceptar esta ley?

23.8. Describa lo que pasa con la hoja de un electroscopio cargado positivamente cuando (a) una barra cargada negativamente se acerca cada vez más a la perilla sin tocarla, (b) una barra cargada positivamente se acerca más y más a la perilla.

23.9. Cuando el electroscopio de hoja se carga por inducción, ¿debemos quitar el dedo antes de retirar la barra con la carga? Explique su respuesta.

23.10. Escriba una lista con las unidades que corresponden a cada parámetro de la ley de Coulomb en unidades del SI.

23.11. La ley de Coulomb sólo es válida cuando la separación r es grande en comparación con los radios de la carga. ¿Cuál es la razón de esta limitación?

23.12. ¿Cuántos electrones se requerirían para impartir a una esfera de metal una carga negativa de (a) 1 C, (b) 1 μC?

Problemas

Sección 23.7 Ley de Coulomb

23.1. Dos esferas, cada una con una carga de 3 μC, están separadas a 20 mm. ¿Cuál es la fuerza de repulsión entre ellas? Resp. 202.5 N

23.2. Dos cargas puntuales de -3 y $+4$ μC están separadas 12 mm en el vacío. ¿Cuál es la fuerza electrostática entre ellas?

23.3. Una partícula alfa consiste en dos protones (q_e = 1.6×10^{-19} C) y dos neutrones (sin carga). ¿Cuál es la fuerza de repulsión entre dos partículas alfa separadas 2 mm entre sí? Resp. 2.30×10^{-10} N

23.4. Suponga que el radio de la órbita del electrón alrededor del protón, en un átomo de hidrógeno, es de 5.2×10^{-11} m aproximadamente. ¿Cuál es la fuerza electrostática de atracción?

23.5. ¿Cuál es la separación de dos cargas de -4 μC si la fuerza de repulsión entre ellas es 200 N? Resp. 26.8 mm

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 μC y una carga de -6 μC 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? Resp. 338 N, de atracción; 5.62 N, 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 $+60$ μC se coloca 60 mm a la izquierda de una carga de $+20$ μC. ¿Cuál es la fuerza resultante sobre una carga de -35 μC colocada en el punto medio entre las dos cargas? Resp. 1.40×10^4 N, izquierda

23.10. Una carga puntual de $+36$ μC se coloca 80 mm a la izquierda de una segunda carga puntual de -22 μC. ¿Qué fuerza se ejerce sobre una tercera carga de $+10$ μC colocada en el punto medio?

23.11. En el problema 23.10, ¿cuál es la fuerza resultante sobre una tercera carga de $+12$ μC colocada entre las otras cargas y a 60 mm de la carga de $+36$ μC? Resp. 7020 N, derecha

23.12. Una carga de $+6$ μC está 44 mm a la derecha de una carga de -8 μC. ¿Cuál es la fuerza resultante sobre una carga de -2 μC que se encuentra 20 mm a la derecha de la carga de -8 μC?

***23.13.** Una carga de 64 μC está colocada 30 cm a la izquierda de una carga de 16 μC. ¿Cuál es la fuerza resultante sobre una carga de -12 μC localizada exactamente 50 mm debajo de la carga 16 μC? Resp. 2650 N, 113.3°

***23.14.** Una carga de $+60$ nC se localiza 80 mm arriba de una carga de -40 nC. ¿Cuál es la fuerza resultante sobre una carga de -50 nC colocada 45 mm a la derecha de la carga de -40 nC en dirección horizontal?

***23.15.** Tres cargas puntuales, $q_1 = +8$ μC, $q_2 = -4$ μC y $q_3 = +2$ μC, se colocan en las esquinas de un triángulo equilátero, que mide 80 mm por cada lado. ¿Cuáles son la magnitud y la dirección de la fuerza resultante sobre la carga de $+8$ μC? Resp. 39 N, 330°

Problemas adicionales

23.16. ¿Cuál debe ser la separación entre dos cargas de $+5$ μC para que la fuerza de repulsión sea de 4 N?

23.17. La fuerza de repulsión entre dos esferas de médula de saúco es de 60 μN. Si cada esfera de médula de saúco tiene una carga de 8 nC, ¿cuál es la separación entre ellas? Resp. 98 mm

23.18. Dos cargas desconocidas idénticas se encuentran sometidas a una fuerza de repulsión recíproca de 48 N cuando la distancia que las separa es de 60 mm. ¿Cuál es la magnitud de cada carga?

23.19. Un objeto contiene un exceso de 5×10^{14} electrones y otro tiene una deficiencia de 4×10^{14} electrones. ¿Cuál es la fuerza que cada uno ejerce sobre el otro si están a 30 mm de distancia entre sí? ¿Se trata de atracción o de repulsión? Resp. 5.12×10^4 N; atracción

23.20. Si fuera posible colocar 1 C de carga en cada una de dos esferas separadas por una distancia de 1 m, ¿cuál sería la fuerza de repulsión en newtons?

23.21. ¿Cuántos electrones es necesario colocar en cada una de dos esferas, separadas entre sí 4 mm, para producir una fuerza de repulsión de 400 N entre ellas? Resp. 5.27×10^{12} electrones

23.22. Una carga de -40 nC se coloca 40 mm a la izquierda de una carga de $+6$ nC. ¿Cuál es la fuerza resultante sobre una carga de -12 nC colocada 8 mm a la derecha de la carga de $+6$ nC?

23.23. Una carga de 5 μC se localiza 6 cm a la derecha de una carga de 2 μC. ¿Cuál es la fuerza resultante sobre una carga de −9 nC colocada 2 m a la izquierda de la carga de 2 μC? Resp. 468 mN, derecha

23.24. El mismo número de electrones se coloca en dos esferas de metal separadas 3.0 cm en el aire. ¿Cuántos electrones hay en cada esfera si la fuerza resultante es de 4500 N?

23.25. Una carga de 4 nC se coloca sobre una esfera de 4 g que puede moverse libremente. Una carga puntual fija de 10 μC está a 4 cm de distancia. ¿Cuál es la aceleración inicial de la carga de 4 μC? Resp. 56.25 m/s^2

***23.26.** Calcule la fuerza resultante sobre una carga de +2 μC localizada a 60 mm de distancia de cada una de dos cargas de −4 μC separadas entre sí 80 mm en el aire.

***23.27.** Dos cargas de +25 y +16 μC están separadas por una distancia de 80 mm. Una tercera carga de +60 μC se coloca entre las otras cargas a 30 mm de la carga de +25 μC. Calcule la fuerza resultante sobre la tercera carga. Resp. 1.15×10^4 N

***23.28.** Una esfera de médula de saúco de 0.02 g está suspendida libremente. Se le imparte una carga de +20 μC y se coloca a 0.6 m de una carga de +50 μC. ¿Cuál será la aceleración inicial de la esfera de médula?

***23.29.** Una carga de 4 μC se localiza a 6 cm de una carga de 8 μC. ¿En qué punto de la recta que une las dos cargas tendrá la fuerza resultante el valor de cero? Resp. 2.49 cm de la carga de 4 μC

***23.30.** Una carga de +8 nC se coloca 40 mm a la izquierda de una carga de −14 nC. ¿Dónde se debe colocar una tercera carga para que ésta quede sometida a una fuerza resultante de cero?

***23.31.** Una carga de +16 μC está 80 mm a la derecha de una carga de +9 μC. ¿Dónde se deberá colocar una tercera carga para que la fuerza resultante sea cero? Resp. 34.3 mm a la derecha de la carga de 9 μC

***23.32.** Dos esferas de 3 g están suspendidas de un mismo punto mediante dos hilos delgados de seda de 80 mm con masa insignificante. ¿Qué carga habrá que colocar en cada esfera para que estén separadas en sus posiciones finales por una distancia de 50 mm?

Preguntas para la reflexión crítica

***23.33.** A una pequeña esfera de metal se le imparte una carga de +40 μC y a una segunda esfera colocada a 8 cm de distancia se le imparte una carga de −12 μC. ¿Cuál es la fuerza de atracción entre ambas? Si se permite que las dos esferas se toquen y luego se vuelven a separar 8 cm, ¿qué nueva fuerza eléctrica existe entre ellas? ¿Esta fuerza es de atracción o de repulsión? Resp. 675 N, atracción; 276 N, de repulsión

***23.34.** La carga total sobre dos esferas de metal separadas 50 mm es de 80 μC. Si se repelen entre sí con una fuerza de 800 N, ¿cuál es la carga en cada esfera?

***23.35.** Cuatro esferas pequeñas se colocan en las esquinas de un cuadrado cuyos lados tienen 6 cm de longitud, y a cada una de ellas se aplican cargas de $q = +20$ μC. Demuestre que la fuerza resultante en cada carga tiene una magnitud igual a 1914 N. ¿Cuál es la dirección de la fuerza? ¿Qué cambiaría si cada una de las cargas fuera de $q = -20$ μC? Resp. 1914 N, se alejarían 45° del centro

***23.36.** Dos cargas q_1 y q_2 están separadas por una distancia r. A esta distancia se ejerce sobre ellas una fuerza F. Si la separación inicial disminuye en sólo 40 mm, la fuerza entre las dos cargas se duplica. ¿Cuál era la distancia inicial?

***23.37.** Dos esferas de médula de saúco de 8 g están suspendidas de hilos de seda de 60 cm de longitud, atados a un mismo punto. Cuando a las esferas se les imparten cantidades iguales de carga negativa, éstas se separan y quedan en reposo a 30 cm una de otra. Calcule la magnitud de la carga en cada esfera de médula. Resp. −450 nC

24 El campo eléctrico

Las ventanas inteligentes pueden cambiar una vista clara y transparente en una neblinosa e incluso oscura con sólo encender un interruptor. Partículas diminutas, conocidas como dispositivos de partículas suspendidas, se colocan en medio de dos paneles transparentes de material conductor. Al activar un campo eléctrico entre los paneles las partículas se alinean en línea recta, lo que permite a la luz pasar por ellas. Al inactivar el campo las partículas vuelven a tomar su orientación aleatoria y bloquean la luz. (*Cortesía de Switchlite Privacy Glass®, Saint-Gobian Glass Exprover.*)

Objetivos

Cuando termine de estudiar este capítulo el alumno:

1. Definirá el *campo eléctrico* y explicará qué factores determinan su magnitud y su dirección.
2. Escribirá y aplicará una expresión que relacione la intensidad del campo eléctrico en un punto con la(s) distancia(s) de la(s) carga(s) conocida(s).
3. Explicará e ilustrará el concepto de líneas del campo eléctrico y analizará las dos reglas que deben seguirse para construirlas.
4. Explicará el concepto de *permitividad* de un *medio* y cómo afecta la intensidad del campo y la construcción de líneas del campo.
5. Escribirá y aplicará la *ley de Gauss* a los campos eléctricos que se forman alrededor de las superficies cuya densidad de carga es conocida.

En nuestro estudio de la mecánica analizamos con profundidad la fuerza y el movimiento. Las leyes de Newton sobre el movimiento se usaron, en general, para describir la aplicación y las consecuencias de fuerzas por *contacto*. Un momento de reflexión sobre el universo como un todo nos convence de la enorme cantidad de objetos que *no* están en contacto.

Los proyectiles experimentan una fuerza hacia abajo que no puede ser explicada en términos de su interacción con partículas de aire; los planetas giran continuamente por el vacío que rodea al Sol; el mismo Sol es arrastrado a lo largo de una trayectoria elíptica por fuerzas que no hacen contacto con él. Incluso en el nivel atómico no hay "cuerdas" que mantengan a los electrones en sus órbitas alrededor del núcleo.

Si en realidad deseamos comprender nuestro universo debemos desarrollar leyes para predecir la magnitud y la dirección de las fuerzas que no se transmiten por contacto. Ya hemos estudiado dos de esas leyes:

1. Ley de Newton de la gravitación universal:

$$F_g = G\frac{m_1 m_2}{r^2} \tag{24.1}$$

2. Ley de Coulomb para fuerzas electrostáticas:

$$F_e = k\frac{q_1 q_2}{r^2} \tag{24.2}$$

La ley de Newton predice la fuerza que existe entre dos masas separadas por una distancia *r;* la ley de Coulomb se refiere a la fuerza electrostática, como se estudió en el capítulo 23. Al aplicar ambas leyes conviene comprender ciertas propiedades del espacio que rodea las masas o las cargas.

24.1 Concepto de campo

FÍSICA HOY

Nuestro corazón utiliza un potencial eléctrico para que lata el músculo cardiaco, el cual bombea la sangre por todo el cuerpo. Este potencial crea un campo eléctrico, que puede ser vigilado por medio de un electrocardiograma (ECG).

Tanto el campo eléctrico como la fuerza gravitacional son ejemplos de *fuerzas de acción a distancia*, las cuales resultan extremadamente difíciles de visualizar. Para superar esta dificultad, los físicos de la antigüedad postularon la existencia de un material invisible, al que llamaron *éter*, que supuestamente llenaba todo el espacio. La fuerza de atracción gravitacional podía deberse entonces a esfuerzos en el éter causados por la presencia de diversas masas. Ciertos experimentos de óptica han demostrado que la teoría del éter es insostenible, lo que nos ha obligado a considerar si el espacio en sí mismo tiene propiedades interesantes para el físico.

Se puede afirmar que la sola presencia de una masa altera el espacio que la rodea, y de ese modo produce una fuerza gravitacional sobre otra masa cercana. Esta alteración en el espacio se describe mediante la introducción del concepto de un *campo gravitacional* que rodea a todas las masas. Se puede decir que ese tipo de campo existe en cualquier región del espacio donde una masa de prueba experimentará una fuerza gravitacional. La intensidad del campo en cualquier punto sería proporcional a la fuerza que experimenta una masa dada en ese punto. Por ejemplo, en cada punto en la proximidad de la Tierra, el campo gravitacional podría representarse cuantitativamente con

$$\mathbf{g} = \frac{\mathbf{F}}{m} \tag{24.3}$$

donde $\mathbf{g}$ = aceleración debida a la fuerza de gravedad
$\mathbf{F}$ = fuerza gravitacional
m = masa de prueba (véase la figura 24.1)

Si $\mathbf{g}$ se conoce en cada punto sobre la Tierra, la fuerza $\mathbf{F}$ que actuará sobre una masa m dada, situada en ese punto, puede determinarse con la ecuación (24.3).

Es posible aplicar, asimismo, el concepto de campo a los objetos cargados eléctricamente. El espacio que rodea a un objeto cargado se altera en presencia de la carga. Podemos postular la existencia de un ***campo eléctrico*** en este espacio.

Se dice que existe un campo eléctrico en una región de espacio en la que una carga eléctrica experimenta una fuerza eléctrica.

Esta definición proporciona una prueba de la existencia de un campo eléctrico. Basta colocar una carga en ese punto. Si se observa una fuerza eléctrica, existe un campo eléctrico en ese punto.

Del mismo modo que la fuerza por unidad de masa constituye una definición cuantitativa de un campo gravitacional, la intensidad de un campo eléctrico puede representarse mediante el concepto de fuerza por unidad de carga. La intensidad del campo eléctrico $\mathbf{E}$ en un punto se suele definir en términos de la fuerza $\mathbf{F}$ que experimenta una carga positiva pequeña $+q$

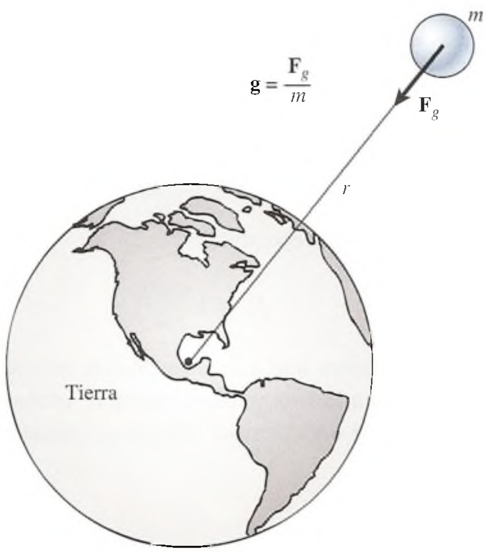


Figura 24.1 El campo gravitacional en cualquier punto sobre la Tierra puede representarse mediante la aceleración **g** que una pequeña masa m experimentaría si nos colocáramos en ese punto.

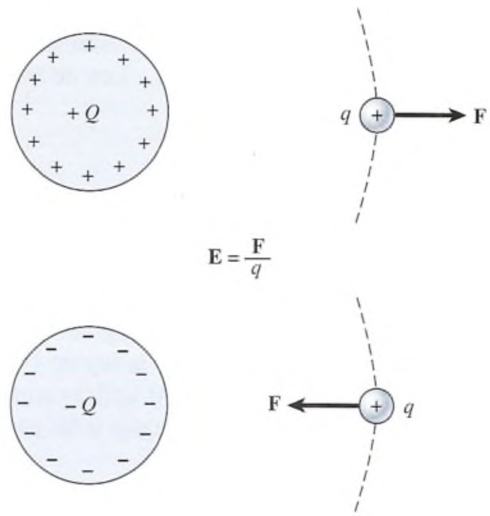


Figura 24.2 La dirección de la intensidad del campo eléctrico en un punto es la misma que la dirección en que una carga positiva $+q$ se movería cuando fuera colocada en ese punto. Su magnitud es la fuerza por unidad de carga (F/q).

cuando está colocada precisamente en ese punto (véase la figura 24.2). La magnitud de la intensidad del campo eléctrico está dada por

$$E = \frac{F}{q} \tag{24.4}$$

En el sistema métrico, una unidad de ***intensidad del campo eléctrico*** es el newton por coulomb (N/C). La utilidad de esta definición radica en que si se conoce el campo en un punto dado, podemos predecir la fuerza que actuará sobre cualquier carga situada en ese punto.

Puesto que la intensidad del campo eléctrico se define en términos de una carga *positiva*, su dirección en un punto cualquiera es la misma que correspondería a la fuerza electrostática sobre una carga positiva en ese mismo punto.

> La dirección de la intensidad del campo eléctrico **E** en un punto en el espacio es la misma que la dirección en la que una carga positiva se movería si se colocara en ese punto.

Sobre esta base, el campo eléctrico en la vecindad de una carga positiva $+Q$ sería hacia afuera, o alejándose de la carga, como se indica en la figura 24.3a. En la proximidad de una carga negativa $-Q$, la dirección del campo sería hacia dentro, o acercándose a la carga (figura 24.3b).

Cabe recordar que la intensidad del campo eléctrico es una propiedad asignada al *espacio* que rodea a un cuerpo cargado. Alrededor de la Tierra existe un campo gravitacional, haya o no una masa colocada sobre ella. De forma similar, alrededor de un cuerpo cargado existe un campo eléctrico, haya o no una segunda carga localizada en el campo. Si una carga *se coloca* en el campo, experimentará una fuerza **F** dada por

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} \tag{24.5}$$

donde **E** = intensidad del campo
q = magnitud de la carga colocada en el campo

Si q es positiva, **E** y **F** tendrán la misma dirección; si q es negativa, la fuerza **F** estará en dirección opuesta al campo **E**.

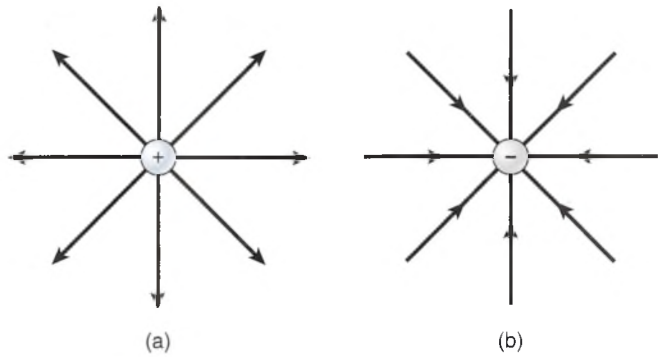


Figura 24.3 (a) El campo en la proximidad de una carga positiva tiene una dirección radial hacia fuera en cualquier punto. (b) El campo se dirige hacia dentro o hacia una carga negativa.

Ejemplo 24.1

La intensidad del campo eléctrico entre dos placas en la figura 24.4 es constante y está dirigida hacia abajo. La magnitud de la intensidad del campo eléctrico es 6×10^4 N/C. ¿Cuáles son la magnitud y la dirección de la fuerza eléctrica ejercida sobre un electrón proyectado horizontalmente entre las dos placas?

Plan: La dirección de la intensidad del campo **E** se define en términos de la fuerza sobre una carga de prueba positiva. La carga sobre un electrón es *negativa* ($q_e = -1.6 \times 10^{-19}$ C), lo que implica que la fuerza sobre el electrón es *hacia arriba* (opuesta a la dirección del campo). La intensidad del campo es la fuerza por unidad de carga, de modo que la magnitud de la fuerza será el producto q_eE.

Solución: Con base en la ecuación (24.5), la fuerza es

$$F = q_eE = (1.6 \times 10^{-19}\ \text{C})(6 \times 10^4\ \text{N/C})$$
$$= 9.6 \times 10^{-15}\ \text{N} \quad (\textit{hacia arriba})$$

Recuerde que se usa el valor absoluto de la carga. La *dirección* de la fuerza **F** sobre una carga positiva es la misma que la dirección de la intensidad del campo **E**; la fuerza sobre una carga negativa es *opuesta* al campo.

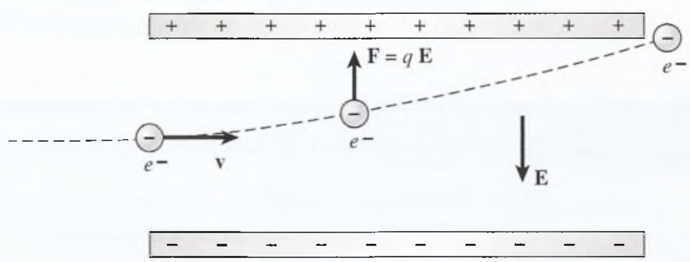


Figura 24.4 Un electrón proyectado en un campo eléctrico de intensidad constante.

Ejemplo 24.2

Puesto que la masa de un electrón es igual a 9.1×10^{-31} kg, demuestre que la fuerza gravitacional sobre el electrón del ejemplo 24.1 puede ser despreciada.

Plan: La fuerza gravitacional es *hacia abajo* y se debe al peso ($W = mg$) del electrón. Para determinar el efecto que esto tendrá en el movimiento del electrón debemos mirar si el peso es significante en comparación con la magnitud de la fuerza del campo eléctrico.

Solución: El peso equivale al producto de la masa del electrón por la gravedad

$$W = mg = (9.1 \times 10^{-31}\ \text{kg})(9.8\ \text{m/s}^2)$$
$$W = 8.92 \times 10^{-30}\ \text{N}$$

La fuerza eléctrica es mayor que la fuerza gravitacional por un factor de 1.08×10^{15} y sin duda puede despreciarse en este caso.

24.2 Cálculo de la intensidad del campo eléctrico

Hemos analizado un método para medir la magnitud de la intensidad del campo eléctrico en un punto en el espacio. Se coloca una carga conocida en ese punto y se mide la fuerza resultante. De este modo, la fuerza por unidad de carga es una medida de la intensidad del campo eléctrico en ese punto. La desventaja de este método es que no parece tener una relación clara con la carga Q que crea el campo. Mediante la experimentación se demuestra rápidamente que la magnitud del campo eléctrico que rodea a un cuerpo cargado es directamente proporcional a la cantidad de carga del cuerpo. También se puede demostrar que en los puntos que se alejan cada vez más de la carga Q, una carga de prueba q experimentará fuerzas cada vez menores. La relación exacta se deduce de la ley de Coulomb.

Suponga que deseamos calcular la intensidad del campo E a una distancia r de una sola carga Q, como se muestra en la figura 24.5. La fuerza F que ejerce Q sobre la carga de prueba q en ese punto es, a partir de la ley de Coulomb,

$$F = \frac{kQq}{r^2} \qquad \textbf{(24.6)}$$

Sustituyendo este valor de F en la ecuación (24.4) se obtiene

$$E = \frac{F}{q} = \frac{kQq/r^2}{q}$$

$$E = \frac{kQ}{r^2} \qquad \textbf{(24.7)}$$

donde k es igual a $9 \times 10^9\ \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$. La dirección del campo se aleja de Q si Q es positiva y, viceversa, es hacia Q si Q es negativa. Ahora tenemos una relación que nos permite calcular la intensidad del campo en un punto sin necesidad de colocar una segunda carga en ese punto.

Ejemplo 24.3

¿Cuál es la intensidad del campo eléctrico a una distancia de 2 m de una carga de $-12\ \mu\text{C}$?

Plan: La carga Q es negativa, así que la dirección del campo será radialmente hacia dentro, hacia la carga. La magnitud se determina con la ecuación (24.7). Use unidades congruentes.

Solución: Al sustituir $r = 0.002$ m y $Q = 12 \times 10^{-6}$ C se obtiene

$$E = \frac{kQ}{r^2} = \frac{(9 \times 10^9\ \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)(12 \times 10^{-6}\ \text{C})}{(0.02\ \text{m})^2}$$
$$E = 2.70 \times 10^8\ \text{N/C, hacia } Q$$

Cuando más de una carga contribuye al campo, como en la figura 24.6, el campo resultante es la suma vectorial de las contribuciones de cada carga consideradas independientemente.

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_3 + \ldots \qquad \textit{Suma vectorial} \qquad \textbf{(24.8)}$$

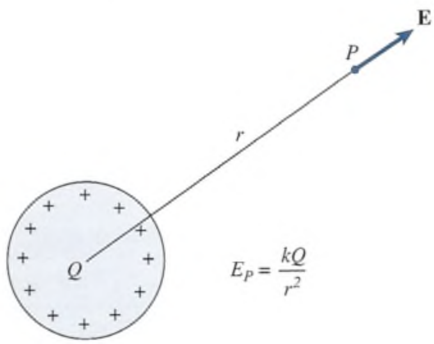


Figura 24.5 Cálculo de la intensidad del campo eléctrico a una distancia r del centro de una sola carga Q.

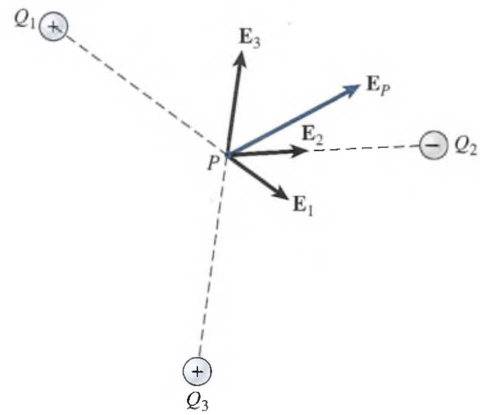


Figura 24.6 El campo en la proximidad de varias cargas es igual a la suma vectorial de los campos debido a las cargas individuales.

La dirección de cada campo se determina considerando la fuerza que experimentaría una carga de prueba positiva en el punto de que se trata; por su parte, la magnitud del campo se halla con la ecuación (24.7). La intensidad eléctrica resultante se calcula entonces mediante el método de componentes de la suma de vectores.

Ejemplo 24.4

Dos cargas puntuales, $q_1 = -6$ nC y $q_2 = +8$ nC, están separadas por una distancia de 12 cm, como se muestra en la figura 24.7. A partir de los datos indicados en esta figura, determine el campo eléctrico (a) en el punto A y (b) en el punto B.

Plan: La intensidad del campo eléctrico es una propiedad del *espacio*. En este ejemplo no hay carga en el punto A ni en el B. Para determinar la dirección del campo en cualquiera de esos puntos debemos imaginar que una pequeña carga positiva de prueba es colocada en el punto y luego convenir que el campo tiene la misma dirección que la fuerza sobre esa carga de prueba. Con base en la figura, se advierte que el campo $\mathbf{E}_1$ en el punto A debido a la carga de -6nC se dirige a la izquierda y que el campo $\mathbf{E}_2$ debido a la carga de $+8$ nC tiene también tal dirección. En ambos casos, ésta es la forma en que se movería una carga de prueba positiva si se colocase en el punto A. La magnitud de cada campo se obtiene al aplicar la ecuación (24.7) y la suma vectorial producirá la intensidad del campo resultante en A. Un razonamiento similar dará el campo en el punto B. Sin embargo, los cálculos son más complejos debido al ángulo de 37° para el vector $\mathbf{E}_2$.

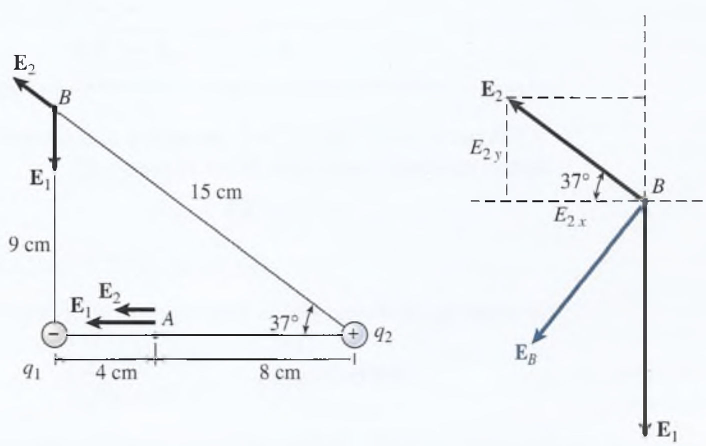


Figura 24.7

Solución (a): El campo $\mathbf{E}_1$ en el punto A debido a q_1 tiene dirección a la *izquierda*. Su magnitud es

$$E_1 = \frac{kq_1}{r_1^2} = \frac{(9 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2})(6 \times 10^{-9}\ \mathrm{C})}{(0.04\ \mathrm{m})^2}$$
$$= 3.38 \times 10^4\ \mathrm{N/C},\ \text{a la izquierda}$$

Recuerde que el signo de la carga determina la dirección del campo que el signo negativo no se usa al calcular la *magnitud* del campo.

El campo eléctrico $\mathbf{E}_2$ en el punto A debido a q_2 se dirige a la *izquierda* y es igual a

$$E_2 = \frac{kq_2}{r_2^2} = \frac{(9 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2})(8 \times 10^{-9}\ \mathrm{C})}{(0.08\ \mathrm{m})^2}$$
$$= 1.12 \times 10^4\ \mathrm{N/C},\ \text{a la izquierda}$$

Puesto que los dos vectores, $\mathbf{E}_1$ y $\mathbf{E}_2$, tienen la misma dirección a la izquierda, el vector resultante es la simple suma de sus magnitudes. Si consideramos negativa la dirección a la izquierda se tiene que

$$\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 = -3.38 \times 10^4\ \mathrm{N/C} - 1.12 \times 10^4\ \mathrm{N/C}$$
$$= -4.50 \times 10^4\ \mathrm{N/C}\ \text{(con dirección a la izquierda)}$$

Solución (b): La intensidad del campo $\mathbf{E}_1$ en B debida a q_1 se dirige *hacia abajo* y es igual a

$$E_1 = \frac{kq_1}{r_1^2} = \frac{(9 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2})(6 \times 10^{-9}\ \mathrm{C})}{(0.09\ \mathrm{m})^2}$$
$$= 6.67 \times 10^3\ \mathrm{N/C},\ \text{hacia abajo}$$

El campo $\mathbf{E}_2$ en B debido a q_2 se *aleja* de q_2 en un ángulo de 37° N del O y está dado por

$$E_2 = \frac{kq_2}{r_2^2} = \frac{(9 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2})(8 \times 10^{-9}\ \mathrm{C})}{(0.15\ \mathrm{m})^2}$$
$$= 3.20 \times 10^3\ \mathrm{N/C},\ 37°\ \text{N del O}$$

En la tabla 24.1 se enumeran los componentes empleados para determinar el campo resultante en el punto B.

Tabla 24.1

Vector	Ángulo ϕ_x	Componente en x	Componente en y
$E_1 = 6.67$ kN/C	90°	$E_{1x} = 0$	$E_{1y} = -6.67$ kN/C
$E_2 = 3.20$ kN/C	37°	$E_{2x} = -(3.20\ \text{kN/C})\cos 37° = -2.56$ kN/C	$E_{2y} = (3.20\ \text{kN/C})\ \text{sen}\ 37° = 1.93$ kN/C
E	θ	$E_x = \Sigma E_x = -2.56$ kN/C	$E_y = \Sigma E_y = -4.74$ kN/C

A partir de la figura 24.7, se aplica el teorema de Pitágoras para hallar la magnitud del campo eléctrico resultante $\mathbf{E}$ en el punto B.

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$$
$$= \sqrt{(2.56\ \mathrm{kN/C})^2 + (4.74\ \mathrm{kN/C})^2} = 5.39\ \mathrm{kN/C}$$

En seguida, la dirección se determina con la función tangente

$$\tan\phi = \left|\frac{E_y}{E_x}\right| = \left|\frac{4.74\ \mathrm{kN/C}}{2.56\ \mathrm{kN/C}}\right| \qquad \text{y} \qquad \phi = 61.6°\ \text{al S del O}$$

Por consiguiente, la intensidad del campo eléctrico que resulta en el punto B es de 5.39 kN/C con dirección 61.6° al S del O.

Estrategia para resolver problemas

Campos eléctricos

1. Lea el problema, luego trace una figura y escriba en ella las leyendas pertinentes. Indique las cargas positivas y negativas a lo largo de las distancias dadas. Las cargas deber expresarse en *coulombs* y las distancias en *metros*. Recuerde que 1 μC = 1×10^{-6} C y 1 nC = 1×10^{-9} C.
2. Recuerde que el campo eléctrico **E** es una propiedad del *espacio* que nos permite determinar la fuerza **F** que una carga unitaria positiva q experimentaría *si* estuviera colocada en un punto determinado del espacio. El campo existe en un *punto* en el espacio independientemente de si esa carga está colocada o no en ese punto.
3. La magnitud del campo eléctrico debido a una sola carga está dada por:

$$E = \frac{kQ}{r^2} \qquad k = 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$$

4. Como se estudió para las fuerzas, debe tenerse cuidado de no confundir la naturaleza de una carga (+ o −) con el signo asignado a los campos eléctricos o a sus componentes. La dirección del campo **E** en un punto determinado coincide con la dirección en la que se movería una carga de prueba *positiva* si se le colocara en ese punto.
5. El *campo eléctrico resultante* debido a cierto número de cargas se determina mediante la suma vectorial de los campos eléctricos debidos a cada carga considerada en forma independiente. Construya un diagrama de cuerpo libre y realice la suma vectorial por el método de las componentes.

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_3 + \ldots \qquad \textit{Suma vectorial}$$

24.3 Líneas del campo eléctrico

En sus primeras investigaciones sobre el electromagnetismo, Michael Faraday (1791-1867) desarrolló un ingenioso sistema para observar los campos eléctricos, el cual consiste en representar tanto la intensidad como la dirección de un campo mediante líneas imaginarias denominadas ***líneas del campo eléctrico***.

> Las líneas del campo eléctrico son líneas imaginarias trazadas de tal manera que su dirección en cualquier punto es la misma que la dirección del campo eléctrico en ese punto.

Por ejemplo, las líneas trazadas radialmente hacia fuera de la carga positiva en la figura 24.3a representan la dirección del campo en cualquier punto sobre la línea. Las líneas eléctricas próximas a una carga negativa tendrían una forma radial hacia dentro y estarían dirigidas hacia la carga, como se advierte en la figura 24-3b. Después veremos que la densidad de estas líneas en cualquier región del espacio es una medida de la *magnitud* de la intensidad del campo en esa región.

En general, la dirección del campo eléctrico en una región del espacio varía de un lugar a otro; por tanto, normalmente las líneas eléctricas son curvas. Por ejemplo, consideremos la construcción de una línea del campo eléctrico en la región situada entre una carga positiva y una negativa, como se ilustra en la figura 24.8.

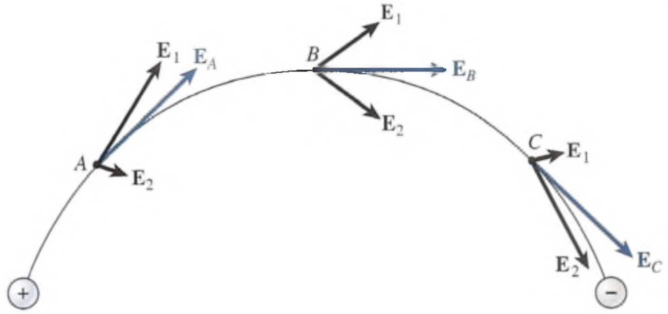


Figura 24.8 La dirección de una línea del campo eléctrico es la misma que la dirección de la intensidad del campo eléctrico resultante en ese punto.

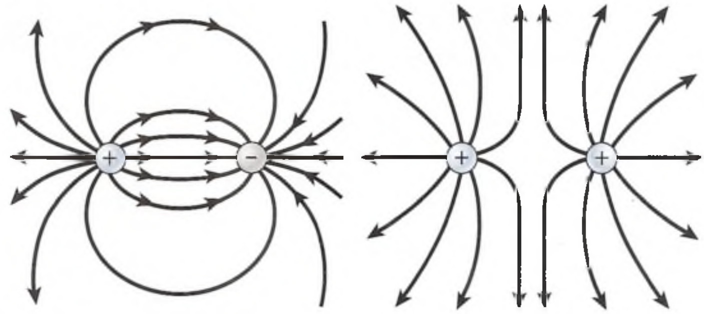


Figura 24.9 (a) Diagrama de las líneas del campo eléctrico en la región que rodea dos cargas opuestas. (b) Las líneas del campo entre dos cargas positivas.

La dirección de la línea del campo eléctrico en cualquier punto es la misma que la del vector resultante del campo eléctrico en ese punto. Deben seguirse dos reglas al construir líneas del campo eléctrico:

1. La dirección de la línea del campo en cualquier punto es la misma que la dirección en la que se movería una carga positiva si estuviera colocada en ese punto.
2. La separación entre las líneas del campo debe ser tal que estén más cercanas cuando el campo sea fuerte y más alejadas cuando el campo sea débil.

Siguiendo estas reglas generales es posible construir líneas del campo eléctrico para los dos casos comunes representados en la figura 24.9. Como consecuencia de la forma en que se trazan las líneas eléctricas *siempre saldrán cargas positivas y entrarán cargas negativas*. Ninguna línea puede originarse o terminar en el espacio, aunque un extremo de una línea eléctrica puede extenderse hasta el infinito.

24.4 Ley de Gauss

Para cualquier distribución de carga podemos dibujar un número infinito de líneas eléctricas. Es claro que si la separación entre las líneas será una indicación estándar de la intensidad del campo, debemos establecer un límite al número de líneas trazadas para cada situación. Por ejemplo, consideremos las líneas del campo dirigidas radialmente hacia fuera a partir de una carga puntual positiva (véase la figura 24.10). Usaremos la letra N para representar el número de líneas trazadas. Ahora imaginemos que una superficie esférica rodea la carga puntual a una distancia r de la carga. La intensidad del campo en cualquier punto de una esfera así estaría dada por

$$E = \frac{kq}{r^2} \tag{24.9}$$

Figura 24.10 La intensidad del campo eléctrico a una distancia r de las cargas puntuales es directamente proporcional al número de líneas ΔN que penetran por unidad ΔA de una superficie esférica construida en esa distancia.

Partiendo de la forma en que se trazan las líneas del campo también podemos decir que el campo en una pequeña porción de su área ΔA es proporcional al número de líneas ΔN que penetran en esa área. En otras palabras, la densidad de líneas del campo (líneas por unidad de área) es directamente proporcional a la intensidad del campo. Simbólicamente,

$$\frac{\Delta N}{\Delta A} \propto E_n \tag{24.10}$$

El subíndice n indica que el campo es normal al área superficial en todas partes. Esta proporcionalidad siempre es válida, independientemente del número total de líneas N que se pueden trazar. Sin embargo, una vez que se elige una constante de proporcionalidad para la ecuación (24-10), se establece automáticamente un límite para el número de líneas que pueden trazarse en cada situación. Se ha encontrado que la elección más conveniente para esta constante de espaciamiento es ϵ_0. Esto se conoce como ***permitividad del espacio libre*** y se define mediante la expresión

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8.85 \times 10^{-12}\ \mathrm{C^2/(N \cdot m^2)} \tag{24.11}$$

donde $k = 9 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2}$ de la ley de Coulomb. Entonces, la ecuación (24.10) puede escribirse como

$$\frac{\Delta N}{\Delta A} = \epsilon_0 E_n \tag{24.12}$$

o bien

$$\Delta N = \epsilon_0 E_n \Delta A \tag{24.13}$$

Cuando E_n es constante por toda la superficie, el número total de líneas que se dirigen radialmente hacia fuera de la carga encerrada es

$$N = \epsilon_0 E_n A \tag{24.14}$$

Se puede notar que la elección de ϵ_0 es conveniente sustituyendo la ecuación (24.11) en la ecuación (24.9):

$$E_n = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{q}{r^2}$$

Sustituyendo esta expresión en la ecuación (24.14) y recordando que el área de una superficie esférica es $A = 4\pi r^2$ se obtiene

$$\begin{aligned} N &= \epsilon_0 E_n A \\ &= \frac{\epsilon_0}{4\pi\epsilon_0}\frac{q}{r^2}(4\pi r^2) = q \end{aligned}$$

La elección de ϵ_0 como la constante de proporcionalidad ha dado por resultado que *el número total de líneas que pasan normalmente a través de una superficie es numéricamente igual a la carga contenida dentro de la superficie.* Aunque este resultado se obtuvo usando una superficie esférica, se aplicará a cualquier otra superficie. El planteamiento más general de ese resultado se conoce como ***ley de Gauss:***

> El número total de líneas de fuerza eléctricas que cruzan cualquier superficie cerrada en dirección hacia fuera es numéricamente igual a la carga neta total contenida dentro de esa superficie.

$$N = \sum \epsilon_0 E_n A = \sum q \qquad \textit{Ley de Gauss} \tag{24-15}$$

La ley de Gauss se utiliza para calcular la intensidad del campo cerca de las superficies de carga. Esto representa una clara ventaja sobre los métodos desarrollados anteriormente debido a que las ecuaciones anteriores se aplican sólo a cargas puntuales. La mejor forma de entender la aplicación de la ley de Gauss es mediante ejemplos.

24.5 Aplicaciones de la ley de Gauss

Puesto que la mayor parte de los conductores cargados tienen grandes cantidades de carga sobre ellos, no resulta práctico considerar las cargas en forma individual. Generalmente se habla de la ***densidad de carga*** σ, definida como la carga por unidad de área superficial.

$$\sigma = \frac{q}{A} \qquad q = \sigma A \qquad \textit{Densidad de carga} \qquad \textbf{(24-16)}$$

Ejemplo 24.5

Calcule cuál es la intensidad del campo eléctrico a una distancia r de una placa infinita de carga positiva, como se representa en la figura 24.11.

Plan: El propósito de aplicar la ley de Gauss es hallar una expresión que relacione el campo eléctrico con la densidad de carga σ. La aplicación de la ley de Gauss suele precisar la elaboración de una superficie geométrica imaginaria que recibe el nombre de ***superficie gaussiana***. La idea es encerrar una carga neta dentro de una superficie cuya geometría es de una simpleza tal que es posible determinar su área sin ningún problema. La elección de una superficie imaginaria está dictada por la forma del cuerpo cargado. En este ejemplo, una elección inteligente es una superficie cilíndrica que penetre en la placa de carga positiva de forma que se proyecte a una distancia r en cualquier lado de la placa. La carga total Σq encerrada por esta superficie debe equivaler a $\Sigma\epsilon_0 EA$ de acuerdo con la ley de Gauss, y usaremos este hecho para determinar una expresión para la intensidad el campo eléctrico a la distancia igual a r.

Solución: Puesto que el diámetro del cilindro es arbitrario, nos será práctico trabajar con la densidad de carga σ como la define la ecuación (24.16). El área A de cada extremo del cilindro es la misma que el área recortada sobre la placa de carga; por tanto, la carga total contenida dentro del cilindro está dada por

$$\sum q = \sigma A$$

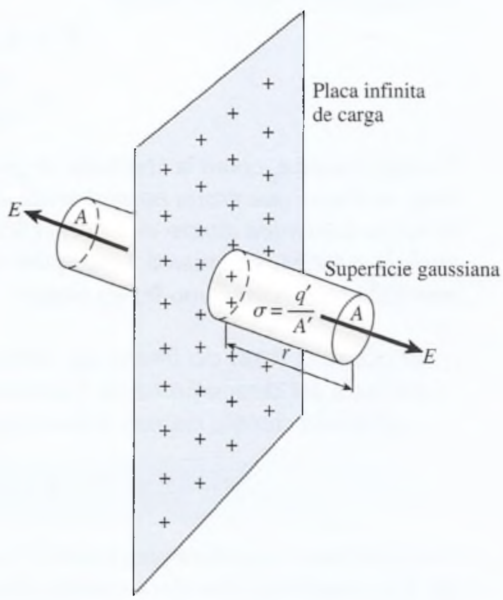


Figura 24.11 Cálculo del campo fuera de una placa infinita de carga positiva.

Debido a la simetría de la placa de carga, la intensidad del campo resultante **E** debe tener una dirección perpendicular a la placa en cualquier punto cercano a ella. Sólo hay que considerar las líneas de intensidad que pasan perpendiculares a las dos superficies de área *A*. Con base en la ley de Gauss podemos escribir

$$\sum \epsilon_0 EA = \sum q$$
$$\epsilon_0 EA + \epsilon_0 EA = \sigma A$$
$$2\epsilon_0 EA = \sigma A$$
$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \qquad \textbf{(24.17)}$$

Observe que la intensidad del campo **E** se aleja de la placa en ambos lados y es independiente de la distancia *r* a la placa.

Antes de suponer que el ejemplo de una placa de carga infinita es poco práctico, debe señalarse que el término *infinito*, en un sentido práctico, implica únicamente que las dimensiones de la placa exceden el punto de interacción eléctrica. En otras palabras, la ecuación (24.17) se aplica cuando el largo y el ancho de la placa son muy grandes en comparación con la distancia *r* a la placa.

Ejemplo 24.6

Demuestre, utilizando la ley de Gauss, que todo el exceso de carga se halla sobre la superficie de un conductor cargado.

Plan: Primero trazaremos una figura que represente un conductor cargado arbitrario, como el que se muestra en la figura 24.12. Dentro de un conductor así, las cargas tienen libertad de movimiento si experimentan una fuerza resultante. Puesto que cargas como éstas se repelen, podemos suponer con certeza que todas las cargas libres en un conductor llegarán tarde o temprano al reposo. En esta condición, la intensidad del campo eléctrico en el interior del conductor debe ser cero. Si no fuera así, las cargas se moverían. Luego construimos una superficie gaussiana dentro de la superficie del conductor, como aparece en la figura 24.12, y aplicamos la ley de Gauss.

Solución: Para demostrar que toda la carga se halla en la superficie escribimos

$$\sum \epsilon_0 EA = \sum q$$

Sustituyendo $E = 0$, encontramos también que $\Sigma q = 0$ o que ninguna carga está encerrada por esta superficie. Puesto que la superficie gaussiana puede dibujarse tan cerca del borde exterior del conductor como se quiera, concluimos que toda la carga reside sobre la superficie del conductor. Esta conclusión es válida, incluso si el conductor es hueco.

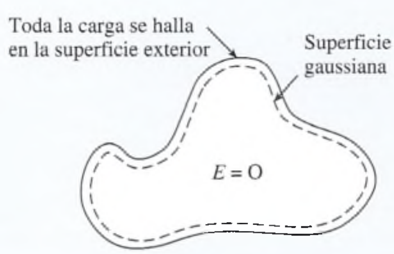


Figura 24.12 Con la ley de Gauss se demuestra que toda la carga se halla en la superficie de un conductor.

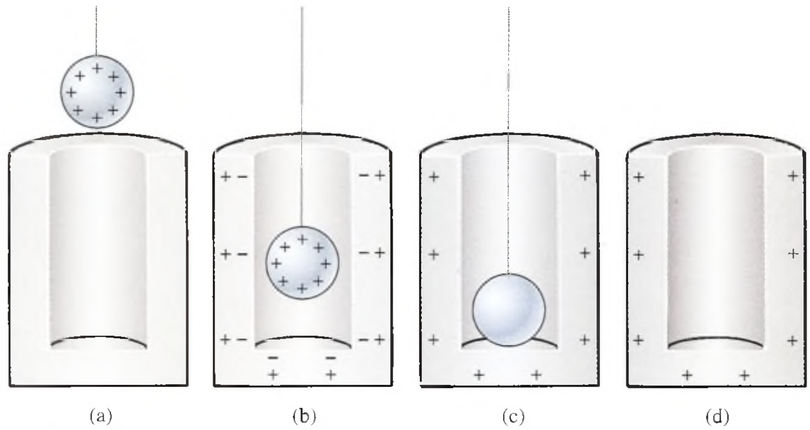


Figura 24.13 El experimento de Faraday demuestra la redistribución de la carga neta sobre las paredes del conductor metálico hueco.

Michael Faraday ideó un experimento interesante a fin de demostrar que la carga se halla en la superficie de un conductor hueco. En este experimento, una esfera cargada positivamente y sostenida con un hilo de seda se introduce en un conductor metálico hueco. Como se observa en la figura 24.13, se produce entonces una redistribución de carga sobre las paredes del conductor, atrayendo los electrones a la superficie interior. Cuando la esfera hace contacto con el fondo del conductor, la carga inducida se neutraliza y deja una carga positiva neta en la superficie exterior. Al realizar la prueba con el electroscopio se demostrará que ninguna carga reside en el interior del conductor y que la carga positiva neta permanece en la superficie exterior.

Ejemplo 24.7

Un *condensador* es un dispositivo electrostático que consta de dos conductores de área A separados por una distancia d (véase la figura 24.14). Si se colocan sobre los conductores cargas iguales y opuestas, habrá un campo eléctrico **E** entre ellos. Deduzca una expresión para calcular el campo eléctrico en términos de la densidad sobre las placas.

Plan: Se construye un cilindro gaussiano, como el que aparece en la figura 24.14, para la superficie interior de cualquier placa. No hay ningún campo en el interior de la placa conductora y la única área donde penetran las líneas del campo es la superficie A', que se proyecta hacia el espacio entre las placas. Podemos aplicar la ley de Gauss a cualquier placa para deducir una expresión para la intensidad el campo eléctrico.

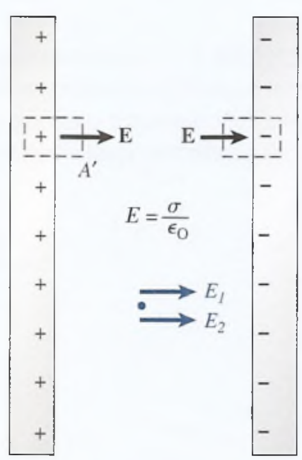


Figura 24.14 Campo eléctrico en la región que se halla entre dos placas con cargas opuestas e iguales a la razón de la densidad de carga σ a la permitividad ϵ_0.

Solución: Reconociendo que $\Sigma q = \sigma A'$ se resuelve para E como sigue:

$$\sum \epsilon_0 EA = \sum q$$
$$\epsilon_0 EA' = \sigma A'$$
$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad \textbf{(24.18)}$$

El mismo resultado se obtendría si se usara el cilindro gaussiano de la derecha. En ese caso, las líneas se dirigirían hacia dentro, lo que indicaría que la carga encerrada es *negativa*.

Observe que el campo entre las dos placas del ejemplo 24.7 es exactamente del doble que el campo debido a una placa delgada de carga, como lo indica la ecuación (24.17). Se puede entender esta relación si se considera que el campo **E** entre las placas es una superposición de los campos formados por la presencia de dos láminas con cargas opuestas.

$$E = E_1 + E_2 = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} + \frac{\sigma}{2\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

El campo $\mathbf{E}_1$ generado por la placa de carga positiva sigue la misma dirección que el campo $\mathbf{E}_2$ debido a la placa de carga negativa. En la *parte externa* de las dos placas a la izquierda o a la derecha $\mathbf{E}_1$ y $\mathbf{E}_2$ tienen una dirección opuesta y se calculan, lo que hace que la intensidad del campo resultante fuera de las placas sea igual a cero.

Resumen y repaso

Resumen

El concepto de campo eléctrico fue expuesto aquí para describir la región que rodea a una carga eléctrica. Su magnitud se determina por la fuerza que una carga unitaria experimentará en una posición específica y su dirección es la misma que la de la fuerza de una carga positiva en ese punto. Las líneas del campo eléctrico fueron postuladas para dar una imagen visual de los campos eléctricos, y la densidad de esas líneas del campo es un indicio de la intensidad del campo eléctrico. A continuación se resumen los principales conceptos que han de recordarse.

- Se dice que existe un *campo eléctrico* en una región del espacio en la que una carga eléctrica experimentará una fuerza eléctrica. La *magnitud* de la intensidad del campo eléctrico E está determinada por la fuerza F por unidad de carga q.

$$\boxed{E = \frac{F}{q} \qquad E = \frac{(9 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2})Q}{r^2}}$$

  La unidad métrica para la intensidad del campo eléctrico es el newton por coulomb (N/C). En la ecuación anterior r es la distancia que va de la carga Q al punto de que se trata.
- La intensidad del campo resultante en un punto ubicado en la proximidad de un número de cargas es la suma *vectorial* de las aportaciones que hacen todas las cargas.

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_3 + \cdots \qquad \boxed{E = \sum \frac{kQ}{r^2}}$$

Suma vectorial

  Cabe insistir en que en este caso se trata de una suma vectorial y no de una suma algebraica. Una vez determinados la magnitud y la dirección de cada vector, la resultante se encuentra a partir de la mecánica vectorial.
- La permitividad del espacio libre ϵ_0 es una constante fundamental que se define así:

$$\boxed{\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8.85 \times 10^{-12}\ \mathrm{C^2/N \cdot m^2}}$$

Permitividad

- La ley de Gauss establece que el número neto de líneas del campo eléctrico que cruza cualquier superficie cerrada en dirección hacia fuera es numéricamente igual a la carga total neta dentro de esa superficie.

$$\boxed{N = \sum \epsilon_0 E_n A = \sum q \qquad \textit{Ley de Gauss}}$$

- En las aplicaciones de la ley de Gauss, el concepto de densidad de carga σ como la carga q por unidad de área superficial A se utiliza con frecuencia:

$$\boxed{\sigma = \frac{q}{A} \qquad q = \sigma A \qquad \textit{Densidad de carga}}$$

Conceptos clave

campo eléctrico 480
densidad de carga 488
intensidad del campo eléctrico 480
ley de Gauss 487
líneas del campo eléctrico 485
permitividad ϵ_0 del espacio libre 487
superficie gaussiana 488

Preguntas de repaso

24.1. Algunos textos se refieren a las líneas del campo eléctrico como "líneas de fuerza". Comente si es conveniente esa descripción.

24.2. ¿Puede existir un campo eléctrico en una región del espacio donde una carga eléctrica no estaría sujeta a una fuerza? Explique su respuesta.

24.3. ¿Es necesario colocar una carga en un punto para que exista un campo eléctrico en ese punto? Explique su respuesta.

24.4. Con un procedimiento similar al aplicado para los campos eléctricos, demuestre que la aceleración gravitacional se puede calcular a partir de

$$g = \frac{GM}{r^2}$$

donde M = masa de la Tierra
r = distancia al centro de la Tierra

24.5. Comente las semejanzas entre los campos eléctricos y los gravitacionales. ¿En qué aspecto son diferentes?

24.6. En la ley de Gauss se eligió la constante ϵ_0 como el factor de proporcionalidad entre la densidad de línea y la intensidad del campo. En sentido teórico, ésta fue una elección acertada porque nos lleva a la conclusión de que el número total de líneas es igual a la carga allí contenida. ¿Resulta práctica esa elección para ilustrar gráficamente las líneas del campo? Según la relación de Gauss, ¿cuántas líneas del campo emanarían de una carga de 1 C?

24.7. Justifique el enunciado siguiente: La intensidad del campo eléctrico sobre la superficie de cualquier conductor cargado debe ir en dirección perpendicular a la superficie.

24.8. Las líneas del campo eléctrico nunca se cruzan entre sí. Explíquelo.

24.9. Supongamos que se conecta un electroscopio a la superficie exterior de una cubeta de hielo de Faraday. Muestre gráficamente qué sucederá con la hoja de oro en cada uno de los pasos ilustrados en la figura 24.13.

24.10. ¿Es posible que una línea del campo eléctrico empiece y termine en el mismo conductor? Comente su respuesta.

24.11. ¿Qué forma adoptaría la ley de Gauss si hubiéramos elegido k como constante de proporcionalidad en vez de la permitividad ϵ_0?

24.12. En la ley de Gauss, demuestre que las unidades de $\epsilon_0 EA$ son dimensionalmente equivalentes a las unidades de carga.

24.13. Demuestre que el campo en la región que está fuera de las dos placas paralelas en la figura 24.14 es igual a cero.

24.14. ¿Por qué la intensidad del campo es constante en la región comprendida entre dos placas cargadas con signo opuesto? Trace un diagrama vectorial del campo que corresponde a cada placa en diversos puntos entre las placas.

Problemas

Sección 24.1 El concepto de campo

24.1. Una carga de $+2\ \mu C$ colocada en un punto P en un campo eléctrico experimenta una fuerza descendente de 8×10^{-4} N. ¿Cuál es la intensidad del campo eléctrico en ese punto?

Resp. 400 N/C, hacia abajo

24.2. Una carga de -5 nC está colocada en el punto P del problema 24.1. ¿Cuáles son la magnitud y la dirección de la fuerza sobre la carga de -5 nC?

24.3. Una carga de $-3\ \mu C$ colocada en el punto A experimenta una fuerza descendente de 6×10^{-5} N. ¿Cuál es la intensidad del campo eléctrico en el punto A?

Resp. 20 N/C, hacia arriba

24.4. En un punto determinado, la intensidad del campo eléctrico es de 40 N/C en dirección al Este. Una carga desconocida recibe una fuerza hacia el Oeste de 5×10^{-5} N. ¿Cuál es la naturaleza y la magnitud de la carga?

24.5. ¿Cuáles son la magnitud y la dirección de la fuerza que actuaría sobre un electrón ($q = -1.6 \times 10^{-19}$ C) si éste se ubicara en (a) el punto P del problema 24.1?, ¿o (b) en el punto A del problema 24.3?

Resp. (a) 6.40×10^{-17} N, hacia arriba, (b) 3.20×10^{-18} N, hacia abajo

24.6. ¿Cuáles deben ser la magnitud y la dirección de la intensidad del campo eléctrico entre dos placas horizontales para producir una fuerza ascendente de 6×10^{-4} N sobre una carga de $+60\ \mu C$?

24.7. El campo eléctrico uniforme entre dos placas horizontales es 8×10^4 C. La placa superior está cargada positivamente y la inferior tiene una carga negativa equivalente. ¿Cuáles son la magnitud y la dirección de la fuerza eléctrica que actúa sobre un electrón que pasa horizontalmente a través de las placas?

Resp. 1.28×10^{-14} N, hacia arriba

24.8. Calcule la intensidad del campo eléctrico en un punto P, situado 6 mm a la izquierda de una carga de 8 μC. ¿Cuáles son la magnitud y la dirección de la fuerza ejercida sobre una carga de -2 nC colocada en el punto P?

24.9. Determine la intensidad del campo eléctrico en un punto P, situado 4 cm encima de una carga de $-12\ \mu C$. ¿Cuáles son la magnitud y la dirección de la fuerza ejercida sobre una carga de $+3$ nC ubicada en el punto P?

Resp. 6.75×10^7 N/C, hacia abajo, 0.2025 N, hacia abajo

Sección 24.2 Cálculo de la intensidad del campo eléctrico y Sección 24.3 Líneas del campo eléctrico

24.10. Calcule la intensidad del campo eléctrico en el punto medio de una recta de 70 mm que une a una carga de $-60\ \mu C$ con otra de $+40\ \mu C$.

24.11. Una carga de 8 nC se ubica 80 mm a la derecha de una carga de $+4$ nC. Determine la intensidad del campo en el punto medio de una recta que une las dos cargas. Resp. 2.25×10^4 N/C, a la izquierda

24.12. Calcule la intensidad del campo eléctrico en un punto colocado 30 mm a la derecha de una carga de 16 nC y 40 mm a la izquierda de una carga de 9 nC.

24.13. Dos cargas iguales de signos opuestos están separadas por una distancia horizontal de 60 mm. El campo eléctrico resultante en el punto medio de la recta es de 4×10^4 N/C. ¿Cuál es la magnitud de cada carga? Resp. 2 nC

***24.14.** Una carga de 20 μC está 4 cm arriba de una carga desconocida q. La intensidad eléctrica en un punto situado 1 cm arriba de la carga de 20 μC es de 2.20×10^9 N/C y se dirige hacia arriba. ¿Cuáles son la magnitud y el signo de la carga desconocida?

***24.15.** Una carga de $-20\ \mu C$ se halla 50 mm a la derecha de una carga de 49 μC. ¿Cuál es la intensidad del campo resultante en un punto situado 24 mm directamente arriba de la carga de $-20\ \mu C$?

Resp. 2.82×10^8 N/C, 297.3°

***24.16.** Dos cargas de $+12$ nC y $+18$ nC están separadas por una distancia horizontal de 28 mm. ¿Cuál es la intensidad del campo resultante en un punto ubicado a 20 mm de cada carga y arriba de la recta que une las dos cargas?

***24.17.** Una carga de $+4$ nC se sitúa a $x = 0$, y una carga de $+6$ nC se halla en $x = 4$ cm sobre un eje x. Encuentre el punto donde la intensidad del campo eléctrico resultante es igual a 0. Resp. $x = 1.80$ cm

Secciones 24.4 Ley de Gauss y 24.5 Aplicaciones de la ley de Gauss

24.18. Aplique la ley de Gauss para demostrar que el campo fuera de una esfera sólida cargada, a una distancia r de su centro, está dado por

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q}{r^2}$$

donde Q es la carga total sobre la esfera.

***24.19.** Una carga de $+5$ nC se halla sobre la superficie de una esfera metálica hueca cuyo radio es de 3 cm. Aplique la ley de Gauss para hallar la intensidad del campo eléctrico a una distancia de 1 cm de la superficie de la esfera. ¿Cuál es el campo eléctrico en un punto ubicado 1 cm dentro de la superficie?
Resp. 2.81×10^4 N/C, cero

***24.20.** Dos placas paralelas, ambas de 2 cm de ancho y 4 cm de largo, están colocadas verticalmente de modo que la intensidad del campo entre ambas es de 10 000 N/C hacia arriba. ¿Cuál es la carga en cada placa?

***24.21.** Una esfera de 8 cm de diámetro tiene una carga de 4 μC en su superficie. ¿Cuál es la intensidad del campo eléctrico en la superficie, 2 cm fuera de la superficie y 2 cm dentro de la superficie?
Resp. 2.25×10^7 N/C, 9.99×10^6 N/C, cero

Problemas adicionales

24.22. ¿A qué distancia de una carga puntual de 90 nC, la intensidad del campo será de 500 N/C?

24.23. Se ha determinado que la intensidad del campo eléctrico en un punto del espacio es de 5×10^5 N/C, en dirección al Oeste. ¿Cuáles son la magnitud y la dirección de la fuerza sobre una carga de -4 μC colocada en ese punto? Resp. 2 N, al Este

24.24. ¿Cuáles son la magnitud y la dirección de la fuerza sobre una partícula alfa ($q = +3.2 \times 10^{-19}$ C) que pasa a través de un campo eléctrico ascendente cuya intensidad es de 8×10^4 N/C?

24.25. ¿Cuál es la aceleración de un electrón ($e = -1.6 \times 10^{-19}$ C) colocado en un campo eléctrico descendente constante de 4×10^5 N/C? ¿Cuál es la fuerza gravitacional que actúa sobre esta carga si $m_e = 9.11 \times 10^{-31}$ kg?
Resp. 7.03×10^{16} m/s² N, 8.93×10^{-30} N

24.26. ¿Cuál es la intensidad del campo eléctrico en el punto medio de una recta de 40 mm entre una carga de 6 nC y otra de -9 nC? ¿Qué fuerza actuará sobre una carga de -2 nC colocada en el punto medio?

***24.27.** La densidad de carga en cada una de dos placas paralelas es de 4 μC/m². ¿Cuál es la intensidad del campo eléctrico entre las placas?
Resp. 4.52×10^5 N/C

***24.28.** Una carga de -2 nC se halla en $x = 0$ sobre el eje x. Una carga de $+8$ nC se sitúa en $x = 4$ cm. ¿En qué punto la intensidad del campo eléctrico será igual a 0?

***24.29.** Cargas de -2 y $+4$ μC se ubican en las esquinas de la base de un triángulo equilátero cuyos lados miden 10 cm. ¿Cuáles son la magnitud y la dirección de la intensidad del campo eléctrico en la esquina de arriba?
Resp. 3.12×10^6 N/C, 150°

24.30. ¿Cuáles son la magnitud y la dirección de la fuerza que actuaría sobre una carga de -2 μC colocada en el vértice superior del triángulo descrito en el problema 24.29?

***24.31.** Una partícula de 20 mg se encuentra en un campo descendente uniforme de 2000 N/C. ¿Cuántos electrones excedentes habrá que colocar sobre la partícula para que las fuerzas eléctrica y gravitacional se equilibren? Resp. 6.125×10^{11} electrones

***24.32.** Aplique la ley de Gauss para demostrar que la intensidad del campo eléctrico a una distancia R de una línea infinita de carga está dada por

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 R}$$

donde λ es la carga por unidad de longitud. Construya una superficie gaussiana como la de la figura 24.15.

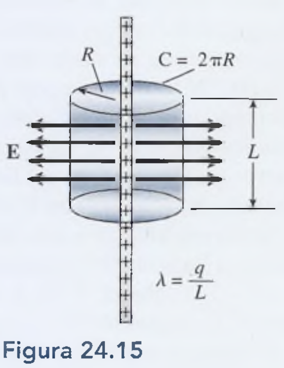


Figura 24.15

***24.33.** Use la ley de Gauss para demostrar que el campo junto a la parte exterior de cualquier conductor sólido está dado por

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

***24.34.** ¿Cuál es la intensidad del campo eléctrico a 2 cm de la superficie de una esfera de 20 cm de diámetro, que tiene una densidad de carga superficial de +8 nC/m^2?

***24.35.** Una esfera conductora uniformemente cargada tiene 24 cm de radio y una densidad de carga superficial de +16 $\mu C/m^2$. ¿Cuál es el número total de líneas de campo eléctrico que salen de esa esfera?
Resp. 1.16×10^{-5} líneas

***24.36.** Dos cargas de +16 μC y +8 μC están separadas 200 mm en el aire. ¿En qué punto de la recta que une las dos cargas tendrá el campo eléctrico un valor igual a cero?

***24.37.** Dos cargas de +8 nC y −5 nC están separadas 40 mm en el aire. ¿En qué punto de la recta que une las dos cargas la intensidad del campo eléctrico será igual a cero?
Resp. 151 mm fuera de la carga de −5 nC

Preguntas para la reflexión crítica

***24.38.** Dos cargas iguales y opuestas, $+q$ y $-q$, están colocadas en las esquinas de la base de un triángulo equilátero cuyos lados tienen una longitud a. Muestre que la magnitud de la intensidad del campo eléctrico en el vértice superior es la misma, con o sin la presencia de una de las cargas. ¿Cuál es el ángulo entre los dos campos producidos en esta forma?

***24.39.** ¿Cuáles son la magnitud y la dirección de la intensidad del campo eléctrico en el centro del cuadrado de la figura 24.16? Suponga que $q = 1$ μC y que $d = 4$ cm. Resp. 3.56×10^7 N, 153.4°

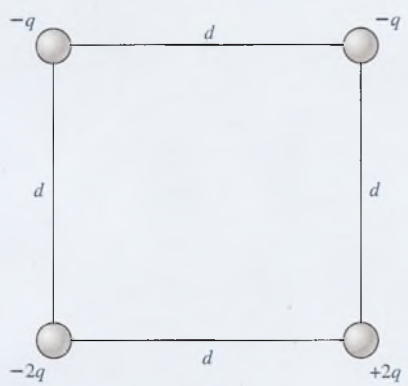


Figura 24.16

***24.40.** La intensidad del campo eléctrico entre las placas de la figura 24.17 es de 4000 N/C. ¿Cuál es la magnitud de la carga sobre la esfera de médula suspendida cuya masa es 3 mg? Resp. 4.24 nC

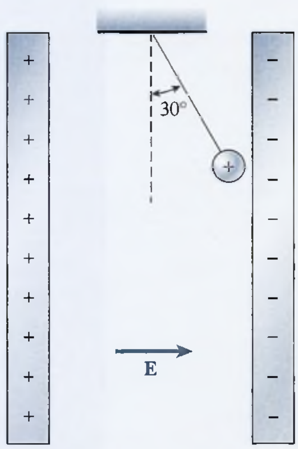


Figura 24.17

***24.41.** Dos esferas concéntricas tienen radios de 20 y 50 cm. La esfera interior tiene una carga negativa de −4 μC y la exterior una positiva de +6 μC. Aplique la ley de Gauss para hallar la intensidad del campo eléctrico a distancias de 40 y 60 cm del centro de las esferas.

***24.42.** La intensidad del campo eléctrico entre las dos placas de la figura 24.4 es de 2000 N/C. La longitud de las placas es de 4 cm y su separación es de 1 cm. Un electrón se proyecta hacia el campo desde la izquierda, con una velocidad horizontal de 2×10^7 m/s. ¿Cuál es la deflexión del electrón hacia arriba en el instante que sale de las placas?
Resp. 0.700 mm

25 Potencial eléctrico

Los generadores electrostáticos, como el generador de Van de Graff mostrado aquí, pueden transferir cantidades enormes de carga a un domo de plata. Estos dispositivos producen voltajes altísimos. La repulsión electrostática produce este efecto sorprendente en el cabello de la mujer. (© *Roger Ressmeyer/Corbis.*)

Objetivos

Cuando termine de estudiar este capítulo el alumno:

1. Demostrará mediante definiciones y ejemplos su comprensión de los conceptos de *energía potencial eléctrica*, *potencial eléctrico* y *diferencia de potencial eléctrico*.
2. Calculará la energía potencial de una carga conocida a una distancia determinada de otras cargas conocidas, y determinará si la energía es negativa o positiva.
3. Calculará el potencial absoluto en cualquier punto de la vecindad de cierto número de cargas conocidas.
4. Usará sus conocimientos sobre diferencia de potencial para calcular el trabajo necesario para mover una carga conocida desde un punto *A* hasta otro punto *B* en un campo eléctrico creado por una o varias cargas puntuales.
5. Escribirá y aplicará la relación entre la intensidad de campo eléctrico, la diferencia de potencial y la separación de placas paralelas de carga igual pero opuesta.

En nuestro estudio de la mecánica, muchos problemas se simplificaron mediante la introducción de algunos conceptos acerca de la energía. La conservación de la energía mecánica nos permitió predecir ciertas cosas acerca de los estados inicial y final de los sistemas, sin tener que analizar el movimiento entre dichos estados. El concepto de un cambio de energía potencial a cinética nos ahorró el problema de las fuerzas variables.

En electricidad se pueden resolver muchos problemas prácticos si se consideran los cambios que experimenta una carga en movimiento en términos de energía. Por ejemplo, si se requiere una cierta cantidad de trabajo para mover una carga en contra de ciertas fuerzas eléctricas, la carga tendrá un *potencial* o posibilidad de aportar una cantidad equivalente de energía cuando sea liberada. En este capítulo vamos a desarrollar la idea de la *energía potencial eléctrica.*

25.1 Energía potencial eléctrica

Una de las formas más apropiadas de entender el concepto de ***energía potencial eléctrica*** consiste en compararla con la energía potencial gravitacional. En el caso de la energía gravitacional, se considera que la masa m en la figura 25.1 se mueve del nivel *A* al nivel *B*. Debe aplicarse una fuerza externa **F** igual al peso $m\mathbf{g}$ para mover la masa en contra de la gravedad. El trabajo realizado por esta fuerza es el producto de mg por h. Cuando la masa m alcanza el nivel *B*, tiene un potencial para realizar trabajo en relación con el nivel *A*. El sistema tiene *energía potencial* (*EP*) que es igual al trabajo realizado en contra de la gravedad.

$$EP = mgh$$

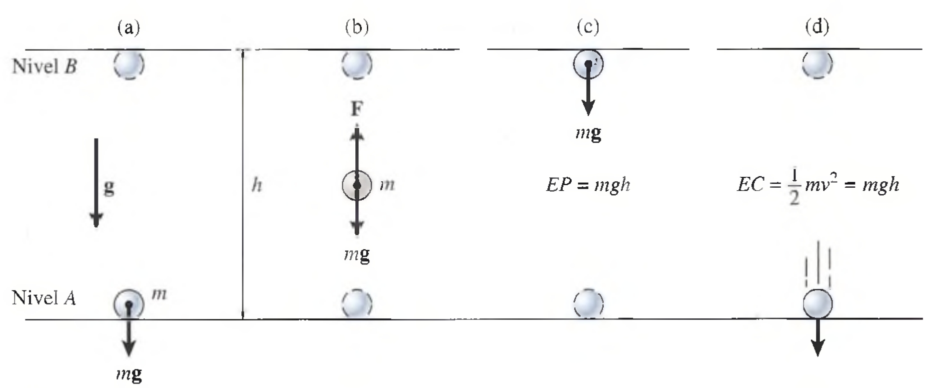


Figura 25.1 Una masa m se eleva contra el campo gravitacional **g**, lo que da por resultado una energía mgh en el nivel *B*. Cuando se suelta la masa, esta energía se transformará totalmente en energía cinética al ir cayendo hacia el nivel *A*.

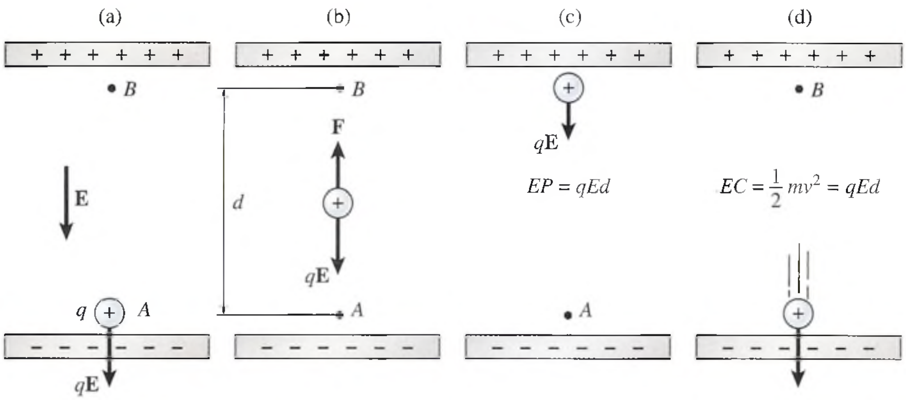


Figura 25.2 Una carga positiva $+q$ se desplaza en contra de un campo eléctrico constante **E** a través de una distancia d. En el punto B la energía potencial será qEd con respecto al punto A. Cuando se suelte, la carga ganará una cantidad equivalente de energía cinética.

FÍSICA HOY

La chispa da luz

En la parte central de un proyector cinematográfico hay un foco que trabaja bajo el mismo principio de un soldador de arco. La corriente directa fluye a través de dos electrodos separados por un vacío estrecho. Una enorme cantidad de luz y calor se produce. El calor se disipa por medio de varios ventiladores que soplan hacia el foco para evitar que explote. Los electrodos se alojan dentro del foco, el cual no contiene oxígeno sino un gas inerte de xenón a alta presión; esto impide que los electrodos se quemen.

Esta expresión representa el potencial para realizar trabajo que se libera cuando la masa m se suelta en el nivel B y desciende la distancia h. Por tanto, la magnitud de la energía potencial en B no depende de la trayectoria que siga la masa para llegar a ese nuevo nivel.

Ahora consideremos una carga positiva $+q$ que se encuentra en reposo en el punto A dentro de un campo eléctrico uniforme **E** constituido entre dos láminas con carga opuesta (véase la figura 25.2). Una fuerza eléctrica $q\mathbf{E}$ actúa hacia abajo sobre la carga. El trabajo realizado en contra del campo eléctrico para mover la carga desde A hasta B es igual al producto de la fuerza qE por la distancia d. Por consiguiente, la energía potencial eléctrica en el punto B en relación con el punto A es

$$EP = qEd \tag{25.1}$$

Cuando la carga se libera, el campo eléctrico desarrollará esta cantidad de trabajo y la carga q tendrá una energía cinética.

$$EC = \frac{1}{2}mv^2 = qEd$$

cuando retorna al punto A.

Las afirmaciones y las ecuaciones anteriores son válidas independientemente de la trayectoria que siga la carga al moverse. De hecho, se requiere realizar el mismo trabajo contra el campo gravitacional para deslizar una masa hacia arriba por un plano inclinado que si se eleva ésta verticalmente. En forma similar, la energía potencial debida a la carga $+q$ en el punto B es independiente de la trayectoria. Como muestra la figura 25.3, la energía potencial sería la misma si $+q$ se moviera a lo largo de la trayectoria L o de la trayectoria d. El único

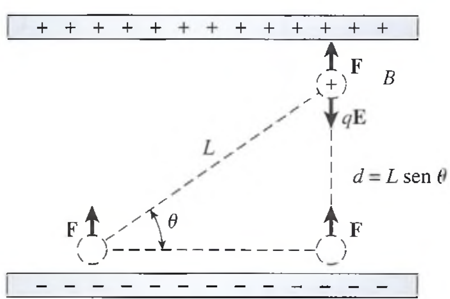


Figura 25.3 La energía potencial en B es independiente de la trayectoria seguida para llegar a B.

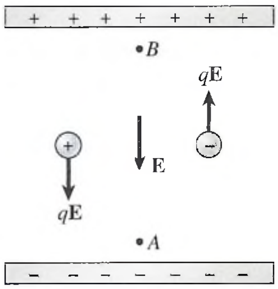


Figura 25.4 Una carga positiva incrementa su energía potencial cuando se desplaza del punto A al punto B; en cambio, una carga negativa *pierde* energía potencial cuando se desplaza de A a B.

trabajo que contribuye a la energía potencial es el trabajo realizado contra la fuerza del campo eléctrico $q\mathbf{E}$. La distancia efectiva que se recorre contra esta fuerza eléctrica descendente es

$$L \operatorname{sen} \theta = d$$

Por tanto, el trabajo es el mismo para cualquier trayectoria.

Antes de continuar, es preciso señalar una diferencia importante entre la energía potencial gravitacional y la energía potencial eléctrica. En el caso de la gravedad, sólo hay un tipo de masa, y las fuerzas implicadas son siempre fuerzas de atracción. Por tanto, una masa a gran altura siempre tiene una gran energía potencial con respecto a la Tierra. Esto no se cumple en el caso de la energía eléctrica, debido a la existencia de carga negativa. Por ejemplo, en la figura 25.4, una carga positiva tiene una mayor energía potencial en el punto B que en el punto A. Esto es cierto independientemente del punto de referencia elegido para medir la energía, ya que el trabajo se ha realizado en *contra* del campo eléctrico. Por otra parte, si una carga negativa se moviera del punto A al punto B, el trabajo sería realizado *por* el campo. Una carga negativa tendría una *menor* energía potencial en B, que es exactamente lo opuesto a la situación para la carga positiva.

> Siempre que una carga positiva se mueve en contra del campo eléctrico, la energía potencial aumenta, y siempre que una carga negativa se mueve en contra del campo eléctrico, la energía potencial disminuye.

La regla anterior es una consecuencia directa del hecho de que la dirección del campo eléctrico se defina en términos de una carga positiva.

25.2 Cálculo de la energía potencial

Si se considera el espacio entre dos placas con carga opuesta, los cálculos para determinar el trabajo se simplifican en forma considerable, ya que el campo eléctrico es uniforme. La fuerza eléctrica que experimenta una carga es constante mientras permanezca entre las placas. Sin embargo, por lo general el campo no será constante y debemos tener en cuenta que la fuerza varía. Por ejemplo, considere el campo eléctrico en la vecindad de una carga positiva Q, como muestra la figura 25.5. El campo se dirige en forma radial hacia afuera, y su intensidad disminuye inversamente con el cuadrado de la distancia que hay desde el centro de la carga. El campo en los puntos A y B es

$$E_A = \frac{kQ}{r_A^2} \qquad E_B = \frac{kQ}{r_B^2}$$

donde r_A y r_B son las distancias respectivas a los puntos A y B.

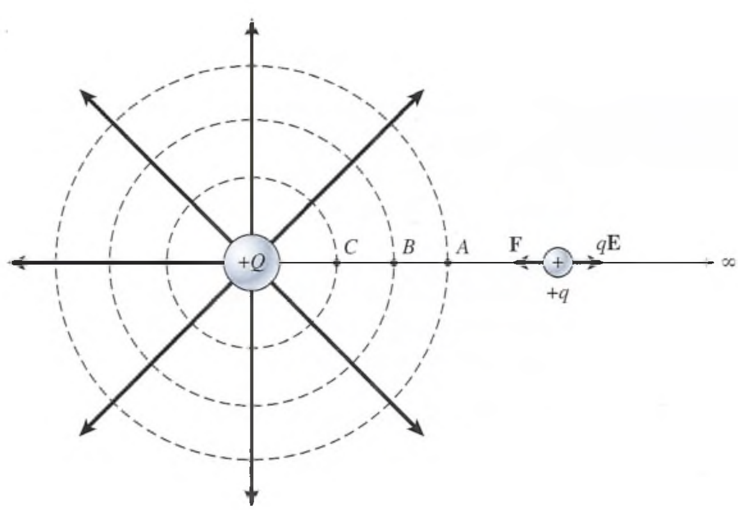


Figura 25.5 La energía potencial debida a una carga colocada en un campo eléctrico es igual al trabajo realizado *contra* las fuerzas eléctricas que transportan la carga desde el infinito hasta el punto en cuestión.

En la figura 25.5 y en el análisis que sigue, usaremos el término infinito para referirnos a puntos que están más allá del punto de interacción eléctrica y muy alejados del mismo. También supondremos que las únicas cargas presentes son aquellas expresamente indicadas en nuestros ejemplos.

La fuerza eléctrica promedio que experimenta una carga $+q$ cuando se desplaza del punto A al punto B es

$$F = \frac{kQq}{r_A r_B} \tag{25.2}$$

Por tanto, el trabajo realizado en contra del campo eléctrico al moverse por la distancia $r_A - r_B$ es igual a

$$\begin{aligned}\text{Trabajo}_{A\rightarrow B} &= \frac{kQq}{r_A r_B}(r_A - r_B)\\ &= kQq\left(\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A}\right)\end{aligned} \tag{25.3}$$

Observe que el trabajo es una función de las distancias r_A y r_B. La trayectoria seguida no tiene importancia. El mismo trabajo se realizaría contra el campo al mover una carga desde cualquier punto sobre el círculo punteado que pasa a través de A, a cualquier punto sobre el círculo que pasa a través de B.

Supongamos ahora que se calcula el trabajo realizado contra las fuerzas eléctricas al mover una carga positiva desde el infinito hasta un punto a una distancia r de la carga Q. Partiendo de la ecuación (25.3), el trabajo está dado por

$$\begin{aligned}\text{Trabajo}_{\infty\rightarrow r} &= kQq\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\infty}\right)\\ &= \frac{kQq}{r}\end{aligned} \tag{25.4}$$

En vista de que ya hemos demostrado que el trabajo realizado contra el campo eléctrico equivale al incremento de la energía potencial, la ecuación (25.4) representa la energía potencial en r con respecto al infinito. A menudo se considera que la energía potencial en el infinito es cero, por lo que la energía potencial de un sistema compuesto por una carga q y otra carga Q separadas por una distancia r es

$$EP = \frac{kQq}{r} \tag{25.5}$$

La energía potencial del sistema es igual al trabajo realizado contra las fuerzas eléctricas para llevar la carga $+q$ desde el infinito hasta ese punto.

Ejemplo 25.1

Una carga de $+2$ nC está separada 20 cm de otra carga de $+4$ μC. (a) ¿Cuál es la energía potencial del sistema? (b) ¿Cuál es el cambio en la energía potencial si la carga de 2 nC se mueve a una distancia de 8 cm de la carga de $+4$ μC?

Plan: La energía potencial de un sistema que contiene dos cargas q_1 y q_2 es el trabajo requerido para colocarlas a una distancia r entre sí. La ecuación (25.5) se puede usar para calcular la energía potencial para $r = 20$ cm y luego para $r = 8$ cm. La diferencia será el *cambio* en la energía potencial.

Solución (a): La energía potencial a una distancia $r = 20\text{ cm} = 0.20\text{ m}$ es

$$\begin{aligned}EP &= \frac{kQq}{r} = \frac{(9 \times 10^9\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(4 \times 10^{-6}\ \text{C})(2 \times 10^{-9}\ \text{C})}{(0.20\ \text{m})}\\ &= 3.60 \times 10^{-4}\ \text{J}\end{aligned}$$

Solución (b): La energía potencial a $r = 8$ cm $= 0.08$ m es

$$EP = \frac{kQq}{r} = \frac{(9 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2})(4 \times 10^{-6}\ \mathrm{C})(2 \times 10^{-9}\ \mathrm{C})}{(0.08\ \mathrm{m})}$$
$$= 9.00 \times 10^{-4}\ \mathrm{J}$$

El *cambio* en energía potencial es

$$\Delta EP = 9.00 \times 10^{-4}\ \mathrm{J} - 3.6 \times 10^{-4}\ \mathrm{J} = 5.4 \times 10^{-4}\ \mathrm{J}$$

Observe que la diferencia es positiva, lo que indica un *incremento* en energía potencial. Si la carga Q fuera negativa y todos los demás parámetros no cambiaran, la energía potencial habría *disminuido* en esta misma cantidad.

25.3 Potencial eléctrico

Cuando anteriormente estudiamos el concepto de campo eléctrico como fuerza por unidad de carga, se indicó que la principal ventaja de un concepto de ese tipo era que permitía asignar una propiedad eléctrica al espacio. Si se conoce la intensidad del campo en cierto punto, es posible predecir la fuerza sobre una carga situada en ese punto. De igual forma es conveniente asignar otra propiedad al espacio que rodea una carga, y que nos permite predecir la energía potencial debida a otra carga situada en cualquier punto. Esta propiedad del espacio se llama ***potencial*** y se define como sigue:

> El potencial V en un punto situado a una distancia *r* de una carga Q es igual al trabajo por unidad de carga realizado contra las fuerzas eléctricas para transportar una carga positiva $+q$ desde el infinito hasta dicho punto.

En otras palabras, el potencial en determinado punto A, como muestra la figura 25.6, es igual a la *energía potencial por unidad de carga.* Las unidades de potencial se expresan en *joules por coulomb*, y se conocen como ***volt*** (V).

$$V_A(\mathrm{V}) = \frac{EP\ (\mathrm{J})}{q\ (\mathrm{C})} \tag{25.6}$$

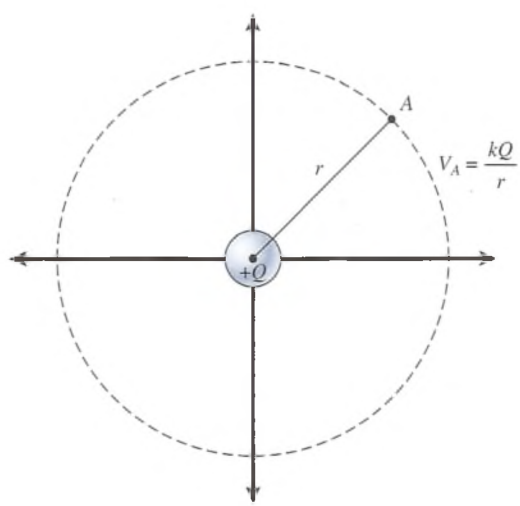


Figura 25.6 Cálculo del potencial a una distancia r de una carga $+Q$

Esto significa que un potencial de *1 volt* en el punto A significa que *si una carga de un coulomb se colocara en* A, la energía potencial sería de un joule. En general, cuando se conoce el potencial en el punto A, la energía potencial debida a la carga q en ese punto se puede determinar a partir de

$$EP = qV_A \tag{25.7}$$

Sustituyendo de la ecuación (25.5) a la ecuación (25.6) nos queda una expresión para calcular directamente el potencial eléctrico:

$$V_A = \frac{EP}{q} = \frac{kQq/r}{q}$$

$$V_A = \frac{kQ}{r} \qquad \textit{Energía potencial eléctrica} \tag{25.8}$$

El símbolo V_A se refiere al potencial eléctrico en el punto A localizado a una distancia r de la carga Q.

A estas alturas podemos observar que el potencial es el mismo en todos los puntos ubicados a iguales distancias de una carga esférica. Por este motivo, las ***líneas punteadas*** que aparecen en las figuras 25.5 y 25.6 se conocen como líneas equipotenciales. Observe que las líneas de igual potencial son siempre perpendiculares a las líneas del campo eléctrico. Si esto no fuera cierto, el trabajo se realizaría mediante una fuerza resultante cuando una carga se desplazara a lo largo de una línea equipotencial. Un trabajo así aumentaría o disminuiría el potencial.

> Las líneas equipotenciales siempre son perpendiculares a las líneas de campo eléctrico.

Antes de proponer un ejemplo, es preciso señalar que el potencial eléctrico en un punto dado se define en términos de una carga positiva. Esto significa que el potencial eléctrico será negativo en un punto localizado en el espacio que rodea a una carga negativa. Debemos recordar la siguiente regla:

> El potencial debido a una carga positiva es positivo, y el potencial debido a una carga negativa es negativo.

El uso del signo negativo para una carga negativa Q en la ecuación (25.8), resulta en un valor negativo para el potencial.

Ejemplo 25.2

(a) Calcule el potencial eléctrico en el punto A que está a 30 cm de distancia de una carga de $-2\ \mu$C. (b) ¿Cuál es la energía potencial si una carga de $+4$ nC está colocada en A?

Plan: Al principio no hay energía potencial EP debido a que sólo hay *una* carga. Sin embargo, hay potencial eléctrico V en el espacio que rodea a la carga. En la parte (a) usaremos la ecuación (25.8) para calcular el potencial eléctrico a una distancia de 0.30 m de la carga de $-2\ \mu$C. Luego usaremos la ecuación (25.7) para determinar la energía potencial cuando la carga de $+4$ nC se coloca en A.

Solución (a): A partir de la ecuación (25.8) obtenemos

$$V_A = \frac{kQ}{r} = \frac{(9 \times 10^9\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(-2 \times 10^{-6}\ \text{C})}{(0.30\ \text{m})}$$
$$= -6.00 \times 10^4\ \text{V}$$

Solución (b): Al resolver la ecuación (25.7) explícitamente para EP, determinamos la energía potencial debida a la colocación de la carga de $+4$ nC.

$$EP = qV_A = (4 \times 10^{-9}\ \text{C})(-6 \times 10^4\ \text{V})$$
$$= -2.40 \times 10^{-4}\ \text{J}$$

Un valor negativo para la energía potencial significa que, al separar las cargas, el trabajo se debe realizar en *contra* del campo eléctrico. En este ejemplo, una fuerza externa debe suministrar un trabajo de 24×10^{-5} J para poder transportar la carga hasta el infinito.

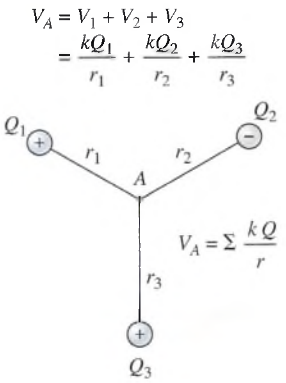


Figura 25.7 Potencial eléctrico en la vecindad de cierto número de cargas.

Ahora consideremos el caso más general, ilustrado en la figura 25.7, que se ocupa del potencial en los alrededores de cierto número de cargas:

> El potencial eléctrico en la vecindad de cierto número de cargas es igual a la suma algebraica de los potenciales eléctricos que corresponden a cada carga.

$$V_A = V_1 + V_2 + V_3 + \ldots$$
$$= \frac{kQ_1}{r_1} + \frac{kQ_2}{r_2} + \frac{kQ_3}{r_3} + \ldots$$

Recuerde que el potencial eléctrico en la vecindad de una carga positiva es positivo y el potencial eléctricoen la vecindad de una carga negativa es negativo. Esto significa que el signo de la carga se toma en cuenta en los cálculos. En general, el potencial eléctrico en un punto en el espacio cercano a otras cargas está dado por

$$V = \sum \frac{kQ}{r} \qquad \textbf{(25.9)}$$

Esta ecuación es una *suma algebraica* puesto que el potencial eléctrico es una cantidad escalar y no una cantidad vectorial, como ocurre con las fuerzas y los campos eléctricos.

Ejemplo 25.3

Dos cargas, $Q_1 = +6\ \mu C$ y $Q_2 = -6\ \mu C$, están separadas 12 cm, como muestra la figura 25.8. Calcule el potencial en los puntos *A* y *B*.

Plan: El potencial eléctrico en un punto en particular es la suma algebraica de los potenciales eléctricos debidos a cada carga, con las distancias medidas de cada carga a dicho punto. Los signos de la carga pueden usarse en el proceso de suma para calcular el potencial total.

Solución (a): El potencial eléctrico en *A* se encuentra a partir de la ecuación (25.9).

$$V_A = \frac{kQ_1}{r_1} + \frac{kQ_2}{r_2}$$
$$= \frac{(9 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2})(6 \times 10^{-6}\ \mathrm{C})}{4 \times 10^{-2}\ \mathrm{m}} + \frac{(9 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2})(-6 \times 10^{-6}\ \mathrm{C})}{8 \times 10^{-2}\ \mathrm{m}}$$
$$= 13.5 \times 10^5\ \mathrm{V} - 6.75 \times 10^5\ \mathrm{V}$$
$$= 6.75 \times 10^5\ \mathrm{V}$$

Esto significa que el campo eléctrico realizará un trabajo de 6.75×10^5 J por cada coulomb de carga positiva que transporta de *A* al infinito.

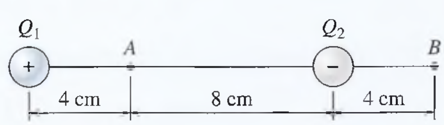


Figura 25.8

Solución (b): El potencial eléctrico en B es

$$V_B = \frac{kQ_1}{r_1} + \frac{kQ_2}{r_2}$$
$$= \frac{(9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)(6 \times 10^{-6} \text{ C})}{16 \times 10^{-2} \text{ m}} + \frac{(9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)(-6 \times 10^{-6} \text{ C})}{4 \times 10^{-2} \text{ m}}$$
$$= 3.38 \times 10^5 \text{ V} - 13.5 \times 10^5 \text{ V}$$
$$= -10.1 \times 10^5 \text{ V}$$

Los valores negativos indican que el campo se mantendrá sobre una carga positiva. Para mover 1 C de carga positiva desde A hasta el infinito, otra fuente de energía debe desarrollar un trabajo de 10.1×10^5 J. El campo desarrollará un trabajo negativo, igual a esta cantidad.

25.4 Diferencia de potencial

En la electricidad práctica, es de escaso interés el trabajo por unidad de carga para trasladar una carga al infinito. Con más frecuencia deseamos conocer los requisitos de trabajo para mover cargas entre dos puntos. Lo anterior conduce el concepto de ***diferencia de potencial.***

La diferencia de potencial entre dos puntos es el trabajo por unidad de carga positiva que realizan fuerzas eléctricas para mover una pequeña carga de prueba desde el punto de mayor potencial al punto de menor potencial.

Otra forma de expresar el mismo concepto sería afirmar que la diferencia de potencial entre dos puntos es la diferencia en los potenciales en esos puntos. Por ejemplo, si el potencial en cierto punto A es de 100 V y el potencial en otro punto B es de 40 V, la diferencia de potencial es

$$V_A - V_B = 100 \text{ V} - 40 \text{ V} = 60 \text{ V}$$

Esto quiere decir que los 60 J de trabajo serán realizados por el campo sobre cada coulomb de carga positiva que se desplaza desde A hasta B. En general, el *trabajo realizado por un campo eléctrico*, o ***trabajo eléctrico***, para mover una carga q del punto A al punto B se puede determinar a partir de

$$\text{Trabajo}_{A \to B} = q(V_A - V_B) \qquad \textbf{(25.10)}$$

Ejemplo 25.4 ¿Cuál es la diferencia de potencial entre los puntos A y B en la figura 25.8? Considere el ejemplo 25.3. ¿Cuánto trabajo realiza un campo eléctrico al mover una carga de $-2\ \eta$C del punto A al punto B?

Plan: La diferencia de potencial es simplemente $V_A - V_B$; el trabajo para mover la carga de A a B es el producto de q por la diferencia de potencial.

Solución: Los potenciales en los puntos A y B se calcularon en el ejemplo 25.3. Éstos son

$$V_A = 6.75 \times 10^5 \text{ V} \qquad V_B = -10.1 \times 10^5 \text{ V}$$

Por tanto, la diferencia de potencial entre los puntos A y B es

$$V_A - V_B = 6.75 \times 10^5 \text{ V} - (-10.1 \times 10^5 \text{ V})$$
$$= 16.9 \times 10^5 \text{ V}$$

Puesto que A está a un potencial mayor que B, el campo realizaría un trabajo *positivo* cuando una carga positiva se moviera desde A hasta B. Si se desplazara una carga *negativa*, el trabajo realizado por el campo para moverla desde A hasta B sería negativo. En este ejemplo, el trabajo es

$$\begin{aligned}\text{Trabajo}_{A\to B} &= q(V_A - V_B)\\ &= (-2 \times 10^{-9}\text{ C})(16.9 \times 10^5\text{ V})\\ &= -3.37 \times 10^{-3}\text{ J}\end{aligned}$$

Por el hecho de que el trabajo realizado por este campo es negativo, otra fuente de energía debe suministrar el trabajo para mover la carga.

Estrategia para resolver problemas

Potencial eléctrico y energía potencial

1. Lea el problema, luego dibuje y marque una figura. Indique las cargas positivas y negativas junto con las distancias proporcionadas. Las cargas deben expresarse en coulombs y las distancias en metros. Recuerde que 1 μC = 1×10^{-6} C y 1 nC = 1×10^{-9} C.
2. No olvide que el potencial eléctrico V es una propiedad del *espacio* que nos permite determinar la energía potencial EP cuando una carga q está situada en ese punto. Existe potencial en un *punto* del espacio, independientemente de que la carga esté colocada en ese punto.
3. El potencial absoluto en un punto vecino a un número de cargas es la suma algebraica de los potenciales debidos a cada carga:

$$V = \sum \frac{kQ}{r} \qquad k = 9 \times 10^9\text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$$

4. Solamente son significativos los *cambios* de potencial; además, el punto de referencia para un potencial de cero se puede ubicar en el infinito o en cualquier otro punto. Con mucha frecuencia, se puede elegir como cero en el punto de menor potencial absoluto.
5. El *trabajo* realizado *por* un campo eléctrico al mover una carga q desde un punto A hasta otro punto B es simplemente el producto de la carga por la diferencia de potencial:

$$\text{Trabajo}_{AB} = q(V_A - V_B) \qquad \textit{Trabajo realizado por el campo eléctrico}$$

6. En virtud de que el potencial en la vecindad de una carga positiva es positivo y el potencial cercano a una carga negativa es negativo, los signos de la carga y del potencial se pueden usar algebraicamente.

Regresemos ahora al ejemplo del campo eléctrico uniforme **E** entre dos placas con carga opuesta, como muestra la figura 25.9. Supongamos que las placas están separadas por una distancia d. Una carga q situada en la región comprendida entre las placas A y B experimentará una fuerza dada por

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E}$$

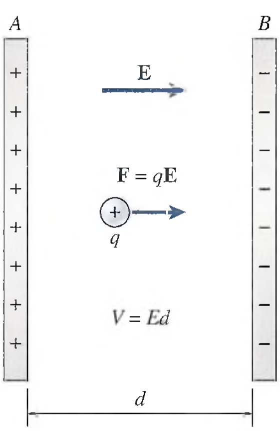


Figura 25.9 Potencial entre dos placas con cargas opuestas.

El trabajo realizado por esta fuerza para mover la carga q de la placa A a la placa B está dado por

$$Fd = (qE)d$$

Pero este trabajo también es igual al producto de la carga q por la diferencia de potencial $V_A - V_B$ entre las dos placas, así que podemos escribir

$$q(V_A - V_B) = qEd$$

Si se divide entre q y se representa la diferencia de potencial mediante el símbolo V, se obtiene

$$V = Ed \qquad \textbf{(25.11)}$$

La diferencia de potencial entre dos placas con cargas opuestas es igual al producto de la intensidad de campo por la separación de las placas.

Ejemplo 25.5 La diferencia de potencial entre dos placas separadas entre sí 5 mm es de 10 kV. Determine la intensidad del campo eléctrico entre las placas.

Solución: Al despejar E en la ecuación (25.11) nos queda

$$E = \frac{V}{d} = \frac{10 \times 10^3 \text{ V}}{5 \times 10^{-3} \text{ m}} = 2 \times 10^6 \text{ V/m}$$

Como ejercicio adicional, demuestre que el *volt por metro* es equivalente al *newton por coulomb*. El campo eléctrico expresado en volts por metro se conoce a veces como ***gradiente de potencial***.

25.5 Experimento de Millikan de la gota de aceite

Ahora que hemos desarrollado los conceptos de campo eléctrico y diferencia de potencial, estamos listos para describir un experimento clásico diseñado para determinar la unidad de carga más pequeña. Robert A. Millikan, un físico estadounidense, diseñó una serie de experimentos a principios de la década de 1900. Un diagrama esquemático de su aparato se muestra en la figura 25.10. En él se rocían pequeñísimas gotas de aceite en la región situada entre las dos placas metálicas. A partir de moléculas de aire, a través de las cuales se hacen pasar rayos X ionizados, se liberan electrones. Estos electrones se adhieren por sí mismos a las pequeñas gotas de aceite, lo cual da por resultado que éstas tengan una carga negativa neta.

Por medio de un microscopio se puede observar el movimiento descendente de las gotas de aceite, a medida que van cayendo lentamente bajo la influencia de su propio peso y de la fuerza viscosa ascendente provocada por la resistencia del aire (consulte la figura 25.10). Se puede recurrir a las leyes de la hidrostática para calcular la masa m de una gota particular de aceite midiendo su rapidez de caída.

Después de registrar todos los datos necesarios para determinar la masa m, se conecta una batería externa con el fin de establecer un campo eléctrico uniforme **E** entre las placas de

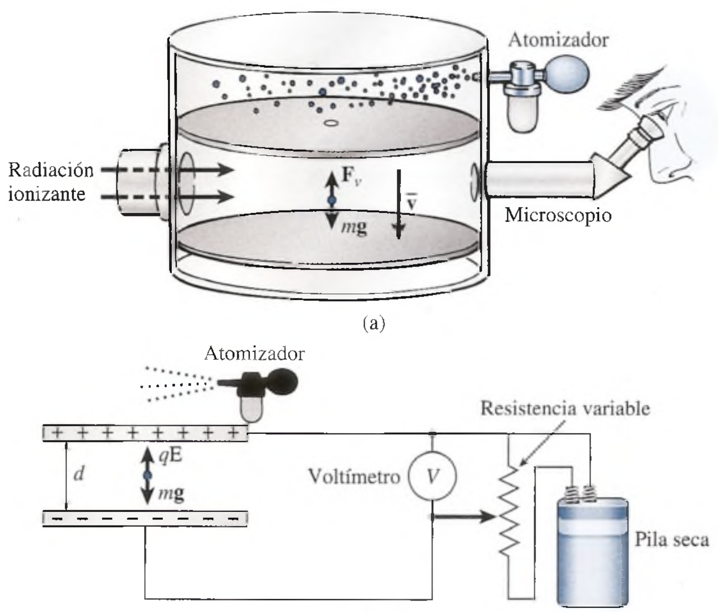


Figura 25.10 Experimento de Millikan de la gota de aceite: (a) La masa m de la gota se determina a partir de su velocidad de caída, en contra de la fuerza viscosa de la resistencia del aire. (b) La magnitud de la carga se puede calcular partiendo de las condiciones de equilibrio que mantienen suspendida la carga entre dos placas con carga opuesta (véase la figura 25.10).

carga opuesta (véase figura 25.10). La magnitud de la intensidad de campo se puede controlar por medio de una resistencia variable intercalada en el circuito eléctrico. El campo se ajusta hasta que la fuerza eléctrica ascendente que actúa sobre la gota sea igual a la fuerza gravitacional descendente, de modo que la gota de aceite quede inmóvil. En estas condiciones

$$qE = mg \tag{25.12}$$

donde q = carga neta de la gota de aceite
m = masa de la gota de aceite
g = aceleración de la gravedad

La intensidad de campo **E**, como se determinó por la ecuación (25.11), es función del voltaje aplicado V y de la separación de las placas d. Por tanto, la ecuación (25.12) se vuelve

$$q\frac{V}{d} = mg$$

y la magnitud de la carga sobre la gota de aceite se determina por

$$q = \frac{mgd}{V} \tag{25.13}$$

La diferencia de potencial V se puede leer directamente en un dispositivo adecuado llamado *voltímetro*, incorporado al circuito. Se conocen los otros parámetros.

Las cargas observadas por Millikan no siempre fueron iguales, pero él demostró que la magnitud de la carga era siempre un múltiplo entero de una cantidad básica de carga. Se supuso que esa carga *mínima* debía ser la carga de un solo electrón y que las otras cantidades resultaban de dos o más electrones. Los cálculos de la carga electrónica por este método nos dan

$$e = 1.6065 \times 10^{-19}\ \text{C}$$

lo cual concuerda en gran medida con los valores obtenidos con otros métodos.

25.6 El electrón volt

Consideremos la energía de una partícula cargada que se mueve a través de una diferencia de potencial. Se dispone de varias unidades para expresar la medida de esta energía, pero la mayoría de las unidades que nos son familiares resultan inadecuadas porque son demasiado grandes. Consideremos, por ejemplo, una carga de 1 C acelerada a través de una diferencia de potencial de 1 V. En este caso, su energía cinética será

$$\begin{aligned} EC &= qEd = qV \\ &= (1\ \text{C})(1\ \text{V}) = 1\ \text{C} \cdot \text{V} \end{aligned}$$

Desde luego, el coulomb-volt es un joule. Pero 1 C de carga es demasiado grande cuando se aplica a partículas individuales, y la unidad correspondiente de energía (el joule) es también muy grande. La unidad de energía más conveniente en física atómica y nuclear es el ***electrón volt*** (eV).

> El electrón volt es una unidad de energía equivalente a la energía adquirida por un electrón que es acelerado a través de una diferencia de potencial de 1 volt.

El electrón volt difiere del coulomb-volt en el mismo grado que la diferencia en la carga de un electrón y la carga de 1 C. Para comparar las dos unidades suponga que calculamos la energía en joules adquirida por un electrón que ha sido acelerado a través de una diferencia de potencial de 1 V:

$$\begin{aligned} EC &= qV \\ &= (1.6 \times 10^{-19}\ \text{C})(1\ \text{V}) \\ &= 1.6 \times 10^{-19}\ \text{J} \end{aligned}$$

Por tanto, 1 eV equivale a una energía de 1.6×10^{-19} J.

Resumen y repaso

Resumen

Los conceptos de energía potencial, potencial y diferencia de potencial se han ampliado para incluir los fenómenos eléctricos. Los múltiples problemas referentes al potencial electrostático han sido diseñados como una base para el tema de la corriente eléctrica directa que veremos más adelante. Los elementos esenciales de este capítulo se resumen a continuación:

- Cuando una carga q se mueve en contra de una fuerza eléctrica constante una distancia d, la energía potencial del sistema es:

$$\boxed{EP = qEd}$$

donde E es la intensidad del campo eléctrico constante. Si la carga se libera, adquirirá una energía cinética

$$\boxed{EC = \frac{1}{2}mv^2 = qEd}$$

mientras recorre la misma distancia de regreso.

- Debido a la existencia de cargas positivas y negativas y a los efectos opuestos que produce un mismo campo, debemos recordar que: *la energía potencial aumenta cuando una carga positiva se mueve contra el campo eléctrico, y la energía potencial disminuye cuando una carga negativa se mueve en contra del mismo campo.*
- En general, la energía potencial ocasionada por una carga q colocada a una distancia r de otra carga Q es igual al trabajo realizado contra las fuerzas eléctricas al mover la carga $+q$ desde el infinito.

$$\boxed{EC = \frac{kQq}{r} \qquad \textit{Energía potencial eléctrica}}$$

Observe que la distancia r no está elevada al cuadrado como en el caso de la intensidad del campo eléctrico.

- El *potencial* eléctrico V en un punto colocado a una distancia r de una carga Q es igual al trabajo realizado por cada carga unitaria contra las fuerzas eléctricas al traer una carga positiva $+q$ desde el infinito.

$$\boxed{V = \frac{kQ}{r} \qquad \textit{Potencial eléctrico}}$$

- La unidad de potencial eléctrico es el joule por coulomb (J/C), el cual recibe el nuevo nombre de volt (V).

$$\boxed{1\text{ V} = \frac{1\text{ J}}{1\text{ C}}}$$

- El potencial en un punto de la vecindad de cierto número de cargas es igual a la suma algebraica de los potenciales ocasionados por cada carga:

$$\boxed{V = \sum \frac{kQ}{r} = \frac{kQ_1}{r_1} + \frac{kQ_2}{r_2} + \frac{kQ_3}{r_3} + \dots \qquad \textit{Suma algebraica}}$$

- La diferencia de potencial entre dos puntos A y B es la diferencia de sus potenciales en esos puntos.

$$\boxed{V_{AB} = V_A - V_B \qquad \textit{Diferencia de potencial}}$$

- El trabajo realizado por un campo eléctrico al mover una carga q del punto A al punto B se puede hallar mediante

$$\boxed{\text{Trabajo}_{AB} = q(V_A - V_B) \qquad \textit{Trabajo y diferencia de potencial}}$$

- La diferencia de potencial entre dos placas con cargas opuestas es igual al producto de la intensidad de campo y la separación entre las placas.

$$\boxed{V = Ed \qquad E = \frac{V}{d}}$$

Conceptos clave

Preguntas de repaso

25.1. Indique con claridad la diferencia entre trabajo positivo y negativo. Indique la diferencia entre energía potencial positiva y negativa.

25.2. ¿En el caso de una masa m es posible que la energía potencial se incremente al trasladar la masa a una posición menor? ¿Es posible que un objeto eléctricamente cargado incremente la energía potencial al ser llevado a una posición de potencial más bajo? Explique su respuesta.

25.3. Cite un ejemplo en el cual la energía potencial sea cero en algún punto donde la intensidad del campo eléctrico no sea cero.

25.4. El campo eléctrico en el interior de un conductor electrostático es cero. ¿También el potencial eléctrico dentro del conductor es cero? Explique su respuesta.

25.5. Si se conoce la intensidad del campo eléctrico en algún punto, ¿se puede determinar el potencial eléctrico en ese punto? ¿Qué información se necesita?

25.6. La superficie de cualquier conductor es una superficie equipotencial. Justifique esta afirmación.

25.7. ¿La dirección de la intensidad del campo eléctrico va del potencial más alto al más bajo? Ilustre su respuesta.

25.8. Aplique el concepto de potencial al campo gravitacional y trate de obtener una expresión similar a la ecuación (25.9) para calcular la energía potencial por unidad de masa. Comente las aplicaciones de esa fórmula.

25.9. Demuestre que el volt por metro es dimensionalmente equivalente al newton por coulomb.

25.10. Distinga entre la diferencia de potencial y una diferencia en la energía potencial.

25.11. Una diferencia de potencial de 220 V se mantiene entre los extremos de un alambre largo de alta resistencia. Si el centro del alambre se conecta a tierra ($V = 0$), ¿cuál será la diferencia de potencial entre el punto central y los extremos?

25.12. El potencial debido a una carga negativa es negativo y el potencial debido a una carga positiva es positivo. ¿Por qué? ¿También es cierto que la energía potencial debida a una carga negativa es negativa? Explique su respuesta.

25.13. ¿El potencial es una propiedad asignada al espacio o a una carga? ¿A qué está asignada la energía potencial?

Problemas

Sección 25.1 Energía potencial eléctrica

25.1. Una placa cargada positivamente está 30 mm más arriba que una placa cargada negativamente, y la intensidad del campo eléctrico tiene una magnitud de 6×10^4 N/C. ¿Cuánto trabajo es realizado *por* el campo eléctrico cuando una carga de $+4\ \mu$C se mueve desde la placa negativa hasta la placa positiva? Resp. -7.20 mJ

25.2. En el problema 25.1, ¿cuánto trabajo se realiza *sobre* o en contra del campo eléctrico? ¿Cuál es la energía potencial eléctrica en la placa positiva?

25.3. La intensidad del campo eléctrico entre dos placas paralelas separadas 25 mm es 8000 N/C. ¿Cuánto trabajo realiza el campo eléctrico al mover una carga de $-2\ \mu$C desde la placa negativa hasta la placa positiva? ¿Cuánto trabajo es realizado *por* el campo al llevar la misma carga de regreso a la placa positiva? Resp. $+4.00 \times 10^{-4}$ J, -4.00×10^{-4} J

25.4. En el problema 25.3, ¿cuál es la energía potencial cuando la carga está en (a) la placa positiva y (b) la placa negativa?

25.5. ¿Cuál es la energía potencial de una carga de $+6$ nC localizada a 50 mm de una carga de $+80\ \mu$C? ¿Cuál es la energía potencial si la misma carga está a 50 mm de una carga de $-80\ \mu$C? Resp. $+86.4$ mJ, -86.4 mJ

25.6. ¿A qué distancia de una carga de $-7\ \mu$C otra carga de -3 nC tendrá una energía potencial de 60 mJ? ¿Qué fuerza inicial experimentará la carga de -3 nC?

25.7. Una carga de $+8$ nC se coloca en un punto P, a 40 mm de una carga de $+12\ \mu$C. ¿Cuál es la energía potencial por unidad de carga en el punto P en joules por coulomb? ¿Sufrirá algún cambio si se quita la carga de 8 nC? Resp. 2.70×10^6 J/C, no

25.8. Una carga de $+6\ \mu$C se encuentra a 30 mm de otra carga de 16 μC. ¿Cuál es la energía potencial del sistema?

25.9. En el problema 25.8, ¿cómo cambiará la energía potencial si la carga de 6 μC se coloca a una distancia de sólo 5 mm? ¿Se trata de un incremento o de un decremento de la energía potencial? Resp. 144 J, un incremento

25.10. Una carga de $-3\ \mu$C se coloca a 6 mm de una carga de $-9\ \mu$C. ¿Cuál es la energía potencial? ¿Es negativa o positiva?

25.11. ¿Qué cambio se registra en la energía potencial cuando una carga de 3 nC que estaba a 8 cm de distancia de una carga de $-6\ \mu$C se coloca a 20 cm de distancia de ésta? ¿Hay un incremento o una disminución en la energía potencial? Resp. $+1.22$ J, incremento

25.12. ¿A qué distancia de una carga de $-7\ \mu$C se debe colocar una carga de -12 nC para que la energía potencial sea de 9×10^{-5} J?

25.13. La energía potencial de un sistema constituido por dos cargas idénticas es 4.50 mJ cuando la separación entre ellas es de 38 mm. ¿Cuál es la magnitud de cada carga? Resp. 139 nC

Sección 25.3 Potencial y Sección 25.4 Diferencia de potencial

25.14. ¿Cuál es el potencial eléctrico en un punto que se encuentra a 6 cm de una carga de 8.40 μC? ¿Cuál es la energía potencial de una carga de 2 nC colocada en ese punto?

25.15. Calcule el potencial en el punto A que está a 50 mm de una carga de -40 μC. ¿Cuál es la energía potencial si una carga de $+3$ μC se coloca en el punto A? Resp. -7.20 MV, -21.6 J

25.16. ¿Cuál es el potencial en el punto medio de una recta que une una carga de -12 μC con una carga de $+3$ μC localizada a 80 mm de la primera carga?

25.17. Una carga de $+45$ nC se encuentra 68 mm a la izquierda de una carga de -9 nC. ¿Cuál es el potencial en un punto que se encuentra 40 mm a la izquierda de la carga de -9 nC? Resp. 12.4 kV

***25.18.** Los puntos A y B se ubican a 68 y 26 mm de una carga de 90 μC. Calcule la diferencia de potencial entre dos puntos A y B. ¿Cuánto trabajo realiza el campo eléctrico cuando una carga de -5 μC se traslada de A a B?

***25.19.** Los puntos A y B están a 40 y 25 mm de una carga de $+6$ μC. ¿Cuánto trabajo es necesario hacer contra el campo eléctrico (por medio de fuerzas externas) para trasladar una carga de $+5$ μC del punto A al punto B? Resp. $+4.05$ J

***25.20.** Una carga de $+6$ μC se encuentra en $x = 0$ sobre el eje x, y una carga de -2 μC se localiza en $x = 8$ cm. ¿Cuánto trabajo es realizado *por* el campo eléctrico al llevar una carga de -3 μC desde el punto $x = 10$ cm hasta el punto $x = 3$ cm?

Problemas adicionales

25.21. El punto A está a 40 mm arriba de una carga de -9 μC y el punto B se localiza a 60 mm debajo de la misma carga. Una carga de -3 nC se traslada del punto B al punto A. ¿Cuál es el cambio registrado en la energía potencial? Resp. $+2.025$ mJ

25.22. Dos placas paralelas están separadas 50 mm en el aire. Si la intensidad del campo eléctrico entre las placas es de 2×10^4 N/C, ¿cuál es la diferencia de potencial entre las placas?

25.23. La diferencia de potencial entre dos placas paralelas separadas por 60 mm es de 4000 V. ¿Cuál es la intensidad del campo eléctrico entre ellas? Resp. 66.7 kV/m

25.24. Si un electrón se encuentra en la placa de potencial más bajo del problema 25.23, ¿cuál será su velocidad cuando llegue a la placa de potencial más alto? ¿Cuál es esa energía, expresada en electrón volts?

25.25. Demuestre que el gradiente de potencial V/m es equivalente a la unidad N/C para el campo eléctrico.

25.26. ¿Cuál es la diferencia de potencial entre dos puntos localizados a 30 y 60 cm de una carga de -50 μC?

25.27. El gradiente de potencial entre dos placas paralelas separadas 4 mm es de 6000 V/m. ¿Cuál es la diferencia de potencial entre las placas? Resp. 24.0 V

25.28. El campo eléctrico entre dos placas separadas 50 mm es de 6×10^5 V/m. ¿Cuál es la diferencia de potencial entre las placas?

25.29. ¿Cuál debe ser la separación de dos placas paralelas si la intensidad de campo es de 5×10^4 V/m y la diferencia de potencial es 400 V? Resp. 8.00 mm

25.30. La diferencia de potencial entre dos placas paralelas es 600 V. Una carga de 6 μC se acelera a lo largo de toda la diferencia de potencial. ¿Cuál es la energía cinética impartida a la carga?

25.31. Calcule la energía cinética de una partícula alfa ($+2e$) que se acelera mediante una diferencia de potencial de 800 kV. Presente su respuesta tanto en electrón volts como en joules. Resp. 1.60 MeV, 2.56×10^{-13} J

25.32. Un acelerador lineal acelera un electrón a través de una diferencia de potencial de 4 MV. ¿Cuál es la energía de un electrón emergente en electrón volts y en joules?

25.33. Un electrón adquiere una energía de 2.8×10^{-15} J al pasar del punto A al punto B. ¿Cuál es la diferencia de potencial entre esos puntos en volts? Resp. 17.5 kV

***25.34.** Demuestre que la energía potencial total de las tres cargas colocadas en las esquinas del triángulo equilátero que muestra la figura 25.11 está dada por:

$$-\frac{3kq^2}{d}$$

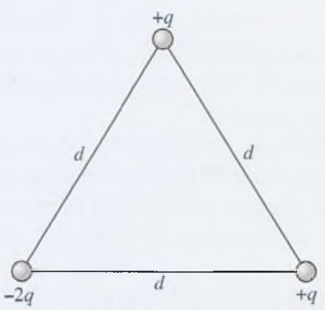


Figura 25.11

***25.35.** Suponga que $q = 1$ μC y $d = 20$ mm. ¿Cuál es la energía potencial del sistema de cargas de la figura 25.11? Resp. 1.35 J

***25.36.** A cierta distancia de una carga puntual, el potencial es de 1200 V y la intensidad del campo eléctrico en ese punto es de 400 N/C. ¿Cuál es la distancia a la carga y cuál es la magnitud de dicha carga?

Resp. 3 m, 400 nC

***25.37.** Dos grandes placas se encuentran separadas 80 mm y tienen una diferencia de potencial de 800 kV. ¿Cuál es la magnitud de la fuerza que actuaría sobre un electrón colocado en el punto medio entre esas placas? ¿Cuál sería la energía cinética del electrón al moverse de la placa de potencial bajo a la placa de potencial alto?

Resp. 1.60×10^{-12} N, 1.28×10^{-13} J

Preguntas para la reflexión crítica

25.38. La placa A tiene un potencial 600 V más alto que la placa B, la cual se encuentra 50 mm más abajo que la placa A. Una carga de $+2$ μC se desplaza de la placa A a la placa B. ¿Cuál es la intensidad del campo eléctrico entre las placas? ¿Cuáles son el signo y la magnitud del trabajo realizado por el campo eléctrico? ¿La energía potencial tiene un incremento o un decremento? Responda ahora las mismas preguntas para una carga de -2 μC que se traslada de A a B.

Resp. 12 kV/m, +1.20 mJ, disminuye, −1.2 mJ, aumenta

25.39. El punto A está a una distancia de $x = +a$ a la derecha de una carga de $+4$ μC. El campo eléctrico que se dirige a la derecha en el punto A es de 4000 N/C. ¿Cuál es la distancia a? ¿Cuál es el potencial en el punto A? ¿Cuáles son el campo eléctrico y el potencial en el punto $x = -a$? Calcule la fuerza eléctrica y la energía potencial eléctrica cuando una carga de -2 nC se coloca en cada uno de esos puntos.

***25.40.** Los puntos A, B y C representan las esquinas de un triángulo equilátero que mide 100 mm por lado. En la base del triángulo, una carga de $+8$ μC está 100 mm a la izquierda de una carga de -8 μC. ¿Cuál es el potencial en el vértice C? ¿Cuál es el potencial en un punto D que se encuentra 20 mm a la izquierda de la carga de -8 μC? ¿Cuánto trabajo ha realizado el campo eléctrico al llevar una carga $+2$ μC del punto C al punto D?

Resp. 0, −2.70 MV, +5.40 J

***25.41.** Dos cargas, de $+12$ y -6 μC, están separadas 160 mm. ¿Cuál es el potencial en el punto medio A de la recta que une las dos cargas? ¿En qué punto B el potencial eléctrico es igual a cero?

***25.42.** Para las cargas y las distancias que muestra la figura 25.12, calcule el potencial en los puntos A, B y C? ¿Cuánto trabajo es realizado *por* el campo eléctrico al trasladar una carga de $+2$ μC desde C hasta A? ¿En qué punto B el potencial eléctrico es igual a cero?

Resp. $V_A = -600$ V,
$V_B = +600$ V,
$V_C = -300$ V,
trabajo = +0.6 mJ,
trabajo = −2.4 mJ

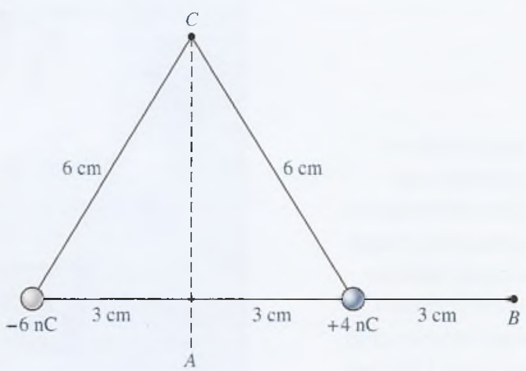
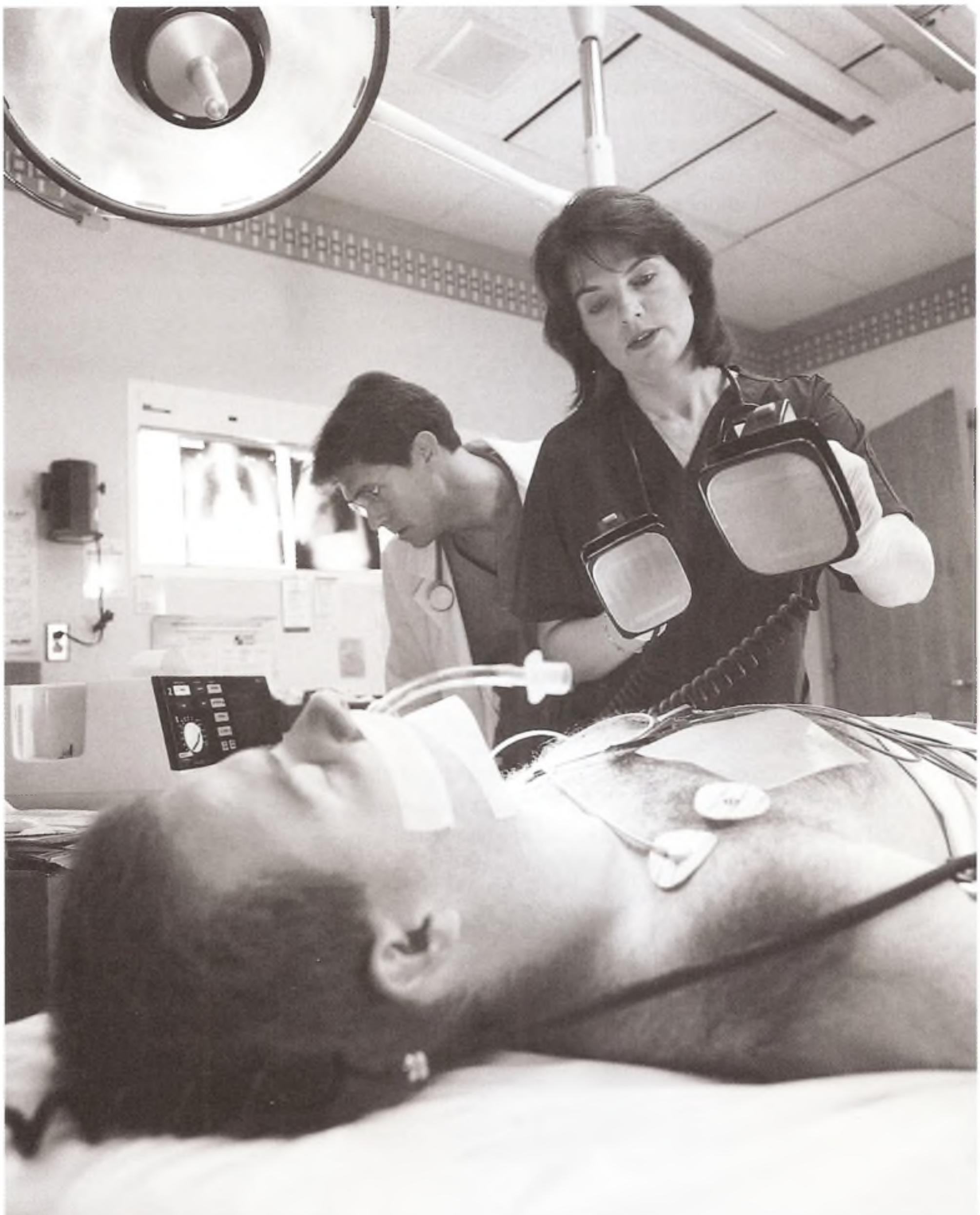


Figura 25.12

***25.43.** Las placas horizontales en el experimento de la gota de aceite de Millikan están separadas 20 mm. El diámetro de una gota de aceite en particular es 4 μm y la densidad del aceite es 900 kg/m^3. Suponiendo que dos electrones se unen a la pequeña gota, ¿qué diferencia de potencial debe existir entre las placas para establecer el equilibrio?

26 Capacitancia



Los desfibriladores ventriculares usan grandes condensadores para aplicar un choque de corriente eléctrica al músculo cardiaco hasta que establezca su propio ritmo. Cada año mueren más de 250 000 estadounidenses debido a ataques cardiacos súbitos. Cada minuto que transcurre sin aplicar el desfibrilador, las oportunidades de vida de la víctima de un ataque disminuyen de 10% a 7%. En este capítulo se estudian las propiedades fundamentales de los condensadores. (*Fotografía © vol. 154/ Corbis.*)