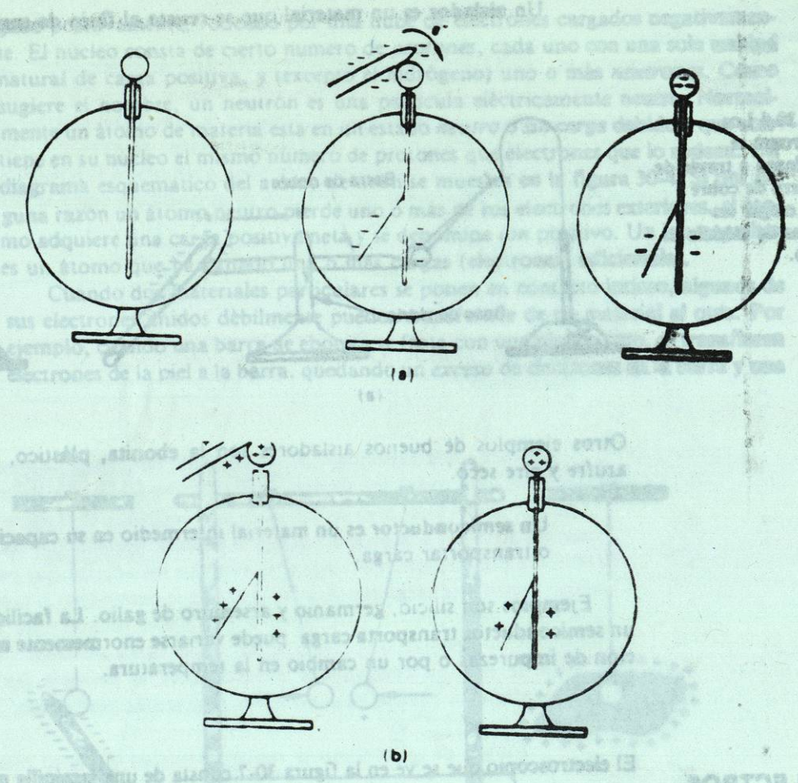


Fig. 30-8 Carga de un electroscopio por contacto con *a)* barra cargada negativamente y *b)* una barra cargada positivamente.

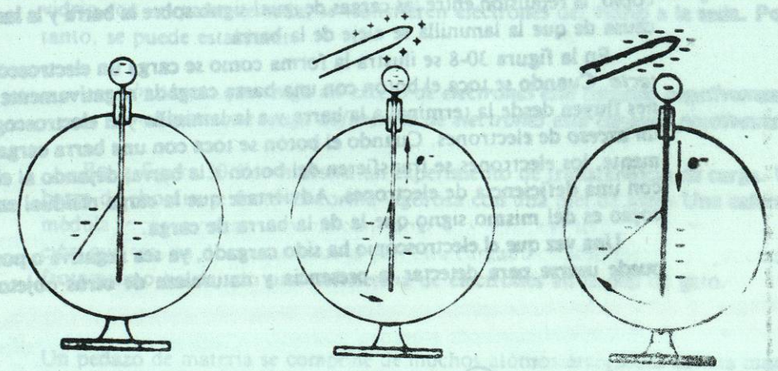


Fig. 30-9 Un electroscopio cargado negativamente puede usarse para detectar la presencia de otra carga.

(Véase Fig. 30-9). Por ejemplo, considérese lo que le pasa a la laminilla de un electroscopio cargado negativamente cuando se acerca hacia el botón una barra cargada positivamente. Algunos electrones se desplazan de la laminilla y la barra hasta el botón, lo que provoca que la laminilla converja. Si se acerca aún más la barra, se obtendrá una convergencia proporcionalmente mayor de la laminilla, ya que son más y más electrones los que se atraen y desplazan hacia el botón. Se infiere que hay una proporción directa entre el número de cargas en la laminilla y la barra y la fuerza de repulsión entre ellos. Aún más, debe haber una relación *inversa* entre la separación de la barra cargada y el botón y la fuerza de atracción de los electrones de la laminilla y barra del electroscopio. La fuerza es más intensa en cuanto la separación disminuye. Estas observaciones ayudarán a comprender la ley de Coulomb, que será desarrollada en la última sección.

Un razonamiento similar demostrará que la laminilla de un electroscopio cargado negativamente será repelido todavía más por la barra cuando el botón se coloca cerca de un objeto cargado negativamente. O sea, que puede utilizarse un electroscopio cargado para indicar tanto la naturaleza como la presencia de cargas cercanas.

30-5 REDISTRIBUCIÓN DE LA CARGA

Cuando una barra cargada nagativamente se acerca a una esfera de médula de saúco descargada, habrá una atracción inicial, como se muestra en la figura 30-10. La atracción del objeto sin carga 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 débilmente ligados desplazándose al lado opuesto del objeto sin carga, así que hay una deficiencia (carga positiva) en el lado cercano a la barra y un exceso (carga negativa) en el lado más 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. Durante este proceso no se gana ni se pierde carga; simplemente la carga del cuerpo neutro se redistribuye.

30-6 INDUCCIÓN

La redistribución de carga debido a la presencia de un objeto cercano cargado puede ser útil para cargar objetos sin que haya contacto. Este proceso, llamado *inducción* de cargas, puede llevarse a cabo sin ninguna pérdida de carga del cuerpo cargado. Por ejemplo, considérense las dos esferas metálicas neutras en contacto, como se muestra en la figura 30-11. Cuando la 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 de la esfera de la izquierda hacia la esfera de la derecha a través del punto de contacto. Ahora bien, si las esferas son separadas ante la presencia de la barra cargada los electrones no pueden regresar a la esfera de la izquierda. Así pues, la esfera de la izquierda tendrá una

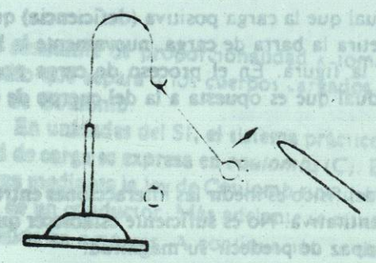


Fig. 30-10 Atracción de un cuerpo neutro debido a una redistribución de carga.

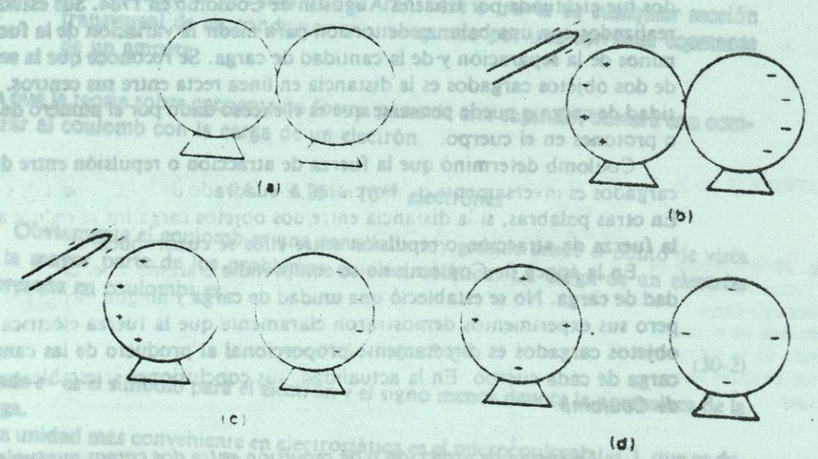


Fig. 30-11 Carga de dos esferas metálicas por inducción.

deficiencia de electrones (carga positiva), y la de la derecha tendrá un exceso de electrones (carga negativa).

También puede inducirse una carga en una sola esfera. Este proceso se muestra con el electroscopio en la figura 30-12. Se coloca una barra cargada negativamente cerca del botón metálico, de tal modo que haya una redistribución de carga. Los electrones repelidos son los responsables de que la laminilla diverja, dejando una deficiencia de electrones en el botón. Si se toca el botón con un dedo o si se conecta un alambre desde el mismo a tierra, se tiene entonces una trayectoria para que los electrones repelidos abandonen el electroscopio. El cuerpo o la

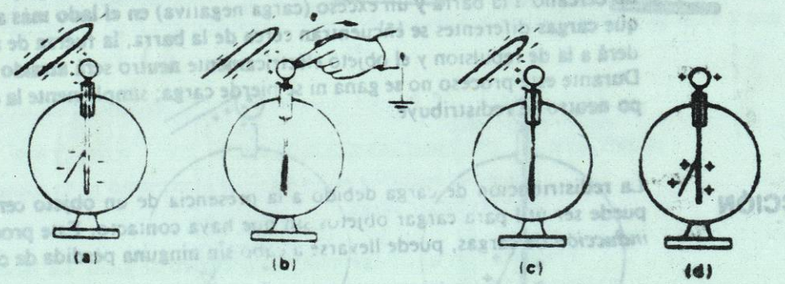


Fig. 30-12 Carga de un electroscopio por inducción. Nótese que la carga residual es opuesta a la del cuerpo de carga.

tierra adquirirán una carga igual que la carga positiva (deficiencia) que queda en el electroscopio. Cuando se retira la barra de carga, nuevamente la laminilla divergirá, como se muestra en la figura. En el proceso de carga por inducción siempre queda una carga residual que es opuesta a la del cuerpo de carga.

30-7 LEY DE COULOMB

Como de costumbre, la tarea del físico es medir las interacciones entre los objetos cargados de alguna forma cuantitativa. No es suficiente establecer que existe una fuerza eléctrica, se debe ser capaz de predecir su magnitud.

La primera investigación teórica de las fuerzas eléctricas entre cuerpos cargados fue efectuada por Charles Augustin de Coulomb en 1784. Sus estudios fueron realizados con una balanza de torsión para medir la variación de la fuerza en términos de la separación y de la cantidad de carga. Se reconoce que la separación r de dos objetos cargados es la distancia en línea recta entre sus centros. De la cantidad de carga q puede pensarse que es el exceso dado por el número de electrones o protones en el cuerpo.

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

En la época de Coulomb no se comprendía claramente el concepto de cantidad de carga. No se estableció una unidad de carga y ningún medio para medirla, pero sus experimentos demostraron claramente que la fuerza eléctrica entre dos objetos cargados es directamente proporcional al producto de las cantidades de carga de cada cuerpo. En la actualidad, sus conclusiones se establecen 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.*

A fin de establecer matemáticamente la ley de Coulomb, consideremos las cargas en la figura 30-13. En la figura 30-13*a* se indica la fuerza de atracción F entre dos cargas de diferente signo, y en la figura 30-13*b* se muestra una fuerza de repulsión entre cargas de igual signo. En cada caso la magnitud de la fuerza se determina de las magnitudes de las cargas q y q' y de su separación r. De la ley de Coulomb, puede escribirse

$$F = k\frac{qq'}{r^2} \qquad (30\text{-}1)$$

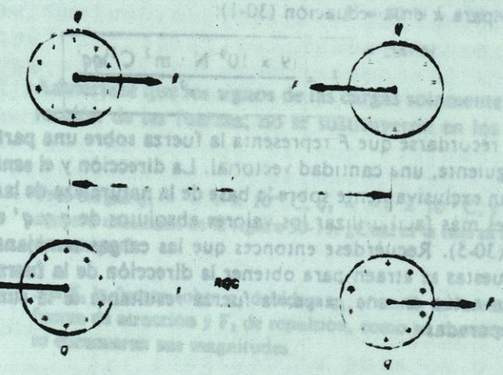


Fig. 30-13 Ilustración de la ley de Coulomb.

La constante de proporcionalidad k toma en consideración las propiedades del medio que separa a los cuerpos cargados y tiene las dimensiones dictadas por la ley de Coulomb.

En unidades del SI, el sistema práctico en el estudio de la electricidad, la unidad de carga se expresa en *coulombs* (C). En este caso, no se define la cantidad de carga mediante la ley de Coulomb sino que se relaciona con el flujo de carga a través de un conductor. Más adelante se estudiará que esta rapidez de flujo de carga se mide en *amperes*. A continuación se da una definición formal del coulomb:

> Un coulomb es la carga que se transfiere a través de cualquier sección transversal de un conductor en un segundo por una corriente constante de un ampere.

Ya que la teoría sobre corriente no forma parte de este capítulo, bastará con comparar al coulomb con la carga de un electrón.

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

Obviamente el coulomb es una cantidad muy grande desde el punto de vista de la mayor parte de los problemas en electrostática. La carga de un electrón expresada en coulombs es

$$e^- = -1.6 \times 10^{-19}\ \text{C} \qquad (30\text{-}2)$$

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

Una unidad más conveniente en electrostática es el microcoulomb (μC), que se define por

$$1\ \mu\text{C} = 10^{-6}\ \text{C} \qquad (30\text{-}3)$$

Puesto que en el SI las unidades de fuerza, carga y distancia no dependen de la ley de Coulomb, la constante k debe determinarse experimentalmente. Gran

número de experimentos ha demostrado que cuando la fuerza se expresa en newtons, la distancia en metros y la carga en coulombs, la constante de proporcionalidad es aproximadamente:

$$k = 9 \times 10^9 \ \mathrm{N \cdot m^2/C^2} \qquad (30\text{-}4)$$

Cuando la ley de Coulomb se aplica en el sistema SI de unidades, se debe sustituir este valor para k en la ecuación (30-1):

$$\boxed{F = \frac{(9 \times 10^9 \ \mathrm{N \cdot m^2/C^2})qq'}{r^2}} \qquad (30\text{-}5)$$

Debe recordarse que F representa la fuerza sobre una partícula cargada y es, por consiguiente, una cantidad vectorial. La dirección y el sentido de la fuerza se determinan exclusivamente sobre la base de la naturaleza de las cargas q y q'. Por lo tanto, es más fácil utilizar los valores absolutos de q y q' en la ley Coulomb, ecuación (30-5). Recuérdese entonces que las cargas semejantes se repelen y las cargas opuestas se atraen para obtener la dirección de la fuerza. Cuando más de una fuerza actúa en una carga, la fuerza resultante es la suma vectorial de las fuerzas separadas.

EJEMPLO 30-1 Una carga de $-3\ \mu C$ se coloca a 100 mm de una carga de $+3\ \mu C$. Calcúlese la fuerza entre estas dos cargas.

Solución Primero se convierte en unidades apropiadas.

$$3\ \mu C = 3 \times 10^{-6}\ C \qquad 100\ mm = 100 \times 10^{-3}\ m = 0.1\ M$$

A continuación se usan los valores absolutos, de tal manera que q y q', sean iguales a 3×10^{-6} C. Si se aplica la ley de Coulomb se obtiene

$$F = \frac{kqq'}{r^2} = \frac{(9 \times 10^9 \ \mathrm{N \cdot m^2/C^2})(3 \times 10^{-6}\ C)(3 \times 10^{-6}\ C)}{(0.1\ m)^2}$$

$$F = 8.1\ N \qquad \textit{Atracción}$$

Esta es una fuerza de *atracción* porque las cargas tienen signos opuestos.

EJEMPLO 30-2 Dos cargas $q_1 = -8\ \mu C$ y $q_2 = +12\ \mu C$ son colocadas a 120 mm de distancia, en el aire. ¿Cuál es la fuerza resultante en una tercera carga $q_3 = -4\ \mu C$ colocada a mitad del camino entre las otras dos cargas?

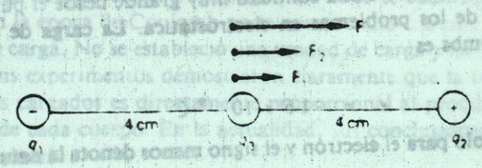


Fig. 30-14 Cálculo de la fuerza resultante sobre una carga colocada en el punto medio de la distancia entre las otras dos cargas.

Solución Se convierten las cargas en coulombs ($1\ \mu C = 1 \times 10^{-6}$ C), se usan valores absolutos y se convierte la distancia en metros (120 mm = 0.12 m). La mitad de 0.12 m es 0.06 m. Se dibuja un esquema en la figura 30-14 para ayudar a visualizar las fuerzas. La fuerza en q_3 debida a q_1 es dirigida hacia la derecha y se calcula a partir de la ley de Coulomb

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

$$F_1 = 0.288\ \mathrm{N \cdot m^2} / 0.0036\ \mathrm{m^2} = 80\ N \qquad \textit{Repulsión hacia la derecha}$$

De una manera parecida, la fuerza F_2 en q_3 debida a q_2 es igual a

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

$$F_2 = 120\ N \qquad \textit{Atracción, también a la derecha}$$

La fuerza resultante F es la suma vectorial de F_1 y F_2. Entonces, con la anotación:

$$F = 80\ N + 120\ N$$

$$= 200\ N \qquad \textit{Dirigida a la derecha.}$$

Adviértase que los signos de las cargas solamente se usaron para determinar la dirección de las fuerzas; no se sustituyeron en los cálculos.

EJEMPLO 30-3 Tres cargas $q_1 = +4 \times 10^{-6}$ C, $q_2 = -6 \times 10^{-6}$ C, y $q_3 = -8 \times 10^{-6}$ C se arreglan de la manera mostrada en la figura 30-15. ¿Cuál es la fuerza resultante sobre q_3 debida a las otras dos cargas?

Solución Sea F_1 la fuerza sobre q_3 debida a q_1, y sea F_2 la fuerza sobre q_3 causada por q_2. F_1 es una fuerza de atracción y F_2 de repulsión, como se muestra en la figura. De la ley de Coulomb se encuentran sus magnitudes.

$$F_1 = \frac{(9 \times 10^9 \ \mathrm{N \cdot m^2/C^2})(4 \times 10^{-6}\ C)(8 \times 10^{-6}\ C)}{(0.1\ m)^2}$$

$$= 2.88 \times 10^{-5}\ N \qquad (37^\circ \text{ noroeste})$$

$$F_2 = \frac{(9 \times 10^9 \ \mathrm{N \cdot m^2/C^2})(6 \times 10^{-6}\ C)(8 \times 10^{-6}\ C)}{(8 \times 10^{-2}\ m)^2}$$

$$= 6.75 \times 10^{-5}\ N \qquad \text{este}$$

A continuación debe determinarse la resultante F de las fuerzas F_1 y F_2. Del diagrama de cuerpo libre se observa que

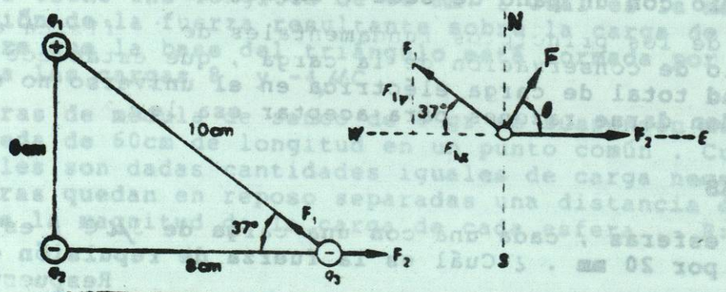
$$F_x = F_2 - F_{1x} = F_2 - F_1 \cos 37$$

$$= (6.75 \times 10^{-5}\ N) - (2.88 \times 10^{-5}\ N)(0.8)$$

$$= 4.45 \times 10^{-5}\ N$$

$$F_y = F_1 \operatorname{sen} 37 = 1.73 \times 10^{-5}\ N$$

Fig. 30-15



De las componentes se encuentra que

$$\tan \theta = \frac{F_y}{F_x} = \frac{1.73 \times 10^{-5}\ N}{4.45 \times 10^{-5}\ N} = 0.389$$

$$\theta = 21^\circ$$

$$F = \frac{F_y}{\operatorname{sen} \theta} = \frac{1.73 \times 10^{-5}\ N}{\operatorname{sen} 21^\circ} = 4.80 \times 10^{-5}\ N$$

En consecuencia, la fuerza resultante sobre q_3 es 4.8×10^{-5} N dirigida 21° al noreste.

RESUMEN

La electrostática es la ciencia que trata del estudio de las cargas en reposo . Se ha visto que hay dos clases de carga en la naturaleza . Si un objeto tiene exceso de electrones se dice que está cargado negativamente ; si tiene una deficiencia de electrones está cargado positivamente . La ley de Coulomb se introdujo para proporcionar una medida cuantitativa de las fuerzas eléctricas entre esas cargas . Los conceptos principales son :

+ La primera ley de la electrostática establece que las cargas semejantes se repelen entre sí y las cargas diferentes se atraen
+ La ley de Coulomb establece que la fuerza de atracción ó de repulsión entre dos cargas puntuales es directamente proporcional al producto de las dos cargas , e inversamente proporcional a la separación entre las dos cargas .

$$F = \frac{K\,qq'}{r^2} \qquad K = 9 \times 10^9\ N.m^2/C^2$$

La fuerza F está en newton (N) cuando la separación está en metros (m) y la carga q se mide en coulombs (C)

+ Al resolver los problemas de este capítulo es importante emplear el signo de las cargas para determinar la dirección de las fuerzas , y la ley de Coulomb para determinar sus magnitudes . Por lo tanto , la fuerza resultante en una carga particular se encuentra mediante los métodos de la mecánica vectorial .

PREGUNTAS

1.- Definase los siguiente términos :

a) Electrostática	b) cargar	c)Electrón
d) Carga negativa	e)Carga positiva	f) Ion
g) Carga inducida	h) Conductor	i) Aislador
j) Semiconductor	k) Ley de Coulomb	l) Coulomb (unidad
m) Microcoulomb	n) Electroscopio	

2.- ¿ Se crea carga en el proceso de frotamiento de una barra de vidrio con un paño de seda ? EXPLIQUESE

3.- Uno de los principios fundamentales de la física es el principio de conservación de la carga , que establece que la cantidad total de carga eléctrica en el universo no cambia . ¿ Pueden darse razones para aceptar esa ley ?

PROBLEMAS

1.- Dos esferas , cada una con una carga de 3μC , están separadas por 20 mm . ¿ Cuál es la fuerza de repulsión entre ellas?
Respuesta: 202 N.

2.- Dos cargas puntuales de -3 y +4μC se encuentran separadas por 12 mm en el vacío . ¿ Cuál es la fuerza electrostática entre ellas ?

3.- ¿ Cuál debe ser la separación entre dos cargas de -4μC , si la fuerza de repulsión entre ellas es de 20 Newtons?
Respuesta : 84.9 mm

4.- Dos carga idénticas desconocidas experimentan una fuerza repulsiva de 48 N . cuando están separadas 60 mm . ¿ Cuál es la magnitud de cada carga ?

5.- A una esfera metálica pequeña se le suministra una carga de +40μC , y a una segunda esfera localisada a 8 cm se le dá una carga de -12μC . a) ¿ Cuál es la fuerza de atracción entre ellas ? b) Si se permite que las dos esferas se pongan en contacto y luego se separan nuevamente a 8 cm , ¿ cuál es la fuerza eléctrica que existe entre ellas ?
RESPUESTA : a)675N b)276N (repulsión)

6.- Dos cargas se atraen entre sí con una fuerza de 6×10^{-5} N, cuando se encuentran separadas cierta distancia en el vacío . Si su separación se disminuye en la tercera parte de su distancia original . ¿¿cuál es la nueva fuerza de atracción ??

7.- La fuerza de repulsión entre dos esferas de médula de sauco es de 60μN . Si cada una de las esferas lleva una carga de 8nC , ¿ cuál es su separación ? RESPUESTA : 98 mm.

8.- Una carga de +60μC se coloca a 60 mm a la isquierda de una carga de +20μC . ¿ Cuál es la fuerza resultante sobre una carga de -35μC colocada en el punto medio entre las otras dos cargas ?
RESPUESTA: $1.4\times10^{}$ N. isquierda

9.- Una carga puntual de +36μC se sitúa a 80 mm de una segunda carga puntual de -22μC . a) ¿ Cuál es la fuerza que se ejerce sobre cada una de las cargas ? b) ¿ Cuál es la fuerza resultantee sobre una tercera carga de +12μC colocada entre las otras cargas y localizadas a 60 mm de la carga de +36μC ?

10.-Dos cargas de +16 y +9μC están separadas 80mm en el aire . ¿ dónde deberá colocarse una tercera carga a fin de que la fuerza resultante que actué sobre ella sea cero ? ¿ por qué no es necesario especificar la magnitud ó el signo de la tercera carga ?

11.-Tres cargas puntuales q_1= +8μC , q_2= -4μC ,y q_3=+2μC se colocan en los vértices de un triángulo equilátero . Cada uno de sus lados tiene una longitud de 80 mm. ¿ Cuál es la magnitud y la direción de la fuerza resultante sobre la carga de 8μC ? Se infiere que la base del triángulo está formada por una linea que une a las cargas 8 y -4μC .

12.-Dos esferas de médula de sauco de 8 gr se suspenden mediante hilos de seda de 60cm de longitud en un punto común . Cuando a las esferas les son dadas cantidades iguales de carga negativa , las esferas quedan en reposo separadas una distancia de 30 cm. Calcúlese la magnitud de la carga de cada esfera . R: 450 nC