

Fundamentos de electrodinámica

¿Qué es la electrodinámica?

Entramos ahora en el estudio de una nueva parte de la física, la "electrodinámica". Su propio nombre indica que en ella se trata de los procesos determinados por el movimiento y la interacción de las partículas con carga eléctrica. Esta interacción se llama ELECTROMAGNÉTICA. El estudio de la naturaleza de esta interacción conduce a uno de los conceptos más fundamentales de la física, el de CAMPO ELECTROMAGNÉTICO.

La electrodinámica es la ciencia que trata de las propiedades y de las leyes del comportamiento de una forma particular de la materia, el campo electromagnético, que efectúa la acción mutua entre los cuerpos o las partículas con carga eléctrica.

Entre los cuatro tipos de interacciones descubiertos por la ciencia—gravitatorias, electromagnéticas, fuertes (nucleares) y débiles¹⁾—son precisamente las electromagnéticas las que ocupan el primer puesto por la amplitud y la diversidad de sus manifestaciones. En la vida cotidiana y en la técnica nos encontramos a cada paso con distintos tipos de fuerzas electromagnéticas. Son éstas las fuerzas de elasticidad y de rozamiento y las fuerzas de nuestros músculos y de los músculos de los animales.

Las interacciones electromagnéticas nos permiten ver el libro que estamos leyendo, ya que la luz es una de las formas del campo electromagnético. La vida misma es inconcebible sin estas fuerzas. Los seres vivos, incluido el hombre, como han demostrado los vuelos de los cosmonautas, son capaces de estar durante mucho tiempo en estado de ingravidez, durante el cual las fuerzas de atracción universal no ejercen influencia alguna en la actividad vital de los organismos. Pero si tan sólo por un instante cesara la acción de las fuerzas electromagnéticas, desaparecería inmediatamente la vida.

En la interacción de las partículas dentro de los sistemas más pequeños de la naturaleza—en los núcleos atómicos—y entre los cuerpos cósmicos, las fuerzas electromagnéticas desempeñan una función importante, mientras que las interacciones fuertes y débiles sólo determinan los procesos a escalas muy

¹⁾ Las interacciones débiles producen principalmente transformaciones de las partículas elementales.



James Clerk Maxwell (1831-1879), eminente físico inglés, creador de la teoría del campo electromagnético. Sus ecuaciones para dicho campo sirven de base a toda la electrodinámica, lo mismo que las leyes de Newton sirven de base a la mecánica clásica. También fue uno de los fundadores de la teoría cinético-molecular de la estructura de la sustancia. Introdujo por vez primera en la física la idea de las leyes estadísticas, que utilizan el concepto matemático de la probabilidad.

pequeñas¹⁾, y las gravitatorias, únicamente a escalas cósmicas. La estructura de la capa atómica, el acoplamiento de los átomos en las moléculas (fuerzas químicas) y la formación de cantidades macroscópicas de una sustancia están determinadas exclusivamente por fuerzas electromagnéticas. Es difícil, casi imposible, citar fenómenos no relacionados con la acción de las fuerzas electromagnéticas.

A la creación de la electrodinámica condujo una larga cadena de sistemáticas investigaciones científicas y de descubrimientos casuales, que comienza con el descubrimiento de la propiedad del ámbar, frotado con seda, de atraer objetos livianos, y termina con la hipótesis del gran científico inglés James Clerk Maxwell acerca de que el campo magnético es engendrado por un campo eléctrico alternativo. Solamente en la segunda mitad del siglo XIX, después de creada la electrodinámica, comenzaron a utilizarse prácticamente en gran escala los fenómenos electromagnéticos. La invención de la radio por el físico ruso A.S. Popov es una de las más importantes aplicaciones de los principios de la nueva teoría.

En el desarrollo de la electrodinámica las investigaciones científicas precedieron por vez primera a las aplicaciones técnicas. Si la máquina de vapor fue creada mucho antes que la teoría de los procesos térmicos, la construcción del motor eléctrico o del receptor de radio sólo fue posible después del descubrimiento y del estudio de las leyes de la electrodinámica.

Las innumerables aplicaciones prácticas de los fenómenos electromagnéticos han transformado la vida humana en todo el ámbito de la Tierra. La civilización moderna es inconcebible sin la más amplia utilización de la energía de la corriente eléctrica.

Nuestra tarea consiste en estudiar las leyes fundamentales de las interacciones electromagnéticas y conocer los procedimientos principales de obtención de la energía eléctrica y de su utilización práctica.

¹⁾ Las interacciones fuertes se manifiestan a distancias del orden de 10^{-12} cm, y las débiles, a distancias aún más pequeñas, de 10^{-17} cm y menores.

8. Electrostática

8.1. Carga eléctrica y partículas elementales

Con los términos "electricidad", "carga eléctrica" y "corriente eléctrica" ya nos hemos encontrado muchas veces y estamos acostumbrados a ellos. Pero si se nos plantea la pregunta: "¿qué es la carga eléctrica?", vemos que responder a ella no es fácil. Esto se debe a que el concepto de carga es básico, primario, irreducible en el nivel actual de nuestros conocimientos a otros conceptos más simples y elementales.

Empecemos por intentar comprender qué se entiende por la siguiente afirmación: este cuerpo o partícula tiene carga eléctrica.

Sabemos que todos los cuerpos están formados por partículas pequeñísimas, indivisibles en otras más simples (en cuanto la ciencia conoce por ahora), que por eso se denominan elementales. Todas las partículas elementales tienen masa y, en virtud de esto, se atraen entre sí, de acuerdo con la ley de la atracción universal, con una fuerza que disminuye relativamente despacio, a medida que aumenta la distancia entre ellas, inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. La mayoría de las partículas elementales, pero no todas, tienen además la propiedad de interaccionar unas con otras con una fuerza, que también disminuye en proporción inversa al cuadrado de la distancia, pero que es un número enorme de veces mayor que la fuerza de gravitación. Así, en el átomo de hidrógeno, representado esquemáticamente en la fig. 91, el electrón es atraído por el núcleo (protón) con una fuerza 10^{39} veces mayor que la de la atracción gravitatoria.

Si las partículas accionan entre sí con fuerzas que disminuyen lentamente al aumentar la distancia y que son muchísimo mayores que la fuerza de gravitación universal, se dice que estas partículas tienen CARGA ELÉCTRICA. *Las propias partículas se llaman partículas cargadas.* Hay partículas sin carga eléctrica, pero *no existe carga eléctrica sin partícula.*

Las interacciones de las partículas cargadas reciben el nombre de ELECTROMAGNÉTICAS. La carga eléctrica es una magnitud física que determina la intensidad de las interacciones electromagnéticas, de un modo semejante a como la masa determina la intensidad de las interacciones gravitatorias.

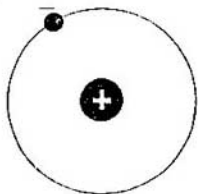


Fig. 91

La carga eléctrica de una partícula elemental no es un "mecanismo" especial contenido en la partícula, que se puede quitar de ella, descomponerlo en las partes que lo constituyen y volverlo a montar. La existencia de la carga eléctrica en el electrón y en otras partículas elementales indica que existen determinadas interacciones de fuerza entre ellas. Pero en esencia nada sabemos de la carga si desconocemos las leyes de estas interacciones. El conocimiento de las leyes de las interacciones debe incluirse en nuestra noción de carga. Estas leyes no son simples y exponerlas en pocas palabras es imposible. Por eso no se puede dar una definición escueta y suficientemente satisfactoria de lo que es la carga eléctrica.

DOS SIGNOS DE LAS CARGAS ELÉCTRICAS. Todos los cuerpos tienen masa y por eso se atraen entre sí. Pero los cuerpos cargados eléctricamente pueden tanto atraerse como repelerse. Este importante hecho, conocido por el curso de "Física 1" (Ed. MIR), significa que en la naturaleza hay partículas con cargas eléctricas de signos contrarios. Cuando los signos de las cargas de las partículas son iguales, éstas se repelen, y cuando son distintos, se atraen.

La carga de las partículas elementales—protones—que entran en la composición de todos los núcleos atómicos se llama positiva, y la de los electrones, negativa. Entre las cargas positivas y negativas no existen diferencias internas. Si los signos de las cargas se cambiaran entre sí, por esto no cambiaría nada el carácter de las interacciones electromagnéticas.

CARGA ELEMENTAL. Además de los electrones y los protones, existen varios tipos de partículas elementales cargadas. Pero sólo los electrones y los protones pueden existir en estado libre durante un tiempo ilimitado. Las demás partículas cargadas tienen un periodo de vida menor que una millonésima de segundo. Estas últimas partículas se generan durante los choques de las partículas elementales rápidas y, después de una existencia efímera, se desintegran transformándose en otras partículas. De estas partículas se tratará en el curso de "Física 4" (Ed. MIR).

A las partículas carentes de carga eléctrica pertenece el neutrón. Su masa sólo supera insignificadamente la masa del protón. Los neutrones, junto con los protones, entran en la composición del núcleo atómico.

Si una partícula elemental tiene carga, su valor, como han demostrado numerosos experimentos, está rigurosamente determinado (de uno de estos experimentos—el de Millikan e Ioffe—se habló en el texto "Física 1" (Ed. MIR).

Existe una carga mínima, denominada elemental, que poseen todas las partículas elementales. Las cargas de las partículas elementales sólo se diferencian por sus signos. Separar parte de la carga, por ejemplo, del electrón, es imposible.

8.2. Cuerpos cargados. Electrización de los cuerpos

Las fuerzas electromagnéticas desempeñan en la naturaleza un papel enorme, en virtud de que en la composición de

todos los cuerpos entran partículas eléctricamente cargadas. Las partes componentes de los átomos—los núcleos y los electrones—tienen carga eléctrica.

Las fuerzas electromagnéticas que existen entre las partículas cargadas son enormes. Sin embargo, la acción de las fuerzas electromagnéticas entre los cuerpos no se manifiestan directamente, porque los cuerpos en su estado ordinario son eléctricamente neutros. Es neutro el átomo de cualquier sustancia, ya que el número de electrones que hay en él es igual al número de protones que tiene su núcleo. Las partículas cargadas positiva y negativamente están ligadas entre sí por las fuerzas eléctricas y forman sistemas neutros.

Un cuerpo macroscópico está eléctricamente cargado cuando contiene una cantidad excesiva de partículas elementales con carga de un mismo signo. La carga negativa del cuerpo se debe al exceso de electrones, en comparación con el de protones, y la positiva, al defecto de electrones.

Para obtener un cuerpo macroscópico eléctricamente cargado, es decir, para ELECTRIZARLO, hay que separar parte de su carga negativa de la positiva ligada a ella ¹⁾. Esto se puede hacer por medio del rozamiento. Si con un peine se peinan cabellos secos, una pequeña parte de las partículas cargadas más móviles—electrones—pasan de los cabellos al peine y lo cargan negativamente, mientras que los cabellos se cargan positivamente.

IGUALDAD DE LAS CARGAS DURANTE LA ELECTRIZACIÓN.

Por medio de un experimento se puede demostrar que, durante la electrización por frotamiento, las cargas que adquieren ambos cuerpos tienen signo contrario, pero sus módulos son iguales. Tomemos un electrómetro ²⁾ a cuya varilla vaya sujeta una esfera metálica hueca y con un orificio, y dos láminas provistas de largos mangos: una de ebonita y otra de plexiglás. Si estas láminas se frotan una con otra, se electrizan. Una de las láminas la introducimos en la esfera sin tocar su pared. Si la lámina está cargada positivamente, parte de los electrones de la aguja y de la varilla del electrómetro es atraída por aquélla y se reúne en la superficie interior de la esfera. La aguja se carga positivamente en estas condiciones y es repelida por la varilla (fig. 92, a). Si en la esfera se introduce la otra lámina, después de sacar la primera, los electrones de la esfera y de la varilla serán repelidos por la lámina y se reunirán en exceso sobre la aguja. Esto hace que la aguja se desvíe precisamente el mismo ángulo que al hacer la primera prueba. Si dentro de la esfera se introducen las dos láminas a la vez, no se nota desviación alguna de la aguja (fig. 92, b). Esto indica que las cargas de las láminas tienen módulos iguales y signos contrarios.

¿Cómo se produce la electrización de los cuerpos? Para que dos cuerpos

¹⁾ Aquí y en adelante, para simplificar, vamos a hablar de "cargas", de "traslaciones de cargas", etc. En estos casos se tiene en cuenta en realidad "cuerpos (o partículas) cargados", "traslaciones de partículas cargadas", etc., ya que no existe carga sin partícula.

²⁾ La estructura del electrómetro se dará a conocer detalladamente en el § 8.18. Entre el principio que rige el funcionamiento del electrómetro y del electroscopio, del que se habló en el curso de "Física I" (Ed. MIR), no existen diferencias esenciales.

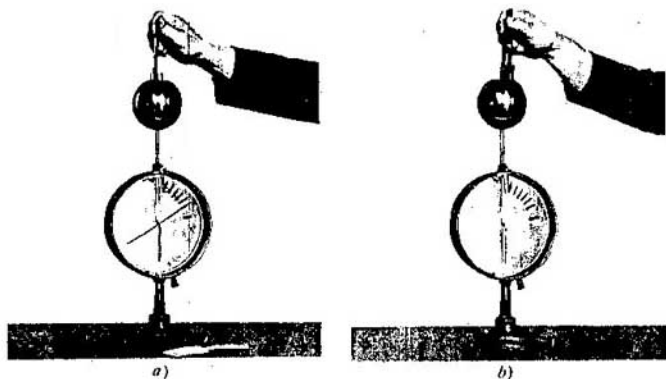


Fig. 92

se electricen tiene gran importancia que exista estrecho contacto entre ellos. Las fuerzas eléctricas retienen a los electrones dentro del cuerpo. Pero cuando se trata de distintas sustancias estas fuerzas son diferentes. Cuando el contacto entre los cuerpos es estrecho, una parte de los electrones de la sustancia, en la cual el enlace de éstos con el cuerpo es relativamente débil, pasa a la otra sustancia. El desplazamiento de los electrones en este caso no supera las dimensiones de las distancias interatómicas (10^{-8} cm). Pero si los cuerpos se separan, ambos estarán cargados.

Como las superficies de los cuerpos nunca son perfectamente lisas, el contacto estrecho necesario para el paso de los electrones entre los cuerpos sólo se establece en zonas pequeñas de las superficies (fig. 93). Si los cuerpos se frotan el uno con el otro, el número de zonas en estrecho contacto aumenta y con esto crece también el número de partículas cargadas que pasan de un cuerpo a otro.

ELECTRIZACIÓN DE LOS CUERPOS Y SU APLICACIÓN EN LA TÉCNICA. Una electrización considerable se produce cuando frotan tejidos sintéticos. Al quitarse una camisa de nilón, si el aire está seco, se escucha un chisporroteo característico. Entre las partes cargadas de las superficies que frotan saltan pequeñas chispas. Con fenómenos semejantes hay que

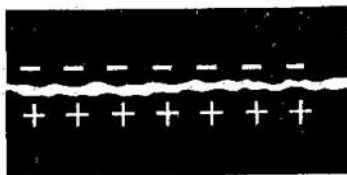


Fig. 93

habérselas en la producción. Así, en las fábricas textiles los hilos se electrizan a causa del rozamiento y son atraídos por los husos y por los rodillos y se rompen. Los hilos atraen el polvo y se ensucian. Hay que tomar medidas especiales contra la electrización de los hilos.

La electrización de los cuerpos en estrecho contacto se utiliza en las copadoras eléctricas (tipo "Era", "Xerox" y otras).

Así, en una de estas máquinas un polvo resinoso negro se mezcla con unos diminutos perdigones de vidrio. Los perdigones se cargan positivamente y las partículas de polvo, negativamente. La atracción hace que éstas recubran la superficie de los perdigones formando una tenue capa.

El texto o el dibujo a copiar se proyecta sobre una delgada placa de selenio, cuya superficie está cargada positivamente. Esta placa descansa sobre una superficie metálica cargada negativamente. Bajo la acción de la luz la placa se descarga, pero en los sitios correspondientes a las partes oscuras de la imagen se conserva la carga positiva. Luego se cubre la placa con una capa delgada de perdigones, y, en virtud de la atracción, las cargas negativas del polvo resinoso son atraídas por las partes de la placa cargadas positivamente. Seguidamente se sacuden los perdigones y, apretando una hoja de papel contra la placa, se obtiene sobre aquélla la copia. Ésta se fija por calentamiento.

8.3. Ley de conservación de la carga eléctrica

El experimento de la electrización de las láminas muestra que, durante la electrización por frotamiento, se produce una redistribución de las cargas existentes entre los cuerpos que eran neutros en el primer instante. Una pequeña parte de los electrones pasa de un cuerpo a otro. No aparecen nuevas partículas cargadas ni desaparecen las antes existentes. La suma algebraica de las cargas positivas y negativas es nula.

En la electrización de los cuerpos se cumple la LEY DE CONSERVACIÓN DE LA CARGA ELÉCTRICA. Esta ley es válida para un sistema en el cual no entran de fuera ni salen hacia fuera partículas cargadas, es decir, para un sistema cerrado. En todo sistema cerrado la suma algebraica de las cargas de todas las partículas permanece invariable:

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_N = \text{const.} \quad (8.1)$$

La ley de conservación de la carga tiene un profundo sentido. Si el número de partículas elementales cargadas no varía, el cumplimiento de la ley de conservación de la carga es evidente. Pero las partículas elementales pueden transformarse unas en otras, formarse y desaparecer generando nuevas partículas¹⁾. Sin embargo, en todos los casos las partículas cargadas sólo se forman por pares de igual módulo y signos de carga contrarios. Las partículas cargadas desaparecen, transformándose en neutras, también solamente por pares. En todos los casos la suma de las cargas del sistema aislado sigue siendo la misma.

La validez de la ley de conservación de la carga la confirman las observaciones hechas sobre un número enorme de transformaciones de

¹⁾ De esto se tratará detalladamente en el texto de "Física 4".

partículas elementales. Esta ley expresa una de las propiedades más fundamentales de la carga eléctrica.

La causa de que se conserve la carga aún se desconoce.

¿ ?

1. ¿Qué interacciones se llaman electromagnéticas?
2. ¿Qué es la carga elemental?
3. Ponga ejemplos, que haya observado en su vida cotidiana, de fenómenos provocados por la electrización de los cuerpos.
4. Una barra de ebonita, al electrizarla, se carga negativamente, ¿permanecerá constante la masa de aquélla?
5. Enuncie la ley de conservación de la carga eléctrica.
6. Aduzca ejemplos de fenómenos en los cuales se observa la conservación de la carga.

8.4. Ley fundamental de la electrostática—ley de Coulomb

Comenzamos el estudio de las leyes cuantitativas de las interacciones electromagnéticas. Primero vamos a considerar el caso más simple, en el cual los cuerpos eléctricamente cargados se hallan en reposo. *La parte de la electrodinámica dedicada al estudio de las cargas eléctricas en reposo se llama electrostática.* La ley fundamental de la electrostática, que es la ley de la interacción de dos cuerpos puntuales o partículas cargadas y en reposo, fue establecida empíricamente por el físico francés Ch. Coulomb en 1785 y lleva su nombre¹⁾.

Cuerpos puntuales cargados no existen. Pero si la distancia entre los cuerpos es muchas veces mayor que sus dimensiones, ni la forma ni las dimensiones de los cuerpos cargados influyen de modo notorio en la acción mutua entre ellos. En este caso los cuerpos se pueden considerar como puntuales. Recuérdese que la ley de la atracción universal también fue enunciada para cuerpos puntuales²⁾.

La fuerza de interacción de los cuerpos cargados depende de las propiedades del medio que hay entre ellos. Por ahora vamos a suponer que la interacción tiene lugar en el vacío. La experiencia demuestra que el aire influye muy poco en la fuerza de interacción de los cuerpos cargados; su influencia resulta ser casi la misma que si los cuerpos estuvieran en el vacío.

EXPERIMENTOS DE COULOMB. El descubrimiento de la ley de la

¹⁾ El primero en establecer esta ley fue el físico inglés H. Cavendish. Pero no publicó sus trabajos sobre electricidad. Cerca de cien años los manuscritos se encontraron en el archivo de la familia de Cavendish, hasta que por fin fueron publicados por Maxwell. Esto ocurrió muchos años después de que la ley de la interacción entre las cargas fuera establecida por Coulomb.

²⁾ Conociendo la ley de la interacción de los cuerpos puntuales cargados se puede calcular la fuerza de interacción de cualesquiera cuerpos cargados. Para esto los cuerpos se dividen mentalmente en elementos tan pequeños que cada uno se pueda considerar puntual. Sumando las fuerzas de interacción de todos estos elementos entre sí, se puede calcular la fuerza resultante de la interacción de los cuerpos.

Charles Augustin de Coulomb (1736-1806), científico francés conocido por sus trabajos sobre electricidad y magnetismo y por su investigación de las fuerzas de rozamiento. A la vez que estudió la interacción de los cuerpos cargados, investigó la interacción de los polos de los imanes largos.



interacción de las cargas eléctricas fue más fácil porque estas fuerzas son muy intensas. Para él no fue necesario utilizar aparatos muy sensibles como para comprobar la ley de la atracción universal en las condiciones de la Tierra. Valiéndose de una balanza de torsión se consiguió establecer cómo interaccionan entre si los cuerpos cargados en reposo. La balanza de torsión consta de una varilla de vidrio suspendida de un fino alambre elástico (fig. 94). En un extremo de la varilla está sujeta una esferita metálica *a*, y en el otro, un contrapeso *c*. Otra esferita metálica *b* está sujeta rigidamente en la tapa de la balanza.

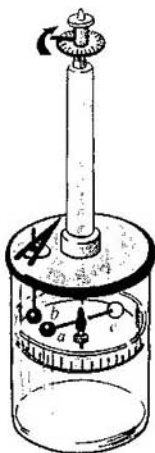


Fig. 94

Fig. 95



Si a las esferitas se les comunican cargas de igual signo, empiezan a repelerse una a otra. Para mantenerlas a una distancia fija hay que torcer cierto ángulo el alambre elástico. Por el ángulo de torsión del alambre se determina la fuerza de interacción de las esferitas.

La balanza de torsión dio la posibilidad de estudiar la dependencia de la fuerza de interacción de las esferas cargadas respecto de las cargas y de la distancia entre ellas. En aquel tiempo ya sabían medir la distancia y el tiempo. La única dificultad la ofrecía la carga, para cuya medición ni siquiera existía unidad. Coulomb halló un procedimiento sencillo para hacer 2, 4, etc., veces menor la carga de una de las esferitas, poniéndola en contacto con otra igual descargada. En estas condiciones, la carga se distribuye en partes iguales entre las esferitas y se consigue la disminución en una proporción conocida de la carga a investigar. El nuevo valor de la fuerza, correspondiente a la nueva carga, se determinaba experimentalmente.

LEY DE COULOMB. Los experimentos de Coulomb condujeron al establecimiento de una ley que recuerda asombrosamente a la de la atracción universal. La fuerza de interacción en el vacío de dos cuerpos puntuales en reposo cargados es directamente proporcional al producto de los módulos de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas¹⁾. A esta fuerza se le da el nombre de **COULOMBIANA**.

Si los módulos de las cargas se designan por $|q_1|$ y $|q_2|$, y la distancia entre ellas por r , la ley de Coulomb se puede escribir de la forma siguiente:

$$F = k \frac{|q_1| |q_2|}{r^2}, \quad (8.2)$$

donde k es un coeficiente de proporcionalidad, numéricamente igual a la fuerza con que interaccionan las cargas unitarias a una distancia igual a la unidad de longitud.

Esta misma forma la tiene la ley de la atracción universal: en vez de las cargas, en la fórmula de la ley de la atracción figuran las masas, y el papel del coeficiente k lo desempeña la constante de gravitación.

Hasta ahora nada se ha dicho acerca de la dirección de las fuerzas de interacción entre las cargas. Es fácil descubrir que dos bolitas cargadas, suspendidas de sendos hilos, se atraen o se repelen. De esto se sigue que las fuerzas de interacción de dos cuerpos puntuales en reposo, cargados eléctricamente, están dirigidas a lo largo de la recta que une dichos cuerpos (fig. 95). Estas fuerzas se llaman **CENTRALES**. De acuerdo con la tercera ley de Newton $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$.

El descubrimiento de la ley de Coulomb fue el primer paso concreto en el

¹⁾ Aquí y en adelante, en vez de "módulo de la fuerza", se dirá frecuentemente, para abreviar, sólo "fuerza".

estudio de las propiedades de la carga eléctrica. La existencia de carga eléctrica en los cuerpos o en las partículas elementales significa que aquéllos, o éstas, interaccionan de acuerdo con la ley de Coulomb.

8.5. Unidad de carga eléctrica

La unidad de carga eléctrica, lo mismo que las unidades de otras magnitudes físicas, se puede elegir arbitrariamente. Se trata, pues, de que la elección recaiga en la más conveniente.

Crear un patrón macroscópico de la unidad de carga eléctrica, a semejanza del patrón de longitud (el metro), es imposible debido a la inevitable fuga de carga. Sería natural tomar como unidad la carga del electrón (como en el presente se hace en la física atómica). Pero en los tiempos de Coulomb aún se desconocía la existencia y la naturaleza del electrón. La carga del electrón es, además, demasiado pequeña, por lo que utilizarla como unidad de carga no es siempre conveniente.

EL CULOMBIO, UNIDAD DE CARGA. En el sistema internacional de unidades (SI) la unidad de carga no es fundamental, sino derivada, y no se introduce patrón de ella. Junto al metro, el segundo y el kilogramo, en el SI se ha introducido una unidad fundamental para medir las magnitudes eléctricas, la unidad de intensidad de corriente, el AMPERIO. El valor patrón del amperio se establece por medio de las interacciones magnéticas de las corrientes. De esto se trató en el texto de "Física 1" (Ed. MIR).

La unidad de carga en el SI, el CULOMBIO, se establece valiéndose de la unidad de intensidad de corriente. 1 culombio (C) es la carga que pasa en 1 s por la sección transversal de un conductor cuando la intensidad de la corriente es de 1 A.

El coeficiente k de la ley de Coulomb, si ésta se escribe en unidades del SI, tiene la expresión $\text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$, ya que según (8.2)

$$k = \frac{Fr^2}{|q_1||q_2|}, \quad (8.3)$$

y la fuerza se mide en newtones; la distancia, en metros; la carga, en culombios. El valor numérico de este coeficiente se puede determinar empíricamente. Para esto basta medir la fuerza con que interaccionan dos cargas conocidas, situadas a una distancia entre sí dada, y sustituir, en la fórmula (8.3), F , r , $|q_1|$ y $|q_2|$ por sus valores. El valor de k que se obtiene es:

$$k = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2. \quad (8.4)$$

La carga igual a 1 C es muy grande. La fuerza con que interaccionan dos cargas puntuales de 1 C cada una, situadas entre sí a 1 km de distancia, es muy poco menor que la fuerza con que la Tierra atrae una carga de masa igual a 1 t. Por eso es imposible comunicar a un cuerpo pequeño (de un tamaño del orden de varios metros) la carga de 1 C. Las partículas cargadas, repeliéndose unas a otras, no se mantendrían en el cuerpo. No existe fuerza alguna en la naturaleza capaz, en estas condiciones, de compensar la

repulsión coulombiana. Pero en un conductor, que en total es neutro, poner en movimiento la carga de 1 C no es difícil. En efecto, en una lámpara eléctrica ordinaria de 100 W de potencia, con la tensión de 127 V se establece una corriente poco menor que 1 A. En este caso, durante 1 s pasa por la sección transversal del conductor una carga casi igual a 1 C.

La carga mínima que existe en la naturaleza es la carga de las partículas elementales. En unidades del SI el módulo de esta carga es:

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C.} \quad (8.5)$$

CONSTANTE ELÉCTRICA. El coeficiente k en el SI se puede escribir en la forma

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}. \quad (8.6)$$

La magnitud ϵ_0 (ϵ es una letra griega que se lee "épsilon") se denomina **CONSTANTE ELÉCTRICA**. Su valor es:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2}. \quad (8.7)$$

En adelante, para simplificar la escritura de las fórmulas, emplearemos en ellas casi siempre el coeficiente k , sin recurrir a su expresión (8.6).

¿ ?

1. ¿En qué se parecen y en qué difieren la ley de la atracción universal y la ley de Coulomb?
2. ¿Cómo se determina la unidad de carga en el SI?
3. Escriba la ley de Coulomb.
4. ¿A qué es igual el coeficiente k de la ley de Coulomb?
5. ¿A qué es igual la carga del electrón?

Ejemplos de resolución de problemas

Para resolver los problemas de aplicación de la ley de Coulomb se emplean los mismos procedimientos que se utilizaron para resolver los problemas de estática en el curso de mecánica de la "Física 2". Sólo hay que tener en cuenta que la dirección de las fuerzas de Coulomb depende de los signos de las cargas en los cuerpos que interaccionan. Además, en una serie de problemas se aplica la ley de conservación de la carga y el hecho de que la porción mínima de carga eléctrica (el módulo de la carga de una partícula elemental) es igual a $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

1. ¿Cuántos electrones hay en una gota de agua cuya masa $m = 0,03 \text{ g}$? La masa de la molécula de agua es $m_0 = 3 \cdot 10^{-23} \text{ g}$.

Solución. La molécula de agua H_2O contiene 10 electrones. En la gota hay $m/m_0 = 10^{21}$ moléculas y, por consiguiente, 10^{22} electrones.

2. Dos esferitas iguales están colgadas, por medio de sendos hilos de longitud $l = 2 \text{ m}$, de un mismo punto. Cuando a cada una de las esferitas se le comunica una

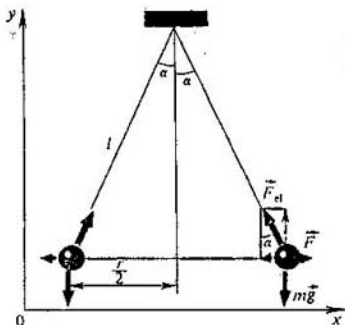


Fig. 96

carga $q = 2 \cdot 10^{-8}$ C, se separan entre sí, distando $r = 16$ cm. Determinar la tensión de cada hilo.

Solución. Sobre cada esferita actúan tres fuerzas: la de gravedad mg , la de elasticidad del hilo F_{el} y la de Coulomb F (fig. 96).

Cada esferita está en reposo; por lo tanto, la suma de las proyecciones de las fuerzas antedichas sobre los ejes Ox y Oy es nula. Para la suma de las proyecciones de las fuerzas sobre el eje Ox esta condición tiene la forma: $F - F_{el} \sin \alpha + mg \cos 90^\circ = 0$.

Como $\sin \alpha = r/2l$ y $F = kq^2/r^2$, será $F_{el} = F/\sin \alpha = F \cdot 2l/r = kq^2 \cdot 2l/r^3$; $F_{el} \approx 3,5 \cdot 10^{-3}$ N.

La fuerza de tensión del hilo es aproximadamente igual a $3,5 \cdot 10^{-3}$ N.

3. Tres cuerpos pequeños cargados eléctricamente están situados en línea recta. El cuerpo de carga $q_2 = 1,0 \cdot 10^{-8}$ C se halla entre el cuerpo de carga $q_1 = -3,0 \cdot 10^{-8}$ C (a la distancia $r_{12} = 0,4$ m de él) y el cuerpo de carga $q_3 = 5,0 \cdot 10^{-8}$ C (a la distancia $r_{23} = 0,6$ m del último). Hallar las resultantes de las fuerzas coulombianas aplicadas a cada cuerpo.

Solución. Los cuerpos primero y segundo se atraen por la ley de Coulomb con la fuerza

$$F_{12} = k \frac{|q_1| |q_2|}{r_{12}^2}.$$

Los cuerpos segundo y tercero se repelen con una fuerza cuyo módulo es:

$$F_{23} = k \frac{|q_2| |q_3|}{r_{23}^2}.$$

Los cuerpos primero y tercero se atraen con una fuerza de módulo

$$F_{31} = k \frac{|q_1| |q_3|}{(r_{12} + r_{23})^2}.$$

Consideremos las fuerzas de Coulomb que actúan sobre el primer cuerpo

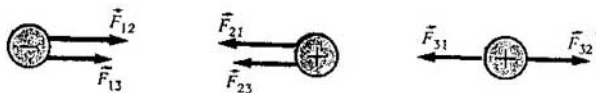


Fig. 97

(fig. 97). Estas fuerzas están dirigidas en el mismo sentido. Por consiguiente, el módulo de la fuerza resultante es igual a la suma de sus módulos:

$$F_1 = F_{12} + F_{13} = k|q_1| \left(\frac{|q_2|}{r_{12}^2} + \frac{|q_3|}{r_{13}^2} \right); F_1 \approx 30,1 \cdot 10^{-6} \text{ N.}$$

Las fuerzas coulombianas aplicadas al segundo cuerpo también están dirigidas en un mismo sentido (fig. 97), por lo tanto, el módulo de la fuerza resultante será:

$$F_2 = F_{12} + F_{23} = k|q_2| \left(\frac{|q_1|}{r_{12}^2} + \frac{|q_3|}{r_{23}^2} \right); F_2 \approx 2,94 \cdot 10^{-6} \text{ N.}$$

Las fuerzas aplicadas al tercer cuerpo están dirigidas en sentidos opuestos (fig. 97). La fuerza de atracción F_{31} por parte del primer cuerpo es mayor que la fuerza de repulsión F_{32} por parte del segundo. El módulo de la fuerza resultante es igual a la diferencia entre estas fuerzas. La fuerza resultante está dirigida en el sentido de la fuerza mayor y será:

$$F_3 = F_{13} - F_{23} = k|q_3| \left[\frac{|q_1|}{(r_{12} + r_{23})^2} - \frac{|q_2|}{r_{23}^2} \right]; F_3 \approx 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ N.}$$

Ejercicio

8

- Se sabe que una varilla de vidrio frotada con seda se carga positivamente. Determinar por vía experimental el signo de la carga de un bolígrafo frotado con lana.
- Dos cuerpos se pueden electrizar, aunque insignificadamente, si se ponen en estrecho contacto sin rozamiento. ¿Significa esto que se pueden obtener dos cuerpos cargados sin realizar trabajo?
- Determinar la fuerza de interacción del electrón con el núcleo en el átomo de hidrógeno, si la distancia entre ellos es igual a $0,5 \cdot 10^{-8}$ cm.
- ¿Cuántas veces mayor es la fuerza de Coulomb de la interacción del electrón con el núcleo en el átomo de hidrógeno que la fuerza de su interacción gravitatoria? La masa del electrón $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg y la masa del protón $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ kg. La constante de gravitación $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ N·m²/kg².
- ¿Con qué fuerza interaccionarían dos gotas de agua a la distancia de 1 km entre sí, si se consiguiera transferir a una de ellas el 1% de todos los electrones contenidos en la otra gota, cuya masa es de 0,03 g?
- Dos esferitas iguales se hallan a la distancia de 40 cm entre sí. La carga de una de ellas es $9 \cdot 10^{-9}$ C y la de la otra $-2 \cdot 10^{-9}$ C. Ponen las esferitas en contacto y después vuelven a separarlas a la misma distancia que antes. Hallar las fuerzas de su interacción antes y después de haberlas puesto en contacto.
- Dos cargas puntuales de $1,0 \cdot 10^{-8}$ y $2,0 \cdot 10^{-8}$ C, respectivamente,

están sujetas a 1 m de distancia entre sí, en el vacío. En la recta que une dichas cargas, y a igual distancia de cada una de ellas, se encuentra un cuerpo pequeño portador de una carga de $-3 \cdot 10^{-9}$ C. ¿Cuál será el módulo y la dirección de la fuerza que actúe sobre este cuerpo?

8.6. Acción próxima y acción a distancia

ACCIÓN PRÓXIMA. La ley de la interacción de las cargas eléctricas en reposo fue establecida empíricamente. Pero siguió sin resolver el problema de cómo se efectúa esta interacción.

Si observamos la acción de un cuerpo sobre otro situado a cierta distancia de él, antes de admitir que esta acción es directa nos sentimos inclinados a averiguar si entre dichos cuerpos existe algún enlace material: hilos, varillas, etc. Si existen estos enlaces, explicamos la acción de un cuerpo sobre el otro por medio de dichos eslabones intermedios. Así, cuando el conductor de un autobús antiguo, hoy casi desaparecido, giraba la palanca para abrir la puerta, las sucesivas partes de la varilla de enlace se comprimían, se ponían luego en movimiento y, por fin, se abría la puerta. En los autobuses modernos el conductor hace que la puerta se abra impulsando aire comprimido por unos tubos a un cilindro, que acciona el mecanismo de la puerta. Para este mismo fin se puede emplear un electroimán y hacer llegar a él la corriente por unos alambres.

En los tres casos de apertura de la puerta hay algo común: entre el conductor y la puerta existe una línea de unión continua, en cada uno de cuyos puntos se realiza cierto proceso físico. Por medio de este proceso, que se propaga de punto a punto, se produce la transmisión de la acción, y no instantáneamente, sino con determinada velocidad.

Así, la acción entre los cuerpos a distancia se puede explicar en muchos casos por la presencia de eslabones intermedios que transmiten aquélla. ¿No será razonable suponer que en aquellos casos en que no se observa ningún medio, ningún intermediario entre los cuerpos que interaccionan, existen ciertos eslabones intermedios? De lo contrario habría que admitir que el cuerpo actúa allí donde él no está.

A una persona que desconozca las propiedades del aire puede parecerle que la boca o las cuerdas vocales de su interlocutor actúan directamente sobre su oído y considerar que la transmisión del sonido por un medio invisible es algo totalmente incomprensible. No obstante, se puede seguir todo el proceso de propagación de las ondas sonoras y calcular su velocidad.

La suposición de que la acción mutua entre cuerpos separados uno de otro siempre se efectúa a través de eslabones (o de un medio) intermediarios, que transmiten dicha interacción de punto a punto, constituye la esencia de la teoría de la acción próxima.

Muchos científicos, partidarios de la teoría de la acción próxima, para explicar el origen de las fuerzas gravitatorias y electromagnéticas idearon fluidos imponderables, que rodeaban los planetas y los imanes, o atmósferas invisibles alrededor de los cuerpos electrizados. Estas reflexiones eran a veces muy ingeniosas, pero no aportaban nada a la ciencia.

ACCIÓN A DISTANCIA. Así continuaron las cosas hasta que Newton estableció la ley de la atracción universal, sin dar, no obstante, explicación alguna de su acción. Los éxitos en la investigación del sistema solar, que siguieron al descubrimiento de dicha ley, cautivaron de tal modo la imaginación de los científicos, que la mayoría de ellos empezaron a inclinarse a la idea de que la búsqueda de cualesquiera intermediarios transmisores de la interacción de un cuerpo a otro era totalmente innecesaria.

Surgió la teoría de la acción a distancia directamente a través del vacío. Según esta teoría la acción se transmite instantáneamente a distancias tan grandes como sea necesario. Los cuerpos son capaces de "sentir" la presencia mutua sin que haya medio alguno entre ellos. A los partidarios de la acción a distancia no les sorprendía la idea de la acción del cuerpo allí donde él no está. "¿Acaso no vemos—razonaban ellos—cómo un imán o una varilla electrizada atrae los cuerpos directamente a través del vacío?" Y, además, la fuerza de atracción del imán, por ejemplo, no varía apreciablemente si éste se envuelve en un papel o se coloca en una caja de madera. Es más, incluso si nos parece que la interacción de los cuerpos es producida por su contacto directo, esto no es así en realidad. Hasta en el contacto más íntimo entre los cuerpos o entre las partes de un cuerpo quedan pequeños intervalos. Por ejemplo, un peso colgado de un hilo no lo rompe, a pesar de que entre los átomos que forman el hilo no hay nada (fig. 98). La acción a distancia—según dicha teoría—es el único procedimiento de acción que se encuentra por doquier.

Las objeciones que se oponían a la teoría de la acción próxima eran bastante fuertes, tanto más si se tiene en cuenta que se apoyaban en los éxitos obtenidos por partidarios tan convencidos de la acción a distancia como Coulomb y Ampère, descubridores de las leyes de la interacción de las cargas y de las corrientes.

Si la ciencia se desarrollara rectilíneamente, el triunfo de la teoría de la acción a distancia hubiera estado al parecer asegurado. Pero en realidad el desarrollo de la ciencia sigue más bien una línea helicoidal. Después de recorrer una espira, la ciencia retorna aproximadamente a las mismas representaciones, pero ya a un nivel superior. Así ocurrió precisamente con

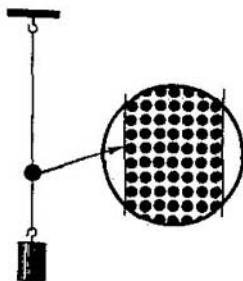


Fig. 98

el desarrollo de la teoría cinético-molecular. La hipótesis atómica de Demócrito fue abandonada para cierto tiempo por la mayoría de los científicos. Pero luego resurgió en forma matemática rigurosa y fue demostrada experimentalmente. Lo mismo sucedió con el desarrollo de la teoría de la acción próxima.

Los éxitos en el descubrimiento de las leyes de la interacción de las cargas y las corrientes eléctricas no estaban ligados indisolublemente con la representación de la acción a distancia. La investigación experimental de las propias fuerzas no presupone unas ideas determinadas acerca de cómo se transmiten dichas fuerzas. En primer lugar había que encontrar la expresión matemática de las fuerzas, su naturaleza ya se explicaría después.

8.7. Campo eléctrico

IDEAS DE FARADAY. El giro decisivo en las representaciones de la acción próxima fue iniciado por el gran científico inglés Michael Faraday y rematado definitivamente por Maxwell.

Según la teoría de la acción a distancia una carga "siente" directamente la presencia de otra. Si una de las cargas *A* (fig. 99) se desplaza, la fuerza que actúa sobre otra carga *B* cambia inmediatamente de valor. Al ocurrir esto, la carga *B* y el espacio que la circunda no sufren variación alguna.

De acuerdo con la idea de Faraday *las cargas eléctricas no actúan directamente una sobre otra. Cada una de ellas crea en el espacio que la rodea un campo eléctrico. El campo de una carga actúa sobre la otra carga y viceversa.* A medida que se aleja de la carga, el campo se debilita.

Al principio esta idea expresaba solamente la convicción de Faraday de que la acción de un cuerpo sobre otro a través del vacío es imposible.

Pruebas de la existencia del campo no existían. Estas pruebas eran imposibles de obtener estudiando únicamente la interacción de las cargas en reposo. El éxito de la teoría de la acción próxima se produjo después de estudiar las interacciones electromagnéticas de las partículas cargadas que se mueven. Primero se demostró la existencia de campos variables con el tiempo y luego se llegó a la conclusión de que el campo eléctrico de las cargas en reposo era una realidad.

VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LAS INTERACCIONES ELECTROMAGNÉTICAS. Basándose en las ideas de Faraday, Maxwell supo demostrar teóricamente que las interacciones electromagnéticas deben propagarse en el espacio con una velocidad finita.

Esto significa que si la carga *A* (fig. 99) se desplaza un poco, la fuerza que actúa sobre la carga *B* varía, pero no en el mismo instante, sino al cabo



Fig. 99



Michael Faraday (1791-1867), gran científico inglés, creador de la teoría general de los fenómenos electromagnéticos, en la cual todos los fenómenos se consideran desde un mismo punto de vista. Fue el primero en introducir las ideas de los campos eléctrico y magnético. "Allí donde los matemáticos veían centros de tensión de las fuerzas de acción a distancia, Faraday veía un agente intermediario. Donde ellos no veían nada, excepto la distancia, y se conformaban con hallar la ley de distribución de las fuerzas que actúan sobre los fluidos eléctricos (es decir, las cargas, desde el punto de vista actual), Faraday buscaba la esencia de los fenómenos reales que se desarrollan en el medio". (J. Maxwell).

de cierto tiempo:

$$t = \frac{|AB|}{c}, \quad (8.8)$$

donde $|AB|$ es la distancia entre las cargas, y c , la velocidad de propagación de las interacciones electromagnéticas. Maxwell halló que esta velocidad es igual a la velocidad de la luz en el vacío, es decir, de 300 000 km/s. Al trasladarse la carga A , el campo eléctrico que hay alrededor de la carga B varía al cabo de un tiempo t .

Por consiguiente, entre las cargas se desarrolla en el vacío cierto proceso, como resultado del cual la interacción entre ellas se propaga con una velocidad finita.

LA EXISTENCIA, EN EL ESPACIO ENTRE LOS CUERPOS QUE INTERACCIONAN, DE UN DETERMINADO PROCESO QUE DURA UN TIEMPO FINITO ES LO QUE DIFERENCIA PRINCIPALMENTE LA TEORÍA DE LA ACCIÓN PRÓXIMA DE LA TEORÍA DE LA ACCIÓN A DISTANCIA. Todos los demás argumentos en pro de una u otra teoría no se pueden considerar definitivos. Es cierto que el experimento para comprobar la igualdad (8.8), al desplazarse las cargas, es difícil de realizar a causa de que la velocidad c tiene un valor muy grande. Pero después de la invención de la radio esto no es necesario.

ONDAS RADIOELÉCTRICAS. La transmisión de informaciones por medio de ondas electromagnéticas recibe el nombre de radiocomunicación. Ahora sinceramente se puede leer en los periódicos que las ondas radioeléctricas procedentes de una estación espacial, que se aproxima a Venus, llegan a la Tierra al cabo de más de cuatro minutos. Dicha estación puede arder en la atmósfera del planeta, pero las ondas emitidas por ella seguirán aún mucho tiempo surcando el espacio. Así, pues, el campo electromagnético se manifiesta como algo que existe realmente.

¿QUÉ ES EL CAMPO ELÉCTRICO? Sabemos que el campo eléctrico

existe en realidad. Podemos estudiar sus propiedades experimentalmente. Pero no podemos decir de qué está formado este campo. Aquí hemos llegado al límite de lo que hoy conoce la ciencia.

Una casa está hecha de ladrillos, losas, etc. Estas piezas están constituidas a su vez por moléculas, y las moléculas por átomos. Los átomos lo están por partículas elementales. Hasta ahora no se conocen formaciones más simples que las partículas elementales. Así se encuentra el problema del campo eléctrico. No conocemos nada que sea más simple que el campo. Por eso, acerca de la naturaleza del campo eléctrico sólo se puede decir lo siguiente:

primero, el campo es material: existe independientemente de nosotros y de nuestros conocimientos acerca de él;

segundo, el campo posee determinadas propiedades que no permiten confundirlo con ninguna otra cosa del mundo que nos rodea. El establecimiento de estas propiedades nos da idea de lo que es el campo eléctrico.

Al estudiar el campo eléctrico nos encontramos con una forma especial de la materia, cuyo movimiento no se subordina a las leyes de la mecánica de Newton. Con el descubrimiento del campo eléctrico se manifestó por primera vez durante toda la historia de la ciencia una idea profunda: *existen diversas formas de la materia y cada una de ellas tiene sus propias leyes.*

PROPIEDADES FUNDAMENTALES DEL CAMPO ELÉCTRICO.

La propiedad fundamental del campo eléctrico es su acción sobre las cargas eléctricas con cierta fuerza. Por la acción sobre la carga se establece la existencia del campo, su distribución en el espacio y se estudian todas sus características.

El campo eléctrico de las cargas en reposo se llama ELECTROSTÁTICO. Este campo no varía con el tiempo. *El campo electrostático sólo es creado por las cargas eléctricas.* Existe en el espacio que rodea a dichas cargas y está ligado inseparablemente con ellas.

A medida que vayamos estudiando la electrodinámica iremos conociendo nuevas propiedades del campo. Conoceremos el campo eléctrico variable con el tiempo, que ya no está inseparablemente ligado con las cargas. Muchas propiedades de los campos estáticos y alternativos coinciden. No obstante, entre ellos existen diferencias esenciales. Al hablar de las propiedades del campo, llamaremos a éste simplemente eléctrico si la propiedad a que nos referimos es propia en igual medida tanto de los campos estáticos como de los alternativos.

8.8.

Intensidad del campo eléctrico.

Principio de la superposición de los campos

INTENSIDAD DEL CAMPO ELÉCTRICO. El campo eléctrico se manifiesta mediante las fuerzas que actúan sobre una carga. Se puede afirmar que conocemos acerca de un campo todo lo que nos hace falta, si nos es conocida la fuerza que actúa sobre una carga cualquiera en todo punto del campo.

Si en un mismo punto de un campo se colocan sucesivamente pequeños

cuerpos cargados y se miden las fuerzas, se pone de manifiesto que la fuerza que actúa sobre una carga por parte del campo es directamente proporcional a esta carga. Efectivamente, supongamos que el campo es creado por una carga puntual q_1 . Según la ley de Coulomb (8.2), sobre una carga q_2 actúa una fuerza proporcional a la carga q_2 . Por eso, la razón de la fuerza que actúa sobre la carga que se coloca en un punto dado del campo, a esta misma carga, para cada punto del campo, no depende de la carga y se puede considerar como característica del campo. Esta característica se denomina INTENSIDAD DEL CAMPO ELÉCTRICO. Lo mismo que la fuerza, la intensidad del campo es una magnitud vectorial. Se designa con la letra \vec{E} . Si la carga introducida en el campo se designa por q , en vez de q_2 , por definición, la intensidad será:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (8.9)$$

La intensidad del campo es igual a la razón de la fuerza con que el campo actúa sobre una carga puntual, a esta misma carga.

De aquí que la fuerza que actúa sobre la carga q por parte del campo eléctrico sea:

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (8.10)$$

El sentido del vector \vec{E} coincide con el de la fuerza que actúa sobre una carga positiva y es contrario al sentido de la fuerza que actúa sobre una carga negativa.

De acuerdo con la fórmula (8.9), la intensidad del campo en unidades del sistema SI se puede expresar en newtones por culombio (N/C).

INTENSIDAD DEL CAMPO DE UNA CARGA PUNTUAL. Hablemos la intensidad del campo eléctrico que crea una carga puntual q_0 . Por la ley de Coulomb, esta carga actuará sobre otra carga q con la fuerza

$$F = k \frac{|q||q_0|}{r^2}$$

El módulo de la intensidad del campo de la carga puntual q_0 a la distancia r de ella es:

$$E = \frac{F}{q} = k \frac{|q_0|}{r^2} \quad (8.11)$$

El vector intensidad, en cualquier punto del campo eléctrico, está dirigido a lo largo de la recta que une este punto y la carga, en el sentido de la carga al punto si $q_0 > 0$, y en el del punto a la carga si $q_0 < 0$ (fig. 100).

PRINCIPIO DE LA SUPERPOSICIÓN DE LOS CAMPOS. Si sobre un cuerpo actúan varias fuerzas, según las leyes de la mecánica, la fuerza resultante es igual a la suma geométrica de dichas fuerzas: $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots$

Sobre las cargas eléctricas actúan fuerzas por parte del campo eléctrico. Si al superponerse los campos de varias cargas estos campos no ejercen in-



Fig. 101

Fig. 100

fluencia alguna uno sobre otro, la fuerza resultante por parte de todos los campos debe ser igual a la suma geométrica de las fuerzas originadas por cada campo. Así precisamente ocurre en realidad. Esto significa que las intensidades de los campos se suman geoméricamente, ya que según (8.9), la intensidad es directamente proporcional a las fuerzas.

En esto consiste el PRINCIPIO DE LA SUPERPOSICIÓN DE LOS CAMPOS¹⁾. Este principio se enuncia así: si en un punto dado del espacio varias partículas cargadas crean campos eléctricos cuyas intensidades sean \vec{E}_1 , \vec{E}_2 , \vec{E}_3 , etc., la intensidad resultante en este punto será:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots \quad (8.12)$$

En virtud del principio de la superposición, para hallar la intensidad del campo de un sistema de partículas cargadas en cualquier punto, basta conocer la expresión (8.11) para la intensidad del campo de una carga puntual. En la fig. 101 se muestra cómo se determina la intensidad del campo \vec{E} creado por dos cargas puntuales: q_1 y q_2 .

8.9. Líneas de fuerza de un campo eléctrico

Podemos hacernos cierta idea de la distribución del campo si dibujamos los vectores intensidad del mismo en varios puntos del espacio (fig. 102). La figura será más clara si se dibujan líneas continuas cuyas tangentes en cada punto por que pasen coincidan con el vector intensidad. Estas líneas se conocen con el nombre de líneas de fuerza del campo eléctrico o LÍNEAS DE INTENSIDAD (fig. 103).

No debe pensarse que las líneas de intensidad son formaciones realmente existentes, semejantes a hilos o cordones elásticos tensos, como suponía el mismo Faraday. Estas líneas solamente ayudan a representar intuitivamente la distribución del campo en el espacio y no son más reales que los meridianos o paralelos sobre la esfera terrestre.

Sin embargo las líneas de fuerza se pueden hacer "visibles". Si cristallitos alargados de una sustancia aisladora (por ejemplo, la quinina, que se emplea

¹⁾ Del latín "superponere", añadir o poner una cosa encima de otra.

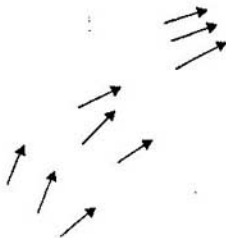


Fig. 102

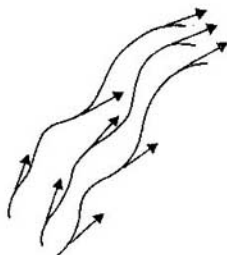


Fig. 103

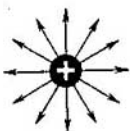


Fig. 104

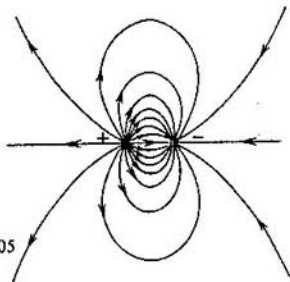


Fig. 105

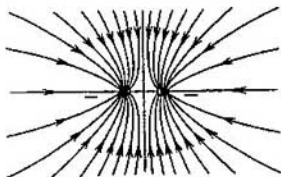


Fig. 106

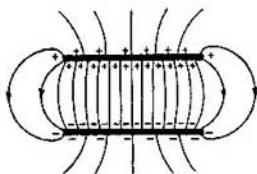


Fig. 107

como medicamento contra la malaria) se mezclan bien con un líquido viscoso (como, por ejemplo, el aceite de ricino) y en dicha mezcla se introducen cuerpos cargados, en las proximidades de ellos los cristallitos se "forman" en filas a lo largo de las líneas de intensidad.

En las figuras se dan los siguientes ejemplos de líneas de intensidad: de una esferita con carga positiva (fig. 104); de dos esferitas con cargas de signos contrarios (fig. 105); de dos esferitas con cargas del mismo signo (fig. 106), y de dos placas cuyas cargas tienen módulos iguales y signos contrarios (fig. 107). Este último ejemplo es particularmente importante. En la fig. 107 se ve que en el espacio entre las placas, lejos de los bordes de

éstas, las líneas de fuerza son paralelas: el campo eléctrico es aquí igual en todos los puntos.

Un campo eléctrico cuya intensidad es igual en todos los puntos del espacio se llama campo homogéneo (o uniforme). En una región limitada del espacio el campo eléctrico se puede considerar homogéneo aproximadamente si su intensidad dentro de dicha región varía de un modo insignificante.

Las líneas de fuerza del campo eléctrico no son cerradas; empiezan en las cargas positivas y terminan en las negativas¹⁾. Estas líneas son continuas y no se cortan, ya que su intersección significaría la ausencia de una dirección determinada de la intensidad del campo eléctrico en un punto dado. Como las líneas de fuerza empiezan o terminan en cuerpos cargados y después divergen en distintos sentidos (fig. 104), *la densidad de líneas es mayor en las proximidades de los cuerpos cargados, donde la intensidad del campo también es mayor.*

¿ ?

1. ¿En qué consiste la diferencia entre la teoría de la acción próxima y la teoría de la acción a distancia?
2. Enumere las propiedades principales del campo eléctrico.
3. ¿A qué se llama intensidad del campo eléctrico?
4. ¿A qué es igual la intensidad del campo de una carga puntual?
5. Enuncie el principio de la superposición.
6. ¿A qué se da el nombre de líneas de fuerza de un campo eléctrico?
7. Dibuje las líneas de fuerza de un campo eléctrico homogéneo.

8.10. Conductores en un campo electrostático

CARGAS LIBRES. En los conductores, a los cuales pertenecen en primer lugar los metales, hay partículas capaces de trasladarse dentro del conductor bajo la influencia de un campo eléctrico. Por esta razón, las cargas de estas partículas se denominan **CARGAS LIBRES**.

En los metales los portadores de las cargas libres son los electrones. Al formarse el metal de átomos neutros, éstos comienzan a interaccionar entre sí. En virtud de esta interacción, los electrones de las capas exteriores (periféricas) de los átomos pierden totalmente la ligazón con "sus" átomos y se convierten en "propiedad" de todo el conductor en conjunto. Como resultado, los iones, cargados positivamente, se encuentran rodeados de un "gas" cargado negativamente, formado por electrones "socializados" (fig. 108). Los electrones libres participan en el movimiento térmico, como las moléculas de un gas, y se pueden trasladar por el trozo de metal en cualquier dirección.

CAMPO ELECTROSTÁTICO DENTRO DE UN CONDUCTOR. La existencia de las cargas libres en el conductor hace que dentro de él sea nulo el campo electrostático. Si la intensidad del campo eléctrico fuera distinta de cero, el campo haría que las cargas libres se movieran ordenadamente, es

¹⁾ Las líneas de fuerza representadas en la fig. 104 también terminan en cargas negativas que se hallan en algún lugar lejano.

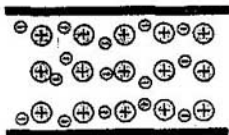


Fig. 108

decir, en el conductor existiría corriente eléctrica. La afirmación de que dentro de un conductor no existe campo eléctrico es correcta en igual medida para un conductor cargado y para un conductor no cargado, situado en un campo electrostático exterior¹⁾.

Basándonos en el ejemplo de una placa no cargada introducida en un campo homogéneo (fig. 109), vamos a aclarar a qué proceso se debe que la intensidad del campo electrostático dentro de un conductor sea nula. Bajo la acción del campo eléctrico los electrones de la placa comienzan a desplazarse de derecha a izquierda. En el primer instante (cuando el conductor se introduce en el campo) se produce una corriente eléctrica. La parte izquierda de la placa se carga negativamente y la derecha, positivamente. En esto consiste el fenómeno de la INDUCCIÓN ELECTROSTÁTICA. (Si la placa se dividiera en dos partes por la línea MN , ambas mitades estarían cargadas.) Las cargas aparecidas crean su campo (las líneas de intensidad de este campo se muestran en la fig. 110 por medio de rectas de trazos), el cual se superpone al campo exterior y lo compensa. En un tiempo infinitamente pequeño las cargas se redistribuyen de tal modo, que la intensidad del campo resultante dentro de la placa se anula y el movimiento de las cargas cesa. En el caso contrario por el conductor pasaría corriente durante todo el tiempo y se

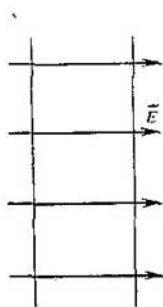


Fig. 109

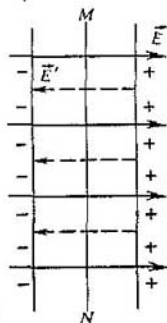


Fig. 110

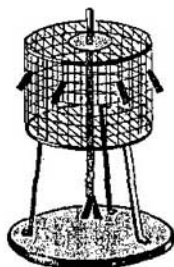


Fig. 111

¹⁾ Es natural que las partículas cargadas—electrones e iones—crean individualmente campos microscópicos. Pero estos campos se compensan mutuamente y el valor medio de la intensidad de su campo resulta ser nulo.

desprendería calor. Pero de acuerdo con la ley de conservación de la energía esto es imposible.

Así, pues, dentro del conductor no hay campo electrostático. En esto se funda la denominada PROTECCIÓN ELECTROSTÁTICA. Para proteger los aparatos sensibles al campo eléctrico, encierran éstos en cajas metálicas.

Las líneas de fuerza del campo electrostático fuera del conductor son perpendiculares a su superficie. Si esto no fuera así, existiría una componente de la intensidad del campo a lo largo de la superficie del conductor y por esta superficie pasaría corriente eléctrica.

CARGA ELÉCTRICA DE LOS CONDUCTORES. En el caso del equilibrio de las cargas dentro del conductor no sólo es nula la intensidad del campo, sino también la carga. *Toda la carga estática del conductor está concentrada en su superficie.* En efecto, si dentro del conductor hubiera una carga, en las proximidades de ella habría un campo. Pero dentro del conductor no hay campo electrostático. Por consiguiente, las cargas que hay en el conductor sólo se pueden encontrar en su superficie.

La ausencia de carga dentro del conductor se puede poner de manifiesto mediante sencillos experimentos, por ejemplo, con un cilindro de tela metálica (fig. 111). En la superficie de este cilindro se pegan tiras ligeras de papel de estaño. Dentro del cilindro, sobre una varilla conductora móvil, van sujetas otras dos tiras análogas. Si al cilindro se le comunica la carga procedente, por ejemplo, de una máquina electrostática, las tiras de papel de estaño se desvían cierto ángulo, ya que la carga llegada hasta ellas es repelida por la carga del mismo signo que tiene el cilindro o la tira contigua. Pero si las tiras de papel de estaño sujetas a la varilla se introducen en el cilindro, no se desvían, porque en ellas la carga será nula.

8.11. Intensidad del campo eléctrico de una esfera conductora cargada uniformemente y de un plano infinito

Determinemos la intensidad del campo eléctrico de cuerpos de forma simple, como la esfera y el plano, cargados. Forma aproximadamente esférica tienen muchos cuerpos en la naturaleza y en la técnica: los núcleos atómicos, las gotas de lluvia, los planetas, etc. Las superficies planas también se encuentran con frecuencia. Además, un trozo pequeño de cualquier superficie se puede considerar que aproximadamente es plano.

CAMPO DE UNA ESFERA. Consideremos una esfera conductora cargada cuyo radio sea R . La carga q está uniformemente repartida por toda la superficie de la esfera. Las líneas de fuerza del campo eléctrico, como se infiere de las razones de simetría, están dirigidas a lo largo de las prolongaciones de los radios de la esfera (fig. 112).

Fijese: las líneas de fuerza de la esfera se distribuyen en el espacio lo mismo que las líneas de fuerza de una carga puntual (fig. 113). Si coinciden las figuras de las líneas de fuerza cabe esperar que también coincidirán las

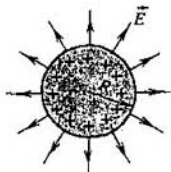


Fig. 112

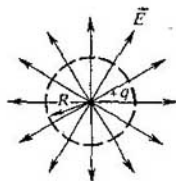


Fig. 113

intensidades de los campos. Por eso, a una distancia $r \geq R$ del centro de la esfera, la intensidad del campo se determina por la misma fórmula (8.11) que la intensidad del campo de una carga puntual que estuviera situada en el centro de la esfera:

$$E = k \frac{|q|}{r^2}. \quad (8.13)$$

A este resultado conducen también los cálculos rigurosos.

Dentro de la esfera conductora ($r < R$) la intensidad del campo es nula.

CAMPO DE UN PLANO. La distribución de la carga eléctrica por la superficie de un cuerpo cargado se caracteriza por medio de una magnitud especial: la densidad superficial de carga σ . Se llama *densidad superficial de carga* la razón de la carga al área de la superficie por la cual está distribuida. Si la carga q se distribuye uniformemente por una superficie, cuya área sea S , obtendremos

$$\sigma = \frac{q}{S}.$$

La unidad de densidad superficial de carga es el C/m^2 .

Por razones de simetría es evidente que las líneas de fuerza del campo eléctrico de un plano infinito cargado uniformemente son rectas perpendiculares al plano (fig. 114). El campo de un plano infinito es homogéneo, es decir, en todos los puntos del espacio, independientemente de su distancia al plano, la intensidad del campo es la misma. Dicha intensidad viene determinada por la densidad superficial de carga σ .

Para hallar la dependencia de la intensidad del campo respecto de la densidad superficial de carga σ se puede utilizar un método muy empleado en física, basado en el conocimiento de las denominaciones de las magnitudes físicas. La unidad de intensidad de campo eléctrico se denomina N/C y la unidad de densidad superficial de carga, C/m^2 .

Para obtener en este caso la denominación correcta de la unidad de intensidad de campo debemos suponer que la intensidad es directamente proporcional al producto del coeficiente k (véase 8.11) por la densidad superficial de carga σ : $E \sim k\sigma$. El coeficiente k tiene la denominación $(N \cdot m^2)/C^2$. Entonces la denominación de la unidad de intensidad será

$$\frac{N \cdot m^2}{C^2} \cdot \frac{C}{m^2} = \frac{N}{C}.$$

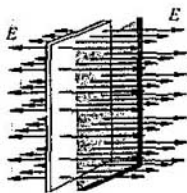


Fig. 114

El coeficiente de proporcionalidad sólo se puede hallar por medio de cálculos. Estos cálculos conducen al resultado siguiente:

$$E = k 2\pi |\sigma| \quad (8.14)$$

Planos infinitos no existen. Pero si las dimensiones de un plano son grandes, en comparación con la distancia desde el punto dado hasta él, la componente de la intensidad normal al plano en este punto será prácticamente igual a la intensidad del campo de un plano infinito.

8.12. Dieléctricos en un campo electrostático. Dos tipos de dieléctricos

Un aislador, o dieléctrico¹⁾, está constituido por átomos o moléculas neutras en conjunto. Las cargas eléctricas (o, más exactamente, las partículas eléctricamente cargadas: electrones y núcleos) están en el átomo neutro LIGADAS unas a otras y no pueden, como las cargas libres de un conductor, desplazarse bajo la acción de un campo por todo el volumen de la sustancia.

La diferencia entre la estructura de los conductores y los dieléctricos hace que éstos se comporten de distinto modo en un campo electrostático. El campo electrostático puede existir dentro del dieléctrico, en cuyo caso este último ejerce sobre aquél una influencia determinada.

Por medio de un simple experimento es posible cerciorarse de que un dieléctrico no cargado puede crear un campo eléctrico. En la fig. 115 se ve un electrómetro cargado, con un disco metálico en el extremo de la varilla. Si al disco de este electrómetro se aproxima un dieléctrico no cargado, por ejemplo, un vidrio grueso, la aguja indicadora del electrómetro se aproxima a la varilla (fig. 116). Esto sólo puede ocurrir si el dieléctrico introducido en el campo eléctrico del disco cargado crea él mismo un campo eléctrico. Este campo influye sobre la distribución de la carga en la varilla del electrómetro, disminuyendo la carga de la aguja y de la varilla y aumentando respectivamente la carga del disco.

¹⁾ Los cuerpos aisladores se llaman en física dieléctricos, del griego "diá", a través, y "eléctrico" (con el término "dieléctricos" se designan las sustancias a través de las cuales se transmiten las interacciones electromagnéticas).

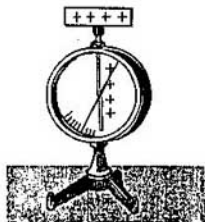


Fig. 115

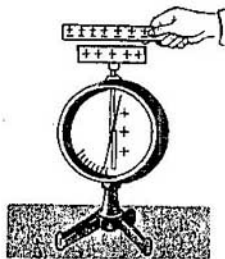


Fig. 116

PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LOS ÁTOMOS Y MOLÉCULAS NEUTROS. Para comprender cómo crea el campo eléctrico un dieléctrico sin carga hay que conocer previamente las propiedades eléctricas de los átomos y moléculas neutros.

Los átomos y las moléculas constan de partículas cargadas positivamente—núcleos—y de partículas cargadas negativamente—electrones. En la fig. 117 se representa el esquema del átomo más simple, el de hidrógeno. La carga positiva del átomo, es decir, la carga de su núcleo, está concentrada en el centro del átomo. El electrón se mueve en el átomo a gran velocidad. Una vuelta alrededor del núcleo la da en un tiempo muy pequeño, del orden de 10^{-15} s. Por eso, por ejemplo, en 10^{-9} s ya tiene tiempo de dar un millón de vueltas y, por consiguiente, de encontrarse un millón de veces en dos puntos cualesquiera 1 y 2 situados simétricamente con relación al núcleo. Esto da pie para suponer que, en promedio respecto del tiempo, el centro de la distribución de la carga negativa corresponde al punto medio del átomo, o sea, coincide con el núcleo, cargado positivamente.

Sin embargo, no siempre ocurre esto. Consideremos una molécula de sal común NaCl. El átomo de sodio tiene en su capa periférica un electrón de valencia, débilmente enlazado con el átomo. En el cloro hay siete electrones de valencia. Al formarse la molécula, el único electrón de valencia del sodio es capturado por el cloro. Los dos átomos neutros se convierten en un sistema de dos iones con cargas de signos opuestos (fig. 118). Las cargas positiva y negativa ya no están distribuidas simétricamente por el volumen de la molécula; el centro de la distribución de la carga positiva se encuentra en el ion de sodio, y el de la carga negativa, en el ion de cloro.

DIPOLO ELÉCTRICO. A una distancia grande de la molécula, ésta se puede considerar aproximadamente como un conjunto formado por dos cargas puntuales, de módulos iguales y signos opuestos, que se hallan a cierta distancia l una de otra (fig. 119). Este sistema de cargas neutro en conjunto recibe el nombre de **DIPOLO ELÉCTRICO**.

DOS TIPOS DE DIELECTRICOS. Los dieléctricos se pueden dividir en dos tipos:

POLARES, compuestos de moléculas en las cuales los centros de la distribución de las cargas positivas y negativas no coinciden, y

NEUTROS, constituidos por átomos o moléculas en los cuales los centros

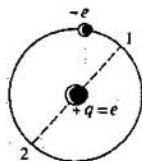


Fig. 117



Fig. 118

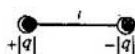


Fig. 119

de la distribución de las cargas positivas y negativas coinciden. A los dieléctricos polares pertenecen los alcoholes, el agua y otros, y a los neutros, los gases inertes, el oxígeno, hidrógeno, benzol, polietileno y otros.

8.13. Polarización de los dieléctricos. Permitividad

POLARIZACIÓN DE LOS DIELECTRICOS POLARES.

Un dieléctrico polar consta de moléculas que pueden considerarse como dipolos eléctricos. El movimiento térmico hace que los dipolos estén orientados caóticamente (fig. 120, *a*). A causa de esto en la superficie del dieléctrico, y en cualquier volumen de él, que contenga un gran número de moléculas (como el rectángulo destacado en la fig. 120, *a*), la carga eléctrica es nula en promedio. La intensidad del campo en el dieléctrico también es nula en promedio.

Coloquemos este dieléctrico entre dos placas metálicas paralelas, portadoras de cargas de signos opuestos. Si las dimensiones de las placas son mucho mayores que la distancia que las separa, el campo entre ellas será homogéneo (véase el § 8.9). Por parte de este campo actuarán sobre cada dipolo eléctrico dos fuerzas, de módulos iguales y signos opuestos (fig. 121). Éstas crean un momento de fuerzas que tiende a hacer girar el dipolo de forma que éste tome la dirección que tienen las líneas de fuerza del campo (fig. 122). Las cargas positivas se desplazan entonces en el sentido del campo eléctrico y las negativas, en sentido contrario.

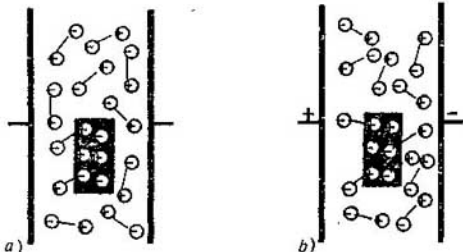


Fig. 120

a)

b)

Fig. 121

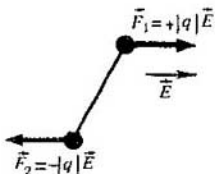
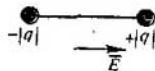


Fig. 122



El desplazamiento en sentidos opuestos de las cargas positivas y negativas enlazadas de un dieléctrico se denomina polarización.

El movimiento térmico caótico impide que se cree una orientación ordenada de todos los dipolos. Únicamente a temperatura igual a la del cero absoluto todos los dipolos se alinean a lo largo de las líneas de fuerza. De este modo, bajo la influencia del campo sólo se produce una orientación parcial de los dipolos eléctricos. Esto significa que, en promedio, el número de dipolos orientados a lo largo del campo es mayor que el número de dipolos orientados en sentido contrario al del campo. En la fig. 120, b se ve que: junto a la placa positiva, en la superficie del dieléctrico aparecen principalmente las cargas negativas de los dipolos, y junto a la placa negativa, las cargas positivas. Como resultado, en la superficie del dieléctrico surge una carga ligada. Dentro del dieléctrico las cargas positivas y negativas de los dipolos se compensan entre sí y la carga ligada media continúa siendo nula.

POLARIZACIÓN DE LOS DIELECTRICOS NEUTROS. Los dieléctricos neutros también se polarizan en un campo eléctrico. Bajo la acción del campo las cargas positivas y negativas de la molécula se desplazan en sentidos opuestos y los centros de la distribución de las cargas positivas y negativas dejan de coincidir, lo mismo que en la molécula polar. Las moléculas así deformadas se pueden considerar como dipolos eléctricos cuyos ejes están dirigidos a lo largo del campo. En las superficies del dieléctrico lindantes con las placas cargadas aparecen cargas ligadas, lo mismo que cuando se polariza un dieléctrico polar.

PERMITIVIDAD. Una carga ligada crea un campo eléctrico de intensidad \vec{E}_1 dirigido, dentro del dieléctrico, en sentido contrario al de la intensidad del campo exterior de las cargas de las placas (fig. 123). Por eso dentro del dieléctrico el campo se debilita. El grado de debilitación del campo depende de las propiedades del dieléctrico.

Para caracterizar las propiedades eléctricas de los dieléctricos se introduce una nueva magnitud cuyo nombre es PERMITIVIDAD.

La permitividad de un medio es la magnitud física que indica cuántas veces es menor la intensidad \vec{E} del campo eléctrico dentro del dieléctrico homogéneo, que la intensidad \vec{E}_0 del campo en el vacío.

Designando la permitividad por ϵ , tenemos que $\epsilon = E_0/E$.

Respectivamente, la intensidad del campo eléctrico de una carga puntual, de una esfera cargada y de un plano, situados en un dieléctrico homogéneo, será ϵ veces menor que en el vacío. Para la carga puntual y para la esfera, en

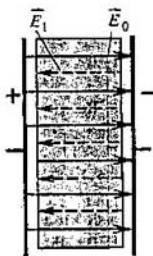


Fig. 123

vez de (8.13), valdrá la fórmula

$$E = k \frac{|q|}{\epsilon r^2}. \quad (8.15)$$

Y para el plano cargado situado en un dieléctrico homogéneo, en vez de (8.14), se cumplirá la fórmula

$$E = k \frac{2\pi |\sigma|}{\epsilon}. \quad (8.16)$$

La fuerza de interacción de las cargas puntuales que se encuentran en un dieléctrico homogéneo también decrece ϵ veces a causa de la disminución de la intensidad del campo. La ley de Coulomb para las cargas situadas en un dieléctrico homogéneo se escribe en la forma

$$F = k \frac{|q_1| |q_2|}{\epsilon r^2}. \quad (8.17)$$

Así, pues, las fuerzas de interacción entre dos cuerpos cargados, a diferencia de las fuerzas de la atracción universal, dependen de las propiedades del medio en que éstos se encuentran.

¿ ?

1. ¿A qué es igual la intensidad del campo dentro de un conductor en el caso de equilibrio de las cargas?
2. ¿Cómo se distribuye por el conductor la carga que se le comunica?
3. ¿A qué es igual la intensidad del campo de una esfera conductora cargada?
4. ¿A qué es igual la intensidad del campo de un plano cargado uniformemente?
5. ¿Qué dieléctricos se llaman polares y cuáles neutros?
6. ¿A qué se llama polarización de un dieléctrico?
7. ¿Qué es la permitividad?

8.14. Energía potencial de un cuerpo cargado en un campo electrostático homogéneo

ENERGÍA ELÉCTRICA. Por el curso de mecánica sabemos que los cuerpos que interactúan mediante las fuerzas gravitatorias poseen energía potencial. La ley de Coulomb para la in-

teracción de los cuerpos eléctricamente cargados tiene la misma forma matemática que la ley de la atracción universal. De aquí se puede concluir que UN SISTEMA DE CUERPOS CARGADOS ELÉCTRICAMENTE también POSEE ENERGÍA POTENCIAL. Esto significa que el sistema de cuerpos cargados eléctricamente es capaz de realizar un trabajo determinado. Por ejemplo, este trabajo se realiza cuando se repelen entre sí las hojas cargadas de un electroscope.

La energía potencial de los cuerpos cargados eléctricamente se llama ELÉCTRICA O DE COULOMB.

La energía de interacción de los electrones con el núcleo en el átomo y la energía de interacción de los átomos entre sí en las moléculas (energía química) son en lo fundamental energía eléctrica. Una energía eléctrica enorme se halla concentrada dentro del núcleo atómico. Precisamente a costa de esta energía se desprende el calor durante el funcionamiento del reactor nuclear en las centrales eléctricas atómicas.

Desde el punto de vista de la teoría de la acción próxima, sobre la carga actúan directamente no las otras cargas, sino el campo eléctrico que ellas crean. Cuando una carga se desplaza, es precisamente la fuerza que por parte del campo actúa sobre ella la que realiza el trabajo. (En adelante, para simplificar, diremos trabajo del campo.) Por eso se puede hablar no sólo de energía de un sistema de partículas cargadas, sino también de la energía potencial de un cuerpo individual cargado en un campo eléctrico.

Hallemos la energía potencial de una carga en un campo eléctrico homogéneo.

TRABAJO DE TRASLACIÓN DE UNA CARGA EN UN CAMPO HOMOGÉNEO. El campo homogéneo lo crean, por ejemplo, dos placas metálicas grandes con cargas eléctricas de signos contrarios. Este campo actúa sobre la carga q con una fuerza constante $\vec{F} = q\vec{E}$, de un modo semejante a como la Tierra actúa con la fuerza constante $\vec{F} = m\vec{g}$ sobre una piedra que se encuentre cerca de su superficie. Supongamos que las placas están dispuestas verticalmente (fig. 124), estando cargada negativamente la placa izquierda B y positivamente la placa derecha D . Calculemos el trabajo que realiza el campo cuando la carga q se traslada del punto 1, que se encuentra a la distancia d_1 de la placa B , al punto 2, situado a la distancia $d_2 < d_1$ de la misma placa. Los puntos 1 y 2 se hallan en una misma línea de fuerza.

En el trozo de camino $\Delta d = d_1 - d_2$ el campo eléctrico realiza el trabajo

$$A = qE(d_1 - d_2). \quad (8.18)$$

Este trabajo no depende de la forma de la trayectoria.

La demostración correspondiente, referida a la fuerza constante de la gravedad $m\vec{g}$ se dio en el texto de "Física 2" (Ed. MIR) y no hay necesidad de repetirla para la fuerza constante $q\vec{E}$. Aquí tiene importancia el hecho de que la fuerza sea constante, y no su origen.

ENERGÍA POTENCIAL. Si el trabajo no depende de la forma de la trayectoria del movimiento del cuerpo, dicho trabajo es igual a la variación de

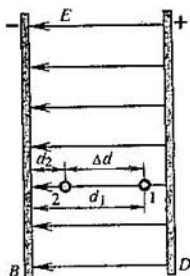


Fig. 124

la energía potencial del cuerpo, tomada con signo contrario. (De esto se trató detalladamente en el curso de "Física 2".)

En efecto,

$$\begin{aligned}
 A &= qE(d_1 - d_2) = -(qEd_2 - qEd_1) = -(W_{p2} - W_{p1}) = \\
 &= -\Delta W_p,
 \end{aligned}$$

donde

$$\underline{W_p = qEd} \tag{8.19}$$

es la energía potencial de la carga q que se encuentra en el campo eléctrico homogéneo a la distancia d de la placa.

La fórmula (8.19) es semejante a la $W_p = mgh$ de la energía potencial de un cuerpo sobre la superficie de la Tierra. Pero la carga q , a diferencia de la masa, puede ser tanto positiva como negativa. Si $q < 0$, la energía potencial (8.19) es negativa¹⁾.

Si el campo realiza trabajo positivo, la energía potencial del cuerpo cargado que se encuentra en el campo, disminuye: $\Delta W_p < 0$. Al mismo tiempo, de acuerdo con la ley de conservación de la energía, aumenta la energía cinética. En esto se basa la aceleración de los electrones por el campo eléctrico en los tubos electrónicos, en los tubos catódicos de televisión, etc. Y al contrario, si el trabajo es negativo (por ejemplo, si una partícula cargada positivamente se mueve en sentido contrario al de la intensidad \vec{E} ; este movimiento es semejante al de una piedra lanzada hacia arriba), $\Delta W_p > 0$. La energía potencial crece y la cinética disminuye: la partícula se decelera.

En una trayectoria cerrada, en la que la carga retorna al punto inicial 1 , el trabajo del campo es nulo:

$$A = -\Delta W_p = -(W_{p1} - W_{p1}) = 0.$$

¹⁾ Además, si el sentido de la fuerza de la gravedad no podemos cambiarlo, el del campo eléctrico es muy fácil de variar cambiando los signos de las cargas de las placas B y D . Al hacer esto, en la expresión de la energía potencial (8.19) aparece el signo menos.

NIVEL CERO DE LA ENERGÍA POTENCIAL. La energía potencial (8.19) es nula en la superficie de la placa B . Esto significa que el nivel cero de la energía potencial coincide con la placa B . Pero, lo mismo que en el caso de las fuerzas de gravedad, el nivel cero de la energía potencial se elige arbitrariamente. Se puede considerar que $W_p = 0$ a la distancia d_2 de la placa B . Entonces

$$W_p = qEd - qEd_2.$$

Tiene sentido físico no la energía potencial misma, sino la diferencia de sus valores, la cual queda determinada por el trabajo del campo al trasladar una carga desde la posición inicial hasta la final.

8.15. Potencial de un campo electrostático y diferencia de potencial

CAMPOS DE POTENCIAL. Se puede demostrar que el trabajo de un campo electrostático cualquiera al trasladar un cuerpo cargado de un punto a otro no depende de la trayectoria, lo mismo que el trabajo de un campo homogéneo. En una trayectoria cerrada el trabajo del campo electrostático es siempre nulo. Los campos que poseen esta propiedad reciben el nombre de campos de **POTENCIAL**. Tiene carácter de potencial, en particular, el campo electrostático de una carga puntual.

El trabajo de un campo de potencial se puede expresar por medio de la variación de la energía potencial. La fórmula $A = -(W_{p2} - W_{p1})$ es correcta para cualquier campo electrostático. Pero únicamente en el caso de un campo homogéneo la energía viene expresada por la fórmula (8.19).

POTENCIAL. La energía potencial de una carga en un campo electrostático es proporcional a la carga. Esto es válido tanto para el campo homogéneo (véase la fórmula 8.19) como cualquier otro campo. Por consiguiente, *la razón de la energía potencial a la carga no depende de la carga situada en el campo.*

Esto da la posibilidad de introducir una nueva característica cuantitativa del campo, el **POTENCIAL**. Se llama potencial de un campo electrostático la razón de la energía potencial de la carga en el campo a dicha carga.

Según esta definición el potencial es:

$$\varphi = \frac{W_p}{q}. \quad (8.20)$$

La intensidad del campo \vec{E} es un vector que representa la característica de fuerza del campo; esta característica determina la fuerza que actúa sobre la carga q en un punto dado del campo. El potencial φ es un escalar que sirve de característica energética del campo; este escalar determina la energía potencial de la carga q en un punto dado del campo.

Si como nivel cero de la energía potencial y , por lo tanto, del potencial, se toma la placa cargada negativamente (fig. 124), de acuerdo con las fór-

mulas (8.19 y 8.20), el potencial del campo homogéneo es:

$$\varphi = \frac{W_p}{q} = Ed. \quad (8.21)$$

DIFERENCIA DE POTENCIAL. De un modo semejante a la energía potencial, el valor del potencial en un punto dado depende del nivel cero que se elija como referencia del potencial. En la práctica tiene importancia no el potencial mismo en un punto, sino la variación del potencial, que no depende del nivel cero que se elija como referencia del potencial.

Como la energía potencial $W_p = q\varphi$, el trabajo será:

$$A = -(W_{p2} - W_{p1}) = -q(\varphi_2 - \varphi_1) = -q\Delta\varphi. \quad (8.22)$$

En adelante, en vez de la variación del potencial $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$, que representa la diferencia de los valores del potencial en los puntos final e inicial de la trayectoria, emplearemos otra magnitud, la **DIFERENCIA DE POTENCIAL**. Se entiende por diferencia de potencial la diferencia entre los valores del potencial en los puntos inicial y final de la trayectoria:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = -\Delta\varphi. \quad (8.23)$$

La diferencia de potencial también suele llamarse **TENSIÓN**.

Con la diferencia de potencial o tensión U es más conveniente operar que con la variación del potencial $\Delta\varphi$, sobre todo cuando se estudia la corriente eléctrica.

De acuerdo con las fórmulas (8.22) y (8.23), la diferencia de potencial

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = -\Delta\varphi = \frac{A}{q}. \quad (8.24)$$

Por lo tanto, la diferencia de potencial (tensión) entre dos puntos es igual a la razón del trabajo realizado por el campo, en trasladar la carga del punto inicial al final, a esta misma carga.

Conociendo la tensión en una red de alumbrado, sabemos al mismo tiempo el trabajo que el campo eléctrico puede realizar al trasladar una carga unitaria desde un contacto del tomacorriente hasta el otro por cualquier circuito eléctrico. Con el concepto de diferencia de potencial nos encontraremos durante todo el curso de física.

UNIDAD DE DIFERENCIA DE POTENCIAL. La unidad de diferencia de potencial se establece por medio de la fórmula (8.24). En el sistema internacional de unidades (SI) el trabajo se expresa en julios y la carga en culombios. Por eso la diferencia de potencial entre dos puntos será igual a la unidad, si para trasladar la carga de 1 C desde un punto hasta otro el campo eléctrico realiza el trabajo de 1 J. Esta unidad se llama voltio (V). $1 \text{ V} = 1 \text{ J/1 C}$.

¿ ?

1. ¿Qué campos se llaman de potencial?
2. ¿Cómo está relacionada la variación de la energía potencial con el trabajo?
3. ¿A qué es igual la energía potencial de una partícula cargada en un campo eléctrico homogéneo?

4. Defina el potencial.
 5. ¿A qué es igual la diferencia de potencial entre dos puntos de un campo?
-

8.16. Potencial del campo electrostático de una carga puntual

La deducción de la fórmula del potencial del campo eléctrico de una carga puntual q , en dependencia de la distancia r , es bastante complicada y no vamos a detenernos en ella. La intensidad del campo de la carga puntual disminuye con la distancia y para hallar el potencial hay que calcular el trabajo de la fuerza de Coulomb variable.

La expresión del potencial del campo de una carga puntual tiene la forma

$$\varphi = k \frac{q}{er}. \quad (8.25)$$

Es evidente que el potencial de los puntos del campo de una carga positiva ($q > 0$) será también positivo ($\varphi > 0$), y el de una carga negativa ($q < 0$), negativo ($\varphi < 0$).

La fórmula (8.25) corresponde a una elección determinada del nivel cero del potencial. Se considera que el potencial de los puntos del campo infinitamente alejados de la carga es nulo: cuando $r \rightarrow \infty$, $\varphi \rightarrow 0$. Esta elección del nivel cero es conveniente, pero no obligatoria. Al potencial (8.25) se le podría añadir cualquier magnitud constante. Con esto la diferencia de potencial entre dos puntos cualesquiera del campo no variaría, y precisamente es ella la que tiene importancia práctica.

Si se toma como nulo el potencial de los puntos infinitamente alejados, el potencial del campo de una carga puntual tendrá un sentido físico simple. Haciendo en la fórmula (8.24) la sustitución $\varphi_2 = 0$, se obtiene:

$$\varphi_1(r) = \frac{A}{q}.$$

Por consiguiente, el potencial del campo electrostático a la distancia r de la carga puntual será numéricamente igual al trabajo que realiza el campo en trasladar la carga unitaria positiva desde el punto dado del espacio hasta un punto infinitamente alejado.

La fórmula (8.25) es válida también para el potencial del campo de una esfera cargada uniformemente a distancias mayores o iguales que su radio, ya que el campo de la esfera cargada uniformemente, fuera de ella y en su superficie, coincide con el campo de una carga puntual situada en el centro de la esfera.

Hemos estudiado el potencial del campo de una carga puntual. La carga de un cuerpo cualquiera se puede dividir mentalmente en elementos tan pequeños que cada uno de ellos sea una carga puntual. Entonces el potencial del campo en un punto arbitrario se determina como la suma algebraica de

los potenciales creados por las cargas puntuales individualmente, φ_1 , φ_2 , φ_3 , etc.

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \dots \quad (8.26)$$

Esta relación es consecuencia del principio de la superposición de los campos.

ENERGÍA POTENCIAL DE LA INTERACCIÓN DE DOS CARGAS PUNTALES. Conociendo la expresión del potencial del campo de una carga puntual, se puede calcular la energía potencial de la interacción de dos cargas puntuales. Esta puede ser, en particular, la energía con que interacciona un electrón con el núcleo atómico.

La energía potencial de una carga q_2 en el campo eléctrico de la carga puntual q_1 es igual al producto de la carga q_2 por el potencial $\varphi(q_1)$ del campo de la carga q_1 : $W_p = q_2\varphi(q_1)$.

Aplicando la fórmula (8.25) se obtiene la expresión de la energía:

$$W_p = q_2\varphi(q_1) = k \frac{q_1 q_2}{cr}$$

Si las cargas q_1 y q_2 tienen signos iguales, la energía potencial de su interacción será positiva. Esta energía será tanto mayor cuanto menor sea la distancia entre las cargas, ya que el trabajo que pueden realizar las fuerzas de Coulomb para repeler las cargas entre sí será mayor. Si las cargas tienen signos contrarios, la energía será negativa y su valor máximo, igual a cero, lo alcanzará cuando $r \rightarrow \infty$. Cuanto mayor sea r tanto mayor será el trabajo que tengan que realizar las fuerzas de atracción para acercar las cargas.

8.17. Relación entre la intensidad del campo eléctrico y la diferencia de potencial. Superficies equipotenciales

Entre la intensidad del campo eléctrico y la diferencia de potencial existe una dependencia determinada. Sea una carga q que se desplace en el sentido de la intensidad del campo homogéneo \vec{E} desde un punto 1 hasta otro punto 2, que se encuentre a la distancia Δd del punto 1 (fig. 125). El campo eléctrico realizará el trabajo

$$A = qE \Delta d.$$

Este trabajo, según la fórmula (8.24), se puede expresar por medio de la diferencia de potencial entre los puntos 1 y 2:

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU. \quad (8.27)$$

Igualando entre sí las expresiones del trabajo, hallamos el módulo del vector intensidad de campo:

$$E = \frac{U}{\Delta d}. \quad (8.28)$$

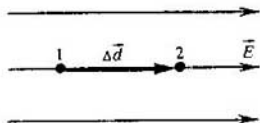


Fig. 125

En esta fórmula U es la diferencia de potencial entre los puntos 1 y 2, que están ligados por el vector de traslación Δd , cuyo sentido coincide con el del vector \vec{E} (fig. 125).

La fórmula (8.28) muestra que cuanto menos varía el potencial a la distancia Δd , tanto menor es la intensidad del campo eléctrico. Si el potencial no varía en absoluto, la intensidad del campo es nula.

Como durante la traslación de una carga positiva en el sentido del vector \vec{E} el campo eléctrico realiza el trabajo positivo $A = q(\varphi_1 - \varphi_2)$, el potencial φ_1 es mayor que el potencial φ_2 . Por consiguiente, *la intensidad del campo eléctrico está dirigida en el sentido en que disminuye el potencial.*

Todo campo eléctrico en una pequeña región del espacio se puede considerar homogéneo. Por eso la fórmula (8.28) es válida para cualquier campo eléctrico, si la distancia Δd es tan pequeña que la variación de la intensidad del campo en esta distancia se puede despreciar.

UNIDAD DE INTENSIDAD DE CAMPO ELÉCTRICO. La unidad de intensidad de campo eléctrico en unidades del SI se establece basándose en la unidad de diferencia de potencial y utilizando la fórmula (8.28). La intensidad del campo eléctrico es igual a la unidad si la diferencia de potencial entre dos puntos situados a 1 m de distancia en un campo homogéneo es igual a 1 V. Esta unidad recibe el nombre de **VOLTIO POR METRO** (V/m).

Como ya se ha dicho, la intensidad se puede expresar también en newtones por culombio. Efectivamente,

$$1 \frac{\text{V}}{\text{m}} = 1 \frac{\text{J}}{\text{C}} \cdot \frac{1}{\text{m}} = 1 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{C}} \cdot \frac{1}{\text{m}} = 1 \frac{\text{N}}{\text{C}}.$$

SUPERFICIES EQUIPOTENCIALES. Cuando una carga se desplaza formando un ángulo de 90° con las líneas de fuerza, el campo no realiza trabajo, ya que la fuerza es perpendicular a la traslación. Por lo tanto, si se hace pasar una superficie perpendicular en cada punto a las líneas de fuerza, al trasladar una carga por esta superficie no se realiza trabajo. Esto a su vez significa que *todos los puntos de una superficie perpendicular a las líneas de fuerza tienen el mismo potencial.* Las superficies de igual potencial se llaman equipotenciales.

Las superficies equipotenciales de un campo homogéneo son planos (fig. 126), y las del campo de una carga puntual, esferas concéntricas (fig. 127). Las superficies equipotenciales del campo de un dipolo se representan en la fig. 128.

De un modo semejante a las líneas de fuerza, las superficies equipotenciales caracterizan cualitativamente la distribución del campo en el espacio. El vector intensidad es perpendicular a las superficies equi-

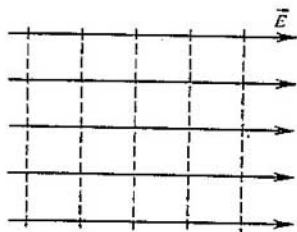


Fig. 126

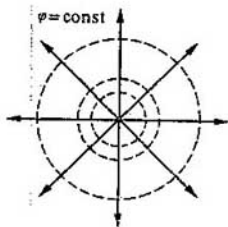


Fig. 127

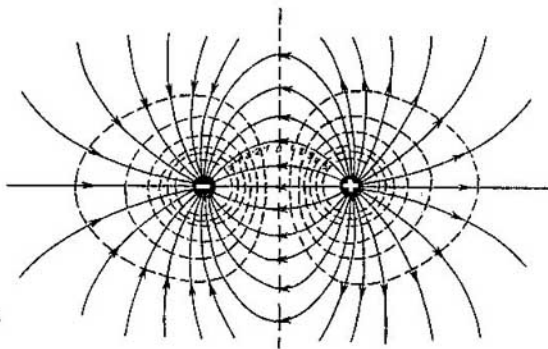


Fig. 128

potenciales y está dirigido en el sentido en que el potencial disminuye. Así, por ejemplo, el potencial del campo de una carga puntual positiva disminuye a medida de alejarse de la carga, y la intensidad del campo está dirigida, desde la carga, a lo largo de los radios de las esferas concéntricas (fig. 127).

Es equipotencial la superficie de cualquier conductor en un campo electrostático, porque las líneas de fuerza de éste son perpendiculares a la superficie del conductor. Y no sólo la superficie, sino todos los puntos dentro del conductor tienen el mismo potencial. La intensidad del campo dentro del conductor es nula, por consiguiente, es nula también la diferencia de potencial entre cualesquiera puntos del conductor.

8.18. Medida de la diferencia de potencial

Para medir la diferencia de potencial se utiliza un aparato llamado ELECTRÓMETRO. En la fig. 129 se representa uno de los electrómetros más simples. Su parte fundamental es una aguja liviana, de aluminio, sujeta a una varilla por medio de un eje horizontal. El centro de

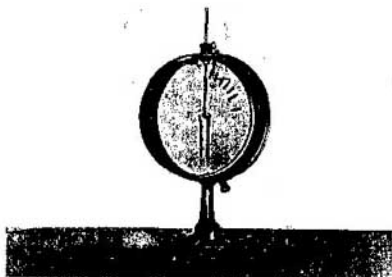


Fig. 129

gravidad de la aguja se encuentra más bajo que el eje, de manera que, antes de empezar a medir, la aguja está en posición vertical. La varilla con la aguja se halla en una caja metálica, aislada de la primera por medio de un tapón de ebonita. Para que la aguja pueda verse, la caja tiene en su cara delantera un vidrio. Este electrómetro se parece a un electroscopio, pero difiere de él en que posee la caja metálica.

Para medir la diferencia de potencial entre dos conductores, uno de ellos se conecta a la varilla del electrómetro y el otro a la caja. (Si se quiere medir el potencial de un cuerpo respecto del de la Tierra, el cuerpo se conecta por medio de un cable con la varilla y la caja se conecta a tierra.) Entre la caja y la varilla se establece la diferencia de potencial que hay que medir. El campo eléctrico dentro del electrómetro sólo depende de esta diferencia de potencial, ya que el campo eléctrico exterior de los cuerpos cargados o polarizados no penetra a través de la caja metálica del aparato (protección electrostática). La distribución del campo dentro del electrómetro determina unívocamente la fuerza que actúa sobre la aguja. Para que por la posición de la aguja se pueda apreciar la diferencia de potencial, el aparato debe gra-

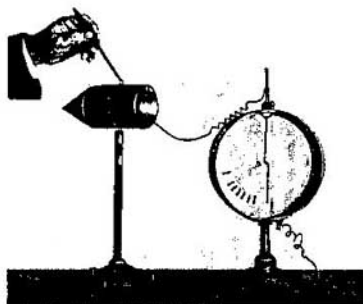


Fig. 130

duarse. Esto se hace hallando los ángulos de desviación de la aguja que corresponden a valores conocidos de la tensión entre conductores cargados.

Valiéndose del electrómetro es fácil cerciorarse experimentalmente de que todos los puntos de un conductor tienen el mismo potencial respecto a la Tierra. Para esto se van conectando por medio de un alambre las diversas partes del conductor con la varilla del electrómetro, cuya caja debe estar conectada a tierra (fig. 130). Al hacer esto, las indicaciones del electrómetro no variarán.

¿ ?

1. ¿A qué es igual el potencial del campo de una carga puntual?
2. ¿Cómo está relacionada la diferencia de potencial con la intensidad del campo eléctrico?
3. ¿Qué se entiende por la unidad de diferencia de potencial, es decir, 1 voltio?
4. ¿A qué es igual la diferencia de potencial entre dos puntos de un conductor cargado?

Ejemplos de resolución de problemas

Para resolver problemas utilizando los conceptos de intensidad de campo eléctrico hay que conocer ante todo las fórmulas (8.10) y (8.15), que determinan la fuerza, que actúa sobre la carga por parte del campo eléctrico, y la intensidad del campo de una carga puntual. La intensidad del campo eléctrico, creado por varias cargas puntuales, es igual a la suma geométrica de las intensidades de los campos de las cargas por separado.

El trabajo de las fuerzas que actúan sobre la carga por parte del campo se expresa por medio de la diferencia de las energías potenciales o de la diferencia de potencial (fórmula 8.27). El potencial de un campo homogéneo se determina por la fórmula (8.21), y el del campo de una carga puntual, por la fórmula (8.25).

Frecuentemente hay que tener en cuenta al resolver los problemas que todos los puntos de un conductor en un campo electrostático tienen el mismo potencial, y que la intensidad del campo dentro del conductor es nula.

1. Dos cargas puntuales iguales, positivas, están situadas a la distancia r entre sí en un medio homogéneo de permitividad ϵ . Hallar la intensidad del campo eléctrico y el potencial en un punto situado a la misma distancia r tanto de una como de otra carga.

Solución. De acuerdo con el principio de superposición, la intensidad \vec{E} que se busca es igual a la suma geométrica de las intensidades de los campos creados por cada una de las cargas (fig. 131). Los módulos de las intensidades de los campos de cada una de las cargas son: $E_1 = E_2 = k(|q|/\epsilon r^2)$. La diagonal del paralelogramo construido sobre los vectores \vec{E}_1 y \vec{E}_2 es la intensidad del campo resultante, cuyo módulo será:

$$E = 2E_1 \cos 30^\circ = 2k \frac{|q|}{\epsilon r^2} \frac{\sqrt{3}}{2} = k \frac{|q|\sqrt{3}}{\epsilon r^2}.$$

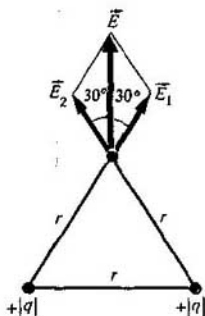


Fig. 131

El potencial φ es igual a la suma de los potenciales $\varphi_1 = k(q/er)$ creados por cada carga:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_1 = k \frac{2q}{\varepsilon r}.$$

2. Una esfera conductora de radio $r = 0,2$ m, cargada hasta el potencial $\varphi = 3 \cdot 10^5$ V, se encuentra en un dieléctrico de permitividad $\varepsilon = 27$. Determinar: 1) la carga q de la esfera; 2) el módulo de la intensidad E del campo eléctrico en su superficie; 3) el módulo de la intensidad E_1 y el potencial φ_1 del campo eléctrico en un punto situado a la distancia $r_1 = 10$ m del centro de la esfera; 4) el módulo de la intensidad E_0 y el potencial φ_0 en el centro de la esfera.

Solución. El campo eléctrico de la esfera cargada, fuera de ella, coincide con el campo de una carga puntual. Por eso

$$\varphi = k \frac{q}{\varepsilon r}; \quad E = k \frac{|q|}{\varepsilon r^2}.$$

Por consiguiente,

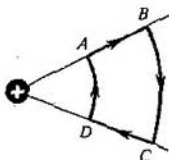
$$1) \quad q = \frac{1}{k} \varepsilon r \varphi; \quad q = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ C};$$

$$2) \quad E = k \frac{|q|}{\varepsilon r^2} = \frac{\varphi}{r}; \quad E = 1,5 \cdot 10^6 \text{ V/m};$$

$$3) \quad E_1 = k \frac{|q|}{\varepsilon r_1^2} = \frac{\varphi}{r_1^2}; \quad E_1 = 600 \text{ V/m}; \quad \varphi_1 = k \frac{q}{\varepsilon r_1} = \frac{r\varphi}{r_1}; \quad \varphi_1 = 6000 \text{ V}.$$

4) La carga $q > 0$ está distribuida uniformemente por la superficie de la esfera. La intensidad en cualquier punto dentro de la esfera conductora es nula: $E_0 = 0$. Por eso el potencial de todos los puntos dentro de la esfera debe ser el mismo (e igual a los potenciales de los puntos de la esfera propia): $\varphi_0 = \varphi$.

Fig. 132

Ejercicio
9

1. En un campo eléctrico homogéneo de $1,3 \cdot 10^5$ V/m de intensidad, dirigido verticalmente hacia abajo, una gotita de líquido, de masa igual a $2 \cdot 10^{-9}$ g, está en equilibrio. Hallar la carga de la gotita y el número de electrones superfluos que hay en ella.
2. Dibujar la gráfica de la dependencia del módulo de la intensidad del campo de una esfera conductora cargada respecto de la distancia hasta su centro.
3. ¿Porqué un peine cargado atrae trocitos de papel eléctricamente neutros?
4. Una carga eléctrica $q_1 > 0$ se trasladó por un contorno cerrado ABCDA en el campo de una carga puntual $q_2 > 0$ (fig. 132). ¿En qué tramos fue positivo el trabajo del campo en el traslado de la carga? ¿En cuáles fue negativo? ¿En cuáles, nulo? ¿Cómo varió la energía potencial del sistema? ¿A qué es igual el trabajo total de traslación de la carga?
5. Un electrón, moviéndose en un campo eléctrico, pasó de un punto a otro cuyo potencial era 1 V más alto. ¿Cuánto varió la energía cinética del electrón y cuánto su energía potencial?
6. Las cargas puntuales $q_1 > 0$ y $q_2 > 0$ se encuentran en dos vértices de un triángulo equilátero de lado r . Hallar el módulo del vector intensidad y el potencial del campo electrostático en el tercer vértice, si la permitividad del medio es ϵ .
7. El potencial de un campo electrostático aumenta de abajo a arriba. ¿Hacia dónde está dirigido el vector intensidad del campo?
8. La diferencia de potencial entre dos puntos que se encuentran en una misma línea de fuerza, a 3 cm de distancia uno de otro, es igual a 120 V. Hallar la intensidad del campo eléctrico sabiendo que dicho campo es homogéneo.
9. Representar las superficies equipotenciales de un cilindro conductor infinito, uniformemente cargado.
10. La velocidad de un electrón que se mueve en un campo eléctrico aumenta desde $v_1 = 1 \cdot 10^7$ m/s hasta $v_2 = 3 \cdot 10^7$ m/s. Hallar la diferencia de potencial entre el punto inicial y el final de la traslación del electrón. La razón de la carga del electrón a su masa es: $e/m = 1,76 \cdot 10^{11}$ C/kg.

8.19. Capacidad eléctrica. Unidad de capacidad eléctrica

Cualquiera que sea el procedimiento empleado para cargar los cuerpos—por fricción, con una máquina electrostática, con una pila, etc.—al principio los cuerpos neutros se cargan en virtud de que cierta parte de las partículas cargadas pasan de un cuerpo a otro. Por lo general estas partículas son los electrones.

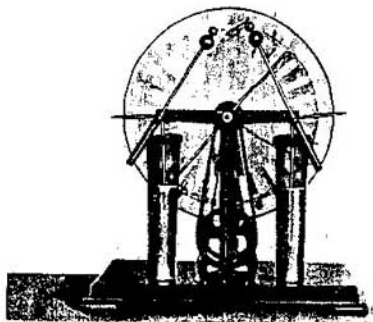


Fig. 133

Aclaremos una cuestión importante en la práctica: ¿cuál es la condición para que en los cuerpos conductores se pueda almacenar una gran carga eléctrica?

Cuando dos cuerpos conductores se cargan valiéndose, por ejemplo, de una máquina electrostática, uno de ellos adquiere la carga $+|q|$, y el otro, la $-|q|$. Entre estos cuerpos surge un campo eléctrico y se produce una diferencia de potencial (tensión). Si la tensión aumenta, el campo eléctrico entre los conductores se intensifica. $V = E d$

En un campo eléctrico intenso (cuando la tensión es grande) un dieléctrico (el aire, por ejemplo) se hace conductor. Se produce la llamada "ruptura" o "perforación" del dieléctrico: entre los conductores salta una chispa (fig. 133) y éstos se descargan. Cuanto más lentamente crece la tensión entre los conductores al aumentar sus cargas, tanto mayor es la carga que se puede almacenar en ellos.

CAPACIDAD ELÉCTRICA. Vamos a introducir una magnitud física que caracterice la aptitud de dos conductores para almacenar carga eléctrica. Esta magnitud se denomina **CAPACIDAD ELÉCTRICA**.

La tensión U entre dos conductores es proporcional a la carga eléctrica que hay en ellos ($+|q|$ en uno y $-|q|$ en el otro). Esto se infiere del principio de superposición. Si la carga se duplica, la intensidad del campo también se hace dos veces mayor. Por consiguiente, se duplica el trabajo que realiza el campo para trasladar la carga, es decir, se duplica la tensión. Por eso la razón de la carga q de uno de los conductores (en el otro hay una carga de igual módulo) a la diferencia de potencial entre este conductor y su vecino no depende de la carga. Esta razón viene determinada únicamente por las dimensiones geométricas de los conductores, por su forma y disposición mutua, y por las propiedades eléctricas del medio que los rodea (es decir, por su permitividad ϵ). Esto permite introducir el concepto de capacidad eléctrica de dos conductores.

Se llama capacidad eléctrica de dos conductores la razón de la carga de

uno de ellos a la diferencia de potencial entre este conductor y su vecino:

$$C = \frac{q}{U}. \quad (8.29)$$

Cuanto menor sea la tensión U al comunicarles a los conductores las cargas $+|q|$ y $-|q|$, tanto mayor será la capacidad eléctrica de los conductores. En los conductores se pueden almacenar cargas mayores sin que se produzca la ruptura del dieléctrico.

A veces se habla de la capacidad eléctrica de un conductor. Eso tiene sentido si el conductor está apartado, es decir, situado a una distancia grande, en comparación con sus dimensiones, de otros conductores. Se dice, por ejemplo, capacidad de una esfera conductora. En este caso se entiende que la misión del otro conductor la desempeñan los objetos lejanos que hay alrededor de la esfera.

UNIDAD DE CAPACIDAD ELÉCTRICA. La fórmula (8.29) da la posibilidad de introducir la unidad de capacidad eléctrica.

La capacidad eléctrica de dos conductores es igual a la unidad si cuando se les comunican las cargas $+1\text{ C}$ y -1 C se produce entre ellos la diferencia de potencial de 1 V . Esta unidad recibe el nombre de faradio (F). $1\text{ F} = 1\text{ C/V}$.

Como la carga de 1 C es muy grande, la capacidad de 1 F también lo es. Por eso en la práctica se utilizan los submúltiplos de esta unidad: el microfaradio (μF), igual a 10^{-6} F , y el picofaradio (pF), igual a 10^{-12} F .

8.20. Condensadores. Capacidad eléctrica de un condensador plano¹⁾

Tienen gran capacidad eléctrica los sistemas de dos conductores llamados condensadores. El condensador está formado por dos conductores separados por una capa de dieléctrico, cuyo espesor es pequeño en comparación con las dimensiones de los conductores. Los conductores reciben en este caso el nombre de ARMADURAS DEL CONDENSADOR.

El condensador plano más simple consta de dos placas paralelas iguales situadas a una distancia pequeña entre sí (fig. 134). Si las cargas de las placas tienen igual módulo y signos opuestos, las líneas de fuerza del campo eléctrico comenzarán en la armadura del condensador cargada positivamente y terminarán en la cargada negativamente. Por eso casi todo el campo eléctrico está concentrado dentro del condensador.

En un condensador esférico, formado por dos esferas concéntricas, todo el campo está concentrado entre ellas.

Para cargar un condensador hay que conectar sus armaduras con los

¹⁾ La palabra "condensador" equivale a "densificador" o "aumentador de la densidad". En este caso "aumentador de la densidad de carga".

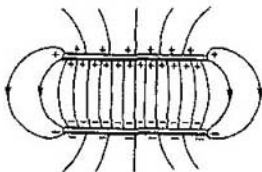


Fig. 134

polos de una fuente de tensión, por ejemplo, con los polos de una batería de acumuladores. También se puede conectar una armadura con el polo de una batería, cuyo otro polo esté conectado a tierra, y la otra armadura conectarla a tierra. Entonces en la armadura puesta a tierra queda una carga de signo contrario e igual módulo que la carga de la otra armadura. Otra carga de igual módulo irá a parar a tierra.

Se entiende por carga de un condensador el valor absoluto de la carga de una de sus armaduras.

La capacidad eléctrica del condensador se determina por la fórmula (8.29).

Los campos eléctricos de los cuerpos conductores circundantes casi no penetran en el condensador ni influyen en la diferencia de potencial entre sus armaduras. Por eso la capacidad eléctrica de un condensador no depende prácticamente de la presencia de otros cuerpos cualesquiera cerca de él.

El primer condensador, llamado botella de Leyden, fue creado a mediados del siglo XVIII. Se descubrió que un clavo introducido en un tarro de vidrio que contenía mercurio acumulaba una gran carga eléctrica. En dicho condensador el mercurio hacía las veces de una de las armaduras, y la mano del experimentador que sostenía el tarro, la función de la otra armadura. Más tarde ambas armaduras empezaron a hacerse de latón fino o de papel de estaño.

CAPACIDAD ELÉCTRICA DE UN CONDENSADOR PLANO.

Calculemos la capacidad de un condensador plano. Para esto llamaremos S al área de cada una de las placas, y d a la distancia entre ellas. Para calcular la capacidad por la fórmula (8.29) hay que expresar la diferencia de potencial U por medio de la carga q . Esta diferencia de potencial se determina por la intensidad E del campo, la cual depende de las cargas de las armaduras del condensador.

La intensidad E_1 del campo creado por una de las placas viene dada por la fórmula (8.16). Las intensidades de los campos de las placas cargadas positiva y negativamente tienen igual módulo y están dirigidas dentro del condensador en un mismo sentido. Por lo tanto, el módulo E de la intensidad resultante es igual a la suma de los módulos de las intensidades de los campos de las dos placas:

$$E = 2E_1 = k \frac{4\pi\sigma}{\varepsilon}.$$

La fórmula de la capacidad se puede escribir de un modo más compacto si en vez del coeficiente k se emplea su expresión en la forma (8.6); $k =$

$= 1/4\pi\epsilon_0$. En este caso, teniendo en cuenta que la densidad superficial de carga $\sigma = q/S$, se obtiene:

$$E = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon S}.$$

Por consiguiente, $U = Ed = qd/\epsilon_0 \epsilon S$.

Sustituyendo U por esta expresión en (8.29) y simplificando por q , se obtiene la fórmula de la capacidad eléctrica del condensador plano:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}. \quad (8.30)$$

Como puede verse, la capacidad eléctrica del condensador depende de sus factores geométricos: área de las placas y distancia entre ellas, y de las propiedades eléctricas del medio. No depende del material de los conductores: las armaduras del condensador pueden ser de hierro, cobre, aluminio, etc.

Comprobemos experimentalmente la fórmula (8.30) obtenida por vía teórica. Para esto tomamos un condensador, cuyas placas están a una distancia entre sí que se puede variar, y un electrómetro con el cuerpo conectado a tierra (fig. 135). Conectamos la caja y la varilla del electrómetro con las placas del condensador, por medio de alambres conductores, y cargamos el condensador. Para esto hay que tocar con una varilla electrizada la placa del condensador que está conectada con la varilla del electrómetro. Éste indica la diferencia de potencial entre las placas.

Separando más las placas se observa que la diferencia de potencial aumenta. De acuerdo con la definición de capacidad eléctrica (8.29), esto indica que la capacidad disminuye. Según la fórmula (8.30), la capacidad eléctrica debe en realidad disminuir si aumenta la distancia entre las placas.

Colocando entre las armaduras del condensador una lámina de material dieléctrico, por ejemplo, de vidrio orgánico, observamos que la diferencia de

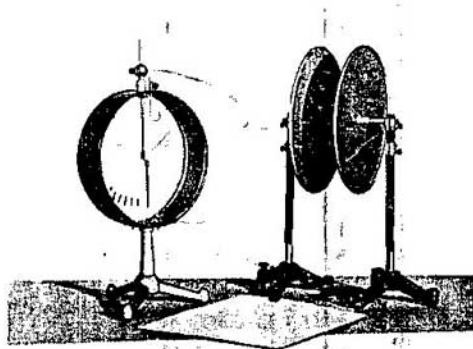


Fig. 135

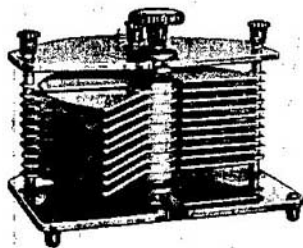


Fig. 136

potencial disminuye. Por consiguiente, la capacidad del condensador aumenta.

La distancia d entre las placas puede ser muy pequeña, y el área S y la permitividad, suficientemente grandes. Por eso un condensador de dimensiones pequeñas puede tener una capacidad eléctrica grande. No obstante, un condensador plano de 1 F de capacidad debería tener un área de sus placas $S = 100 \text{ km}^2$, si la distancia entre ellas fuera $d = 1 \text{ mm}$.

MEDIDA DE LA PERMITIVIDAD. La dependencia de la capacidad de un condensador respecto de las propiedades eléctricas de la sustancia que se encuentra entre sus armaduras se aprovecha para medir la permitividad de dicha sustancia. Para eso hay que determinar experimentalmente la razón de la capacidad del condensador con la lámina de material dieléctrico entre sus armaduras (C) y sin dicha lámina (C_0). Como se sigue de la fórmula (8.30), la permitividad será:

$$\epsilon = \frac{C}{C_0}.$$

TIPOS DE CONDENSADORES. En dependencia del fin a que se destinan, los condensadores tienen diferente estructura. El condensador técnico ordinario de papel consta de dos tiras de papel de aluminio, aisladas entre sí y del cuerpo metálico, por medio de cintas de papel impregnado en parafina. Las tiras y las cintas están fuertemente enrolladas en forma de cilindro de pequeñas dimensiones.

En radiotecnica se utilizan mucho los condensadores de capacidad variable (fig. 136). Estos condensadores están formados por dos sistemas de láminas metálicas que, al girar un botón, pueden entrar uno en otro. Al hacer esto varía el área de la parte de las láminas que penetra en los huecos, que median entre las placas, y, por consiguiente, su capacidad eléctrica. En estos condensadores hace las veces de dieléctrico el aire.

Un gran aumento de la capacidad eléctrica, a expensas de la disminución de la distancia entre las armaduras, se consigue en los llamados condensadores electrolíticos (fig. 137): En ellos sirve de dieléctrico la tenue película de óxidos que cubre una de las armaduras (tira de papel metálico). De

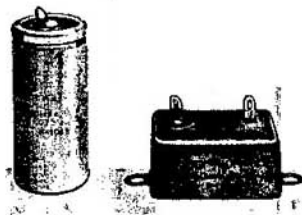


Fig. 137

segunda armadura hace las veces un papel impregnado en una solución de sustancia especial (electrólito).

8.21. Energía de un condensador cargado. Empiezo de los condensadores

ENERGÍA DE UN CONDENSADOR CARGADO. Para cargar un condensador hay que realizar trabajo en separar las cargas positivas y negativas. De acuerdo con la ley de conservación de la energía, este trabajo es igual a la energía que adquiere el condensador.

De que el condensador cargado tiene energía es fácil cerciorarse si éste, una botella de Leyden, por ejemplo, se descarga por medio de un descargador especial (fig. 138). Al hacerlo, entre la esferaita del descargador y la armadura del condensador salta una chispa. La energía del condensador se transforma en energía mecánica, luminosa y térmica. Cuanto mayor sea la capacidad del condensador y la tensión, tanto mayor será la potencia de la chispa.

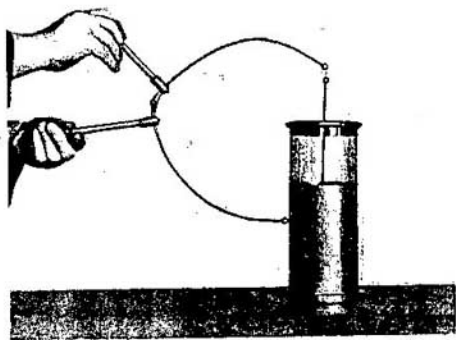


Fig. 138

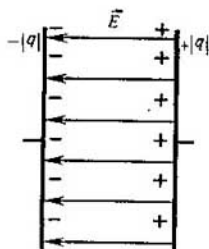


Fig. 139

Deduzcamos la fórmula de la energía de un condensador plano. La intensidad del campo creado por la carga de una de las placas es igual a $E/2$, donde E es la intensidad del campo en el condensador (véase el § 8.20). En el campo homogéneo de una placa se encuentra la carga q , distribuida por la superficie de la otra placa (fig. 139). Según la fórmula (8.19) de la energía potencial de una carga en un campo homogéneo, la energía del condensador será:

$$W_p = q \frac{E}{2} d, \quad (8.31)$$

en la que q es la carga del condensador, y d , la distancia entre las placas¹⁾.

Como $Ed = U$ es la diferencia de potencial entre las armaduras del condensador, su energía será:

$$W_p = \frac{qU}{2}. \quad (8.32)$$

Esta energía es igual al trabajo que realizará el campo eléctrico al acercar las placas hasta juntarlas.

Sustituyendo en la fórmula (8.32) la diferencia de potencial o la carga por sus valores deducidos de la expresión (8.29) para la capacidad eléctrica del condensador, se obtiene:

$$W_p = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2}. \quad (8.33)$$

Se puede demostrar que esta fórmula es válida para calcular la energía de cualquier condensador, y no sólo la del condensador plano.

ENERGÍA DEL CAMPO ELÉCTRICO. De acuerdo con la teoría de la acción próxima, toda la energía de interacción de los cuerpos cargados está

¹⁾ La fórmula (8.19) es correcta para la energía de una carga puntual en un campo homogéneo. Pero la carga de la placa se puede dividir mentalmente en elementos pequeños Δq . La energía de cada uno de estos elementos será $\Delta W_p = \Delta q d E / 2$. Sumando estas energías se obtiene la fórmula (8.31).

concentrada en el campo eléctrico de estos cuerpos. Por lo tanto, la energía se puede expresar mediante la característica fundamental del campo, la intensidad.

Sustituamos en la fórmula (8.33) la capacidad del condensador plano por su valor (véase 8.30) y expresemos la diferencia de potencial, en dicha fórmula, por medio de la intensidad del campo: $U = Ed$. Entonces la energía del condensador será:

$$W_p = \frac{CU^2}{2} = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d} \cdot \frac{E^2 d^2}{2} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} Sd. \quad (8.34)$$

Dividiendo (8.34) por el volumen Sd ocupado por el campo, se obtiene la energía correspondiente a la unidad de volumen, es decir, la densidad de la energía:

$$w_p = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2}. \quad (8.35)$$

Esta fórmula es correcta no sólo para el campo homogéneo de un condensador plano, sino también para cualquier otro campo electrostático. Es más, la expresión obtenida de la densidad de energía también es válida para los campos eléctricos alternativos.

● **APLICACIÓN DE LOS CONDENSADORES.** La energía de un condensador, por lo general, no es grande. No suele ser mayor que varios centenares de julios. Además no se conserva durante mucho tiempo, debido a la fuga de la carga. Por eso, los condensadores cargados no pueden sustituir, por ejemplo, a los acumuladores como fuentes de energía eléctrica.

Pero esto no significa en absoluto que los condensadores no tengan aplicación práctica como almacenadores de energía. Los condensadores tienen una propiedad importante. El condensador puede almacenar energía durante un tiempo más o menos largo, y al descargarse a través de un circuito de poca resistencia cede la energía casi instantáneamente. Esta propiedad se aprovecha extensamente en la práctica.

La lámpara de destello o "flash" que se utiliza en fotografía se alimenta con la corriente de descarga de un condensador previamente cargado por una batería especial. La excitación de las fuentes cuánticas de luz -láseres- se efectúa por medio de un tubo de descarga en gases, cuyo destello se produce al descargarse una batería de condensadores de gran capacidad eléctrica.

No obstante, su aplicación fundamental la encuentran los condensadores en radiotecnía. Los condensadores se utilizan en diversos circuitos eléctricos para obtener un determinado cambio de tensión a expensas de la variación de la carga. Los condensadores de gran capacidad son aptos para almacenar o ceder una gran carga sin que la tensión varíe mucho.

¿ ?

1. ¿Cuál es la condición para poder almacenar en los conductores una gran carga eléctrica?
2. ¿A qué se llama capacidad eléctrica de dos conductores?
3. ¿Por qué no se puede aplicar el concepto de capacidad eléctrica a los dieléctricos?
4. ¿De qué depende la capacidad eléctrica?

5. Defina la unidad de capacidad eléctrica.
6. ¿A qué es igual la capacidad eléctrica de un condensador plano?
7. ¿A qué es igual la energía de un condensador?
8. Enumere las principales aplicaciones de los condensadores.

Ejemplos de resolución de problemas

La capacidad eléctrica es el último tema de la "Electrostática". Al resolver los problemas sobre este tema pueden necesitarse todos los conocimientos adquiridos durante el estudio de la electrostática: la conservación de la carga eléctrica, los conceptos de intensidad de campo y de potencial, el comportamiento de los conductores en un campo electrostático, la variación de la intensidad del campo en los dieléctricos y la ley de conservación de la energía con arreglo a los fenómenos electrostáticos. Solamente cuando se han asimilado bien todos los conceptos fundamentales de la electrostática se pueden resolver sin gran dificultad los problemas sobre capacidad eléctrica.

Las fórmulas principales para resolver dichos problemas son las siguientes; la que define la capacidad eléctrica (8.29) y la que expresa la capacidad eléctrica de un condensador plano (8.30).

Con frecuencia los condensadores se unen entre sí. Esto da la posibilidad de, teniendo un conjunto de condensadores, obtener baterías de distinta capacidad. En los ejemplos № 2 y 3 se calculan las capacidades de sendas baterías de condensadores. Debe prestarse atención a estos problemas porque las fórmulas que en ellos se obtienen se aplican después para resolver otros problemas.

1. Un condensador tiene la capacidad eléctrica $C = 5 \text{ pF}$. ¿Qué carga hay en cada una de sus armaduras, si la diferencia de potencial entre ellas es $U = 1000 \text{ V}$?

Solución. De acuerdo con la fórmula (8.29) la capacidad del condensador es $C = q/U$, de donde la carga de las armaduras será $q = CU$;

$$q = 5 \cdot 10^{-12} \cdot 1000 \text{ C} = 5 \cdot 10^{-9} \text{ C}.$$

2. Determinar la capacidad de una batería de condensadores acoplados en paralelo (fig. 140), cuyas capacidades respectivas son C_1 y C_2 . (Cuando los condensadores están conectados en paralelo, sus armaduras van unidas de manera que forman parejas, respectivamente, las que tienen carga positiva y las que la tienen negativa.)

Solución. Cuando el acoplamiento es en paralelo, la diferencia de potencial entre las armaduras es igual en ambos condensadores. Si la carga del primer condensador es q_1 y la del segundo q_2 , la carga de la batería será: $q = q_1 + q_2$. La capacidad eléctrica de la batería de condensadores es $C = q/U = (q_1 + q_2)/U$. Y como $C_1 = q_1/U$ y $C_2 = q_2/U$, la capacidad de la batería cuando la conexión es en paralelo será:

$$C = C_1 + C_2. \quad (8.36)$$

3. Determinar la capacidad eléctrica de dos condensadores conectados en serie (fig. 141), cuyas capacidades respectivas son C_1 y C_2 . (Cuando el acoplamiento es en serie, la armadura cargada negativamente de un condensador va unida a la armadura del condensador siguiente, cuya carga tiene el mismo módulo pero signo positivo.)

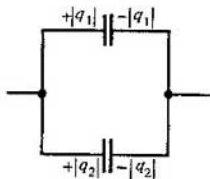


Fig. 140



Fig. 141

Solución. En el caso de la conexión en serie de los condensadores, ambos tienen la misma carga. En efecto, si la carga de la armadura externa del primer condensador es $+|q|$, en la armadura opuesta aparece la carga $-|q|$. Como el conductor entre los condensadores y las armaduras que él conecta son en conjunto neutros, la carga de la armadura interna del segundo condensador será $+|q|$.

La capacidad de la batería de condensadores acoplados en serie es $C = q/(\varphi_1 - \varphi_2)$, donde φ_1 y φ_2 son los potenciales de las armaduras externas. Las capacidades de los condensadores son: $C_1 = q/(\varphi_1 - \varphi')$ y $C_2 = q/(\varphi' - \varphi_2)$, siendo φ' los potenciales de las armaduras internas de los condensadores. Hallamos la suma de las magnitudes recíprocas de las capacidades de los condensadores:

$$\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{\varphi_1 - \varphi'}{q} + \frac{\varphi' - \varphi_2}{q} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{q} = \frac{1}{C}.$$

Por consiguiente, cuando los condensadores se acoplan en serie, la magnitud recíproca de la capacidad de la batería es igual a la suma de las magnitudes recíprocas de las capacidades de los condensadores por separado:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}. \quad (8.37)$$

Ejercicio
10

1. ¿A qué es igual la capacidad de un condensador plano cuyas armaduras son dos tiras de papel metálico, de área $S = 0,4 \text{ m}^2$ cada una y están separadas por un papel parafinado ($\epsilon = 2,2$) de espesor $d = 0,08 \text{ mm}$?
2. La diferencia de potencial entre las armaduras del condensador descrito en el problema anterior varía en 175 V. Determinar la variación que experimenta la carga del condensador.
3. La carga de un condensador plano con dieléctrico de mica es igual a $2,7 \cdot 10^{-4} \text{ C}$. El área de cada placa es de 2500 cm^2 . La permitividad de la mica es igual a 7. Hallar la intensidad del campo en el dieléctrico.
4. En el espacio entre las placas de un condensador plano penetra un electrón con la velocidad de $2 \cdot 10^7 \text{ m/s}$, dirigida paralelamente a dichas placas. ¿Qué distancia se desviará el electrón hacia la placa cargada positivamente durante el tiempo en que se mueve dentro del condensador, si la capacidad de éste $C = 0,885 \text{ pF}$, su longitud es de $0,05 \text{ m}$ y la diferencia de potencial entre las placas, de 200 V? El área de las placas del condensador es $S = 0,002 \text{ m}^2$. La razón de la carga del electrón a su masa es igual a $1,76 \cdot 10^{11} \text{ C/kg}$.

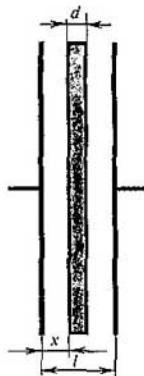


Fig. 142

5. A una batería de dos condensadores acoplados en serie se hace llegar una tensión de 300 V. ¿Cuál será la diferencia de potencial en las armaduras de cada condensador, si la capacidad del primero es de 2 pF y la del segundo, 3 pF?
6. Dos condensadores de 10 000 pF y 1500 pF de capacidad, respectivamente, están acoplados en paralelo. ¿Qué carga tendrá el segundo condensador, si la del primero es de $2 \cdot 10^{-6}$ C?
7. Hallar la capacidad C de un condensador, cuyas placas tienen el área S y están situadas entre sí a la distancia l , si en el condensador se ha introducido una placa metálica de espesor d paralelamente a las armaduras (fig. 142).
8. En cuántas veces variará la energía de un condensador cargado y desconectado de la fuente, si el espacio entre sus armaduras se llena de un dieléctrico de permitividad $\epsilon = 3$?
9. Determinar la densidad de energía en el campo eléctrico del condensador mencionado en el problema 4.

Breve resumen del capítulo VIII

Dos cargas eléctricas puntuales inmóviles q_1 y q_2 interactúan en el vacío, de acuerdo con la ley de Coulomb, con la fuerza

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

en la que el coeficiente $k = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$. La carga se mide en culombios.

En un sistema cerrado de cuerpos cargados se conserva la carga eléctrica.

La interacción de las cargas se efectúa por medio del campo eléctrico. La intensidad \vec{E} del campo determina la fuerza que actúa sobre la carga: $\vec{F} = q\vec{E}$. Las intensidades de los campos creados por cargas separadas se suman geoméricamente (principio de superposición).

La intensidad del campo eléctrico de una carga puntual en el vacío es:

$$E = k \frac{|q|}{r^2}.$$

Esta misma fórmula determina la intensidad del campo fuera de una esfera cargada uniformemente (r será la distancia desde el centro de la esfera). La intensidad del campo de un plano es $E = k2\pi|\sigma|$, donde σ es la densidad superficial de carga.

En los conductores hay cargas eléctricas libres. La intensidad del campo y la carga eléctrica dentro de un conductor son nulas (en electrostática).

En los dieléctricos todas las cargas están ligadas dentro de los átomos o moléculas independientes. Bajo la acción de un campo eléctrico las cargas ligadas de distinto signo se desplazan en sentidos opuestos. Este fenómeno se llama polarización de los dieléctricos. El dieléctrico polarizado crea un campo eléctrico que dentro del dieléctrico debilita el campo exterior. Como resultado, en un dieléctrico homogéneo el campo eléctrico se debilita ϵ veces, siendo ϵ la permitividad.

El campo electrostático es de potencial: su trabajo no depende de la forma de la trayectoria de la carga y es igual a la variación de la energía potencial tomada con signo contrario: $A = -\Delta W_p$.

La energía potencial de una carga en un campo homogéneo es $W_p = qEd$, donde d es la distancia desde el plano en el cual la energía potencial se toma igual a cero.

Se llama potencial de un campo eléctrico la razón de la energía potencial de la carga en el campo, a esta misma carga:

$$\varphi = \frac{W_p}{q}.$$

La diferencia de potencial (tensión) entre dos puntos es igual a la razón del trabajo del campo en trasladar la carga desde el punto inicial hasta el final, a la carga misma: $U = \varphi_1 - \varphi_2 = A/q$. La diferencia de potencial se mide en voltios: $1 V = 1 J/1 C$.

El potencial de una carga puntual en el vacío es:

$$\varphi = k \frac{q}{r}.$$

La intensidad del campo está relacionada con la diferencia de potencial por la fórmula

$$E = \frac{U}{\Delta d},$$

en la que U es la diferencia de potencial entre dos puntos situados en una misma línea de fuerza a una pequeña distancia Δd entre sí.

La aptitud de los conductores para almacenar carga eléctrica se caracteriza por medio de la capacidad eléctrica. La capacidad de dos conductores es:

$$C = \frac{q}{U},$$

donde q es la carga de uno de los conductores (en el otro conductor la carga tiene signo contrario), y U es la diferencia de potencial entre ellos. La

capacidad eléctrica no depende de la carga de los conductores y viene determinada solamente por sus dimensiones geométricas, forma y disposición mutua, y por las propiedades eléctricas del medio que los rodea (es decir, por su permitividad ϵ).

La capacidad eléctrica se mide en faradios:

$$1 F = \frac{1 C}{1 V}.$$

La carga mayor se almacena en los condensadores, que son sistemas de dos conductores cuyas dimensiones son mucho mayores que la distancia que hay entre ellos.

La capacidad de un condensador plano es:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d},$$

en la que S es el área de las placas; d , la distancia entre ellas; y $\epsilon_0 = 1/4\pi k$, la constante eléctrica.

La energía de un condensador cargado $W_p = qU/2$.

La densidad de la energía de un campo eléctrico $w_p = \epsilon_0 \epsilon E^2/2$.

+ + +

Hemos empleado mucho tiempo en estudiar la electricidad y sólo nos hemos ocupado hasta ahora del caso particular más simple, el de los cuerpos cargados que están en reposo, es decir, de la electrostática. ¿Vale la pena prestar tanta atención a la electrostática? Sí, porque en ella se han introducido los conceptos más importantes que se emplean en toda la electrodinámica: "carga eléctrica", "campo eléctrico", "potencial y diferencia de potencial", "capacidad eléctrica" y "energía del campo eléctrico". En un caso particular simple es más fácil explicar la esencia de estos conceptos que en el caso general de las cargas en movimiento.

Ahora vamos a pasar al estudio de los procesos electromagnéticos que se observan al moverse las partículas cargadas.

9. Corriente eléctrica continua

9.1. Corriente eléctrica. Intensidad de corriente

Durante el movimiento de las partículas cargadas tiene lugar el transporte de carga eléctrica desde un punto a otro. Pero si las partículas cargadas efectúan un movimiento térmico desordenado, por ejemplo, el de los electrones libres en un metal, el transporte de carga no existe (fig. 143). La carga eléctrica se traslada a través de la sección del conductor únicamente si, además de efectuar el movimiento caótico, los electrones participan en un movimiento ordenado (fig. 144). En este último caso se dice que en el conductor se ha establecido una CORRIENTE ELÉCTRICA.



Fig. 143



Fig. 144

Por el curso de "Física I" (Ed. MIR) se sabe que se llama corriente eléctrica el movimiento ordenado (dirigido) de las partículas cargadas. La corriente eléctrica surge al trasladarse ordenadamente los electrones en el metal o los iones en los electrólitos.

No obstante, si se traslada un cuerpo neutro en conjunto, a pesar de que se mueve ordenadamente un número enorme de electrones y de núcleos atómicos, no se produce corriente eléctrica. La carga total trasladada a través de cualquier sección del conductor será en este caso nula, ya que las cargas de signos distintos se trasladan con la misma velocidad media. La corriente sólo aparece en el conductor cuando al moverse las cargas en un sentido, el módulo de la carga positiva transportada a través de la sección no es igual al módulo de la carga negativa.

La corriente eléctrica tiene un sentido determinado. Como sentido de la corriente se toma el del movimiento de las partículas cargadas positivamente. Si la corriente se debe al movimiento de las partículas cargadas negativamente, el sentido de aquélla se considera opuesto al del movimiento de las partículas¹⁾.

ACCIONES DE LA CORRIENTE. El movimiento de las partículas en el conductor no se observa directamente. Pero acerca de la existencia de la corriente eléctrica se puede juzgar por aquellas acciones o fenómenos de que dicha corriente va acompañada.

Primero, un conductor por el cual pasa corriente se calienta.

Segundo, la corriente eléctrica puede cambiar la composición química del conductor, por ejemplo, separar las partes químicas que lo componen (como el cobre de una solución de vitriolo azul (sulfato cúprico)). Este tipo de procesos no se observa en todos los conductores, sino únicamente en las soluciones (o fusiones) de electrólitos²⁾.

Tercero, la corriente ejerce acción magnética. Así, una aguja magnética, colocada cerca de un conductor con corriente, se desvía. La acción magnética de la corriente, a diferencia de la química y de la térmica, es fundamental, puesto que se manifiesta en todos los conductores sin excepción. La acción química sólo se observa en los electrólitos, y la ausencia de calentamiento, en los superconductores (véase el § 9.5).

INTENSIDAD DE CORRIENTE. Si en un circuito se establece corriente eléctrica, esto significa que a través de su sección transversal se

¹⁾ Esta elección del sentido de la corriente no es acertada, ya que en la mayoría de los casos la corriente es un movimiento de electrones, es decir, de partículas cargadas negativamente. Pero la elección del sentido de la corriente se hizo en un tiempo en que aún se ignoraba la existencia de los electrones libres en los metales.

²⁾ De esto se trata detalladamente en el texto de "Química inorgánica".

transporta continuamente carga eléctrica. La carga transportada en la unidad de tiempo sirve de característica cuantitativa fundamental de la corriente y recibe el nombre de INTENSIDAD DE CORRIENTE. Si a través de la sección transversal de un conductor pasa, en el tiempo Δt , una carga Δq , la intensidad de corriente será:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (9.1)$$

Así, pues, la intensidad de corriente es igual a la razón de la carga Δq transportada a través de la sección transversal del conductor durante un intervalo de tiempo Δt , a este mismo intervalo de tiempo. Si la intensidad de corriente no varía con el tiempo, la corriente se llama CONTINUA.

La intensidad de corriente, lo mismo que la carga, es una magnitud escalar. Puede ser tanto positiva como negativa. El signo de la intensidad de corriente depende del sentido que a lo largo del conductor se tome como positivo. La intensidad $I > 0$ si el sentido de la corriente coincide con el elegido convencionalmente como positivo a lo largo del conductor. En el caso contrario $I < 0$.

La intensidad de corriente depende de la carga que transporta cada partícula, de la concentración de partículas, de la velocidad de su movimiento dirigido y del área de la sección transversal del conductor. Vamos a demostrar esto.

Supongamos que el conductor tiene una sección transversal de área S . Como sentido positivo en el conductor tomamos el de izquierda a derecha. La carga de cada partícula es igual a q_0 . En el volumen de conductor limitado por las secciones 1 y 2 hay $nS\Delta l$ partículas, siendo n la concentración de las mismas (fig. 145). Su carga total $q = q_0 n S \Delta l$. Si las partículas se mueven de izquierda a derecha con la velocidad media $v^{1)}$, al cabo de un tiempo $\Delta t = \Delta l / v$ todas las partículas que hay en el volumen considerado habrán pasado a través de la sección 2. Por lo tanto, la intensidad de corriente será:

$$I = \frac{q}{\Delta t} = \frac{q_0 n v S \Delta l}{\Delta l} = q_0 n v S \quad (9.2)$$

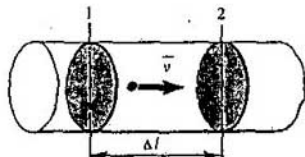


Fig. 145

1) Más exactamente, v es la proyección de la velocidad media sobre la dirección positiva a lo largo del conductor.

En el sistema internacional de unidades (SI) la intensidad de corriente se expresa en amperios (A). Esta unidad se establece basándose en la interacción magnética de las corrientes. La intensidad de corriente se mide con AMPERÍMETROS. El principio en que se funda la estructura de estos aparatos, basados en la acción magnética de la corriente, se estudiará más adelante.

VELOCIDAD DEL MOVIMIENTO ORDENADO DE LOS ELECTRONES EN UN CONDUCTOR. Hallemos la velocidad del desplazamiento ordenado de los electrones en un conductor metálico.

De acuerdo con la fórmula (9.2),

$$|v| = \frac{|I|}{enS},$$

donde e es el módulo de la carga del electrón. Sean, por ejemplo, la intensidad de corriente $I = 1$ A y el área de la sección transversal del conductor $S = 10^{-6}$ m². El módulo de la carga del electrón $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C. El número de electrones que hay en 1 m³ de cobre es igual al número de átomos que hay en dicho volumen, ya que uno de los electrones de valencia de cada átomo de cobre está "colectivizado" y es libre. Este número es $n = 8,5 \cdot 10^{28}$ m⁻³ (véase el problema № 8 del ejercicio 1). Por consiguiente,

$$|v| = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8,5 \cdot 10^{28} \cdot 10^{-6}} \frac{\text{m}}{\text{s}} = 7 \cdot 10^{-5} \text{ m/s.}$$

La velocidad de la traslación ordenada de los electrones, como puede verse, es muy pequeña.

9.2. Condiciones necesarias para que exista corriente eléctrica

Para que aparezca y exista corriente eléctrica continua es necesario, primero, que haya partículas cargadas libres. Si las cargas positivas y negativas están ligadas entre sí en los átomos o moléculas, su traslación no hace que se produzca corriente eléctrica.

Pero la existencia de cargas libres es insuficiente para que surja la corriente. Para crear y mantener el movimiento ordenado de las partículas cargadas es necesario, en segundo lugar, que una fuerza actúe sobre ellas en un sentido determinado. Si esta fuerza deja de actuar, el movimiento ordenado de las partículas cargadas cesa, a causa de la resistencia que ofrecen a su movimiento los iones de la red cristalina de los metales o las moléculas neutras de los electrolitos.

Sobre las partículas cargadas, como se sabe, actúa el campo eléctrico con la fuerza $\vec{F} = q\vec{E}$. Por lo general es precisamente el campo eléctrico dentro del conductor la causa que origina y mantiene el movimiento ordenado de las partículas cargadas. Únicamente en el caso estático, en el cual las cargas están en reposo, es nulo el campo eléctrico dentro del conductor.

SI DENTRO DEL CONDUCTOR HAY CAMPO ELÉCTRICO, ENTRE LOS EXTREMOS DEL CONDUCTOR, DE ACUERDO CON LA FÓRMULA (8.28), EXISTE

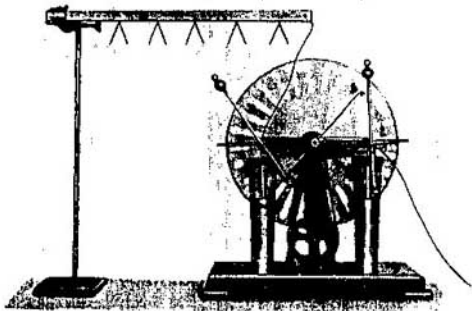


Fig. 146

DIFERENCIA DE POTENCIAL. Cuando esta diferencia de potencial no varía con el tiempo, en el conductor se establece una corriente continua. A lo largo del conductor disminuye el potencial desde su valor máximo, en uno de los extremos, hasta el mínimo, en el otro. Esta disminución del potencial se puede observar en un experimento sencillo.

Se toma como conductor una varilla de madera no muy seca y se sujeta horizontalmente. (Esta varilla, aunque mal, conduce algo la corriente.) La fuente de tensión supongamos que sea una máquina electrostática. Para registrar el potencial en las distintas partes del conductor respecto de tierra se pueden utilizar hojitas de papel metálico sujetas a la varilla. Uno de los polos de la máquina se conecta a tierra y el otro a uno de los extremos del conductor (varilla). El circuito no está cerrado. Al girar la manivela de la máquina se observa que todas las hojitas de papel metálico se desvían un mismo ángulo (fig. 146). Esto significa que el potencial de todos los puntos del conductor respecto de la tierra es el mismo. Así debe ser cuando las cargas están en equilibrio en el conductor. Si ahora se conecta a tierra el

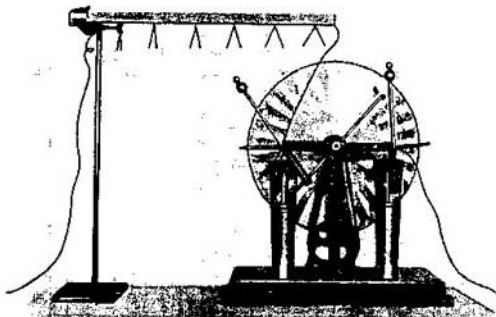


Fig. 147

otro extremo de la varilla, cuando se gira la manivela de la máquina se obtiene otro resultado. (Como la tierra es conductora, la puesta a tierra del conductor hace que el circuito se cierre.) En el extremo conectado a tierra las hojitas no se separan en absoluto; el potencial de este extremo del conductor es prácticamente igual que el potencial de la tierra (la caída de potencial en el alambre metálico es muy pequeña). El ángulo de separación máximo de las hojitas se observará en el extremo del conductor conectado a la máquina (fig. 147). La disminución del ángulo de separación de las hojitas a medida que se alejan de la máquina pone de manifiesto la caída de potencial a lo largo del conductor.

¿ ?

1. ¿A qué se llama corriente eléctrica?
2. ¿Qué lleva el nombre de intensidad de corriente?
3. ¿Qué sentido de la corriente se toma como positivo?
4. ¿Qué condiciones son necesarias para que exista la corriente eléctrica?

9.3. Ley de Ohm para un trozo de circuito. Resistencia

CARACTERÍSTICA TENSIÓN-INTENSIDAD. En el párrafo anterior quedó establecido que para que exista corriente en un conductor hay que crear una diferencia de potencial entre sus extremos. La intensidad de la corriente en el conductor viene determinada por esta diferencia de potencial. Cuanto mayor sea la diferencia de potencial, tanto mayor será la intensidad del campo en el conductor y, por consiguiente, la velocidad del movimiento dirigido que adquieren las partículas cargadas. Según (9.2), esto significa que la intensidad de la corriente aumenta.

Para cada conductor, sea sólido, líquido o gaseoso, existe una dependencia determinada de la intensidad de la corriente respecto de la diferencia de potencial aplicada. Esta dependencia se expresa por medio de la llamada **CARACTERÍSTICA TENSIÓN-INTENSIDAD DEL CONDUCTOR**. Esta característica se halla midiendo la intensidad de la corriente en el conductor con diferentes valores de la tensión. Es de suma importancia conocer la característica tensión-intensidad cuando se estudian todos los fenómenos relacionados con la circulación de la corriente.

LEY DE OHM. La forma más simple de la característica tensión-intensidad la tienen los conductores metálicos y las soluciones de electrolitos. Esta dependencia la estableció por primera vez (para los metales) el científico alemán Georg S. Ohm. Por eso lleva el nombre de ley de Ohm. La ley de Ohm se estudió detenidamente en "Física I", pero como su importancia es muy grande, conviene repasarla.

En el trozo de circuito representado en la fig. 148, la corriente va del punto 1 al punto 2. La diferencia de potencial (tensión) en los extremos del conductor es $U = \varphi_1 - \varphi_2$. Como la corriente está dirigida de izquierda a derecha, la intensidad del campo eléctrico tiene el mismo sentido y $\varphi_1 > \varphi_2$.



Georg Simon Ohm (1787-1854) destacado físico alemán. Fue maestro de escuela. Descubrió la ley de la dependencia de la intensidad de la corriente respecto de la tensión en un trozo de circuito y la ley que define la intensidad de la corriente en un circuito cerrado. Él mismo hizo un aparato sensible para medir la intensidad de la corriente. Como fuente de tensión utilizó un par termoeléctrico, o sea, dos conductores de distintos metales soldados. Aumentando la diferencia de temperatura en las soldaduras hacía que cambiase la tensión, la cual es proporcional a dicha diferencia. Asimismo halló la resistencia de un conductor en función de su longitud y del área de su sección transversal.

De acuerdo con la ley de Ohm para un trozo de circuito, la intensidad de la corriente es directamente proporcional a la tensión aplicada U e inversamente proporcional a la resistencia R del conductor:

$$I = \frac{U}{R} \quad (9.3)$$

La ley de Ohm tiene una forma muy sencilla, pero demostrar experimentalmente que es justa resulta bastante difícil. Esto se debe a que la diferencia de potencial en un trozo de conductor metálico es pequeña, incluso si es grande la intensidad de la corriente, ya que es pequeña la resistencia del conductor. El electrómetro de que se trató en el 8.18 no sirve para medir tensiones tan pequeñas: su sensibilidad es demasiado pequeña. Se necesita un instrumento cuya sensibilidad sea incomparablemente mayor. La utilización para este fin de los aparatos medidores de tensión ordinarios (voltímetros) se basa en la aplicación de la ley de Ohm.

La estructura del voltímetro se funda en el mismo principio que la del amperímetro. El ángulo de desviación de la aguja indicadora del aparato es proporcional a la intensidad de la corriente. La intensidad de la corriente que pasa por el voltímetro está determinada por la tensión que hay entre los puntos del circuito a que está conectado. Por eso, conociendo la resistencia

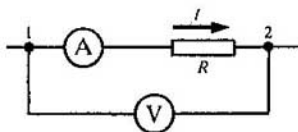


Fig. 148

del voltímetro, por la intensidad de la corriente puede determinarse la tensión. En la práctica se gradúa el aparato de tal forma que indique directamente la tensión en voltios.

RESISTENCIA. La característica eléctrica fundamental de un conductor es la resistencia. De esta magnitud depende la intensidad de la corriente en el conductor para una tensión dada. La resistencia del conductor es algo así como la medida de la reacción que éste opone a que se establezca en él la corriente eléctrica. Valiéndose de la ley de Ohm (9.3) se puede hallar la resistencia de un conductor: $R = U/I$. Para esto hay que medir la tensión y la intensidad de la corriente.

La resistencia depende del material del conductor y de sus dimensiones geométricas. La resistencia de un conductor de longitud l y área de la sección transversal S constante, es:

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

en la que ρ es una magnitud que depende del tipo de la sustancia y de su estado (en primer lugar de la temperatura). La magnitud ρ se denomina **RESISTENCIA ESPECÍFICA O RESISTIVIDAD DEL CONDUCTOR**. La resistividad es numéricamente igual a la resistencia de un conductor en forma de cubo, cuya arista sea igual a 1 m, si la corriente está dirigida perpendicularmente a dos caras opuestas del cubo.

La unidad de resistencia de un conductor se establece basándose en la ley de Ohm y recibe el nombre de ohmio (Ω). Un conductor tiene la resistencia de 1 Ω , si con una diferencia de potencial de 1 V la intensidad de la corriente en él es de 1 A.

La unidad de resistividad es 1 $\Omega \cdot m$. La resistencia específica de los metales es pequeña. Los dieléctricos poseen una gran resistividad. En la tabla que hay en las guardas se dan ejemplos de los valores de la resistividad de algunas sustancias.

IMPORTANCIA DE LA LEY DE OHM. La ley de Ohm determina la intensidad de la corriente en un circuito eléctrico para una tensión dada y una resistencia conocida. Con esto permite calcular las acciones térmicas, químicas y magnéticas de la corriente, ya que éstas dependen de la intensidad de la corriente. De la ley de Ohm se infiere que es peligroso cerrar el circuito de una red de alumbrado ordinaria con un conductor de poca resistencia. La intensidad de la corriente, según (9.3), resulta ser tan grande en este caso, que dicho cierre puede tener graves consecuencias.

9.4. Dependencia de la resistencia de un conductor respecto de la temperatura

Al variar la temperatura, la resistencia del conductor cambia. De esto es posible cerciorarse si la corriente de un acumulador se hace pasar por un alambre de acero en espiral calentado por la

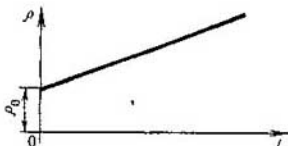


Fig. 149

llama de un mechero. El amperímetro intercalado en el circuito indica cómo disminuye la intensidad de la corriente a medida que se eleva la temperatura de la espiral.

Si a 0°C la resistencia del conductor es R_0 y a la temperatura t es R , la variación relativa de la resistencia, como la experiencia demuestra, es directamente proporcional a la variación de la temperatura t :

$$\frac{R - R_0}{R_0} = \alpha t. \quad (9.4)$$

El coeficiente de proporcionalidad α se llama COEFICIENTE DE TEMPERATURA DE RESISTENCIA. Este coeficiente caracteriza la dependencia de la resistencia respecto de la temperatura. *El coeficiente de temperatura de resistencia es igual a la variación relativa de la resistencia del conductor cuando se calienta 1 K.* Para todos los conductores metálicos $\alpha > 0$ y cambia muy poco al variar la temperatura. Si el intervalo de variación de la temperatura es pequeño, el coeficiente de temperatura se puede considerar constante e igual al valor medio en dicho intervalo de temperatura. En los metales puros $\alpha \approx 1/273 \text{ K}^{-1}$.

En las soluciones de electrolitos la resistencia no aumenta al elevarse la temperatura, sino al contrario, disminuye. Para ellas $\alpha < 0$. Por ejemplo, para la solución al 10% de sal común $\alpha = -0,02 \text{ K}^{-1}$.

Al calentarse un conductor, sus dimensiones geométricas varían muy poco. La resistencia del conductor cambia a causa de la variación de la resistividad. La dependencia de la resistividad respecto de la temperatura se puede hallar si en la fórmula (9.4) se hacen las sustituciones $R = \rho l/S$ y $R_0 = \rho_0 l/S$. Los cálculos conducen al resultado siguiente:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t). \quad (9.5)$$

Como α cambia poco al variar la temperatura, se puede considerar que la resistividad depende linealmente de la temperatura (fig. 149).

Aunque el coeficiente α es bastante pequeño, cuando se calculan aparatos de caldeo es absolutamente necesario tener en cuenta la dependencia de la resistencia respecto de la temperatura. Así, la resistencia del filamento de volframio de una lámpara de incandescencia ordinaria aumenta más de 10 veces cuando la corriente pasa por él.

En ciertas aleaciones, como, por ejemplo, en las de cobre y níquel (constantán) el coeficiente de temperatura de resistencia es muy pequeño: $\alpha \approx 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. La resistividad del constantán es grande: $\rho \approx 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$. Estas aleaciones se utilizan para hacer resistencias patrón y resistencias adicionales para los aparatos de medir, o sea, en aquellos casos en que se

requiere que la resistencia no varíe sensiblemente cuando la temperatura oscila.

La dependencia de la resistencia de los metales respecto de la temperatura se aprovecha en los TERMÓMETROS DE RESISTENCIA. Por lo general, como elemento termométrico se toma un alambre de platino cuya resistencia en función de la temperatura es bien conocida. Las variaciones de la temperatura se aprecian por el cambio de la resistencia del alambre, el cual se puede medir. Estos termómetros dan la posibilidad de medir temperaturas muy bajas y muy altas, para las que los termómetros de líquido ordinarios no sirven.

9.5. Superconductividad

En 1911 el físico holandés H. Kamerlingh Onnes descubrió un fenómeno admirable, la SUPERCONDUCTIBILIDAD. Si el mercurio se enfría en helio líquido, su resistencia cambia al principio paulatinamente y luego, a la temperatura de 4,1 K, desciende en flecha hasta cero (fig. 150). A este fenómeno se le dio el nombre de superconductibilidad. Más tarde se descubrieron otros muchos superconductores.

La superconductibilidad se observa a temperaturas muy bajas, no superiores a 25 K. En la tabla que hay en las guardas se dan las temperaturas de transición al estado de superconducción de algunas sustancias.

Si en un conductor anular en estado de superconducción se crea corriente y después se elimina la fuente, la intensidad de esta corriente no cambia en tanto tiempo como se deseca. Por el contrario, en un conductor ordinario, no superconductor, la corriente cesaría muy pronto en este caso.

Los superconductores encuentran gran aplicación práctica. Así, se construyen potentes electroimanes con devanados superconductores, los cuales crean un campo magnético de gran duración sin gasto de energía, porque en estos devanados no tiene lugar desprendimiento de calor.

Sin embargo, es imposible conseguir un campo magnético tan intenso como se quiera valiéndose de un electroimán superconductor. El campo magnético, si su intensidad es demasiado grande, destruye el estado de superconducción. Un campo así puede ser creado por la corriente en el mismo superconductor. Por eso, para cada conductor en estado de superconductibilidad existe un valor crítico de la intensidad de la corriente, el cual es imposible superar sin alterar dicho estado.

Los imanes superconductores se utilizan en los aceleradores de partículas elementales, en los generadores magnetohidrodinámicos (generadores MHD),

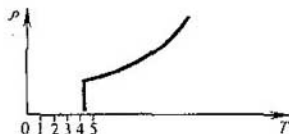


Fig. 150

que transforman la energía mecánica de un chorro de gas ionizado a alta temperatura, que se mueve en el campo magnético, en energía eléctrica.

Si se consiguiera crear materiales superconductores a temperaturas próximas a la ambiente, se habría resuelto un problema técnico importantísimo, el de la transmisión sin pérdidas de la energía por conductores. En la actualidad los físicos se esfuerzan en resolver este problema.

La superconductividad sólo puede explicarse basándose en la teoría cuántica. Esta explicación fue dada en 1957.

9.6. Circuitos eléctricos. Conexión en serie y en paralelo de los conductores

Desde la fuente de corriente la energía puede transmitirse por medio de cables a los dispositivos consumidores de ella: la lámpara eléctrica, el motor, el receptor de radio, etc. Para esto se crean circuitos eléctricos de diversa complejidad. El circuito eléctrico consta de una fuente de energía, dispositivos consumidores de ésta, conductores de conexión e interruptores para cerrar el circuito. Al circuito eléctrico se suelen conectar aparatos para controlar la intensidad de la corriente y la tensión en sus distintos trozos, es decir, amperímetros y voltímetros.

A los tipos más simples y frecuentes de conexiones de los conductores pertenecen las CONEXIONES EN SERIE Y EN PARALELO.

CONEXIÓN EN SERIE DE LOS CONDUCTORES. Cuando la conexión se hace en serie, el circuito eléctrico no tiene ramificaciones. Todos los conductores van conectados en el circuito sucesivamente, es decir, uno detrás de otro. La fig. 151 muestra la conexión en serie de dos conductores, 1 y 2, cuyas resistencias son R_1 y R_2 . Estos conductores pueden ser dos lámparas, dos devanados de motor eléctrico, etc.

La intensidad de la corriente es igual en ambos conductores:

$$I_1 = I_2 = I, \quad (9.6)$$

ya que, en el caso de la corriente continua, la carga eléctrica no se acumula en los conductores y a través de cualquier sección de ellos pasa la misma carga en un intervalo de tiempo determinado.

La tensión (o diferencia de potencial) en los extremos del trozo de circuito que se considera se compone de las tensiones en los conductores primero y segundo: $U = U_1 + U_2$.

Aplicando la ley de Ohm para todo el trozo y para los trozos cuyas resistencias son R_1 y R_2 , puede demostrarse que la resistencia total de la conexión en serie es:

$$R = R_1 + R_2. \quad (9.7)$$

Una fórmula análoga puede utilizarse para cualquier número de conductores conectados en serie.

Entre la tensión en los conductores y las resistencias de éstos en una

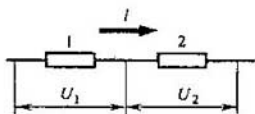


Fig. 151

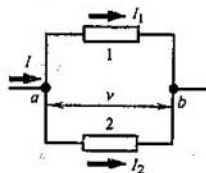


Fig. 152

conexión en serie existe la relación siguiente:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}. \quad (9.8)$$

CONEXIÓN EN PARALELO DE LOS CONDUCTORES. La fig. 152 muestra la conexión en paralelo de dos conductores, 1 y 2, cuyas resistencias son R_1 y R_2 . En este caso la corriente eléctrica I se bifurca. La intensidad de la corriente en los conductores primero y segundo la designaremos respectivamente por I_1 e I_2 . Como en el punto a , de bifurcación de los conductores (que recibe el nombre de nodo), la carga eléctrica no se acumula, la carga que llega al nodo en la unidad de tiempo es igual a la carga que sale de él en el mismo tiempo. Por consiguiente,

$$I = I_1 + I_2. \quad (9.9)$$

La tensión U en los conductores conectados en paralelo es la misma.

En la red del alumbrado se mantiene la tensión de 220 ó 127 V. Para esta tensión están calculados los aparatos consumidores de energía eléctrica. Por eso la conexión en paralelo es el procedimiento más extendido de conexión de los distintos consumidores. En este caso, si un aparato se estropea, esto no se refleja en el funcionamiento de los demás, mientras que en la conexión en serie la avería de uno de los aparatos acarrea la desconexión de todo el circuito.

Aplicando la ley de Ohm a los trozos cuyas resistencias son R_1 y R_2 puede demostrarse que la magnitud recíproca de la resistencia total del trozo ab es igual a la suma de las magnitudes recíprocas de las resistencias de los conductores por separado:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}. \quad (9.10)$$

De aquí se sigue que

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (9.11)$$

Fórmulas análogas a las (9.9) y (9.10) pueden aplicarse a las conexiones de un número cualquiera de conductores.

Entre las intensidades de la corriente en los conductores y sus resistencias en una conexión en paralelo existe la relación siguiente:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}. \quad (9.12)$$

9.7. Medida de la intensidad de la corriente y de la tensión

MEDIDA DE LA INTENSIDAD DE LA CORRIENTE.

Para medir la intensidad de la corriente en un conductor, el amperímetro se conecta en serie con dicho conductor (fig. 153). Pero debe tenerse en cuenta que el amperímetro mismo tiene cierta resistencia R_a . Por eso la resistencia del trozo de circuito con el amperímetro conectado aumenta, y, si la tensión permanece constante, la intensidad de la corriente disminuye de acuerdo con la ley de Ohm (9.3). Para que el amperímetro influya lo menos posible en la intensidad de la corriente que mide, su resistencia se hace muy pequeña. Esto debe recordarse y no intentar jamás "medir la intensidad de la corriente" en la red del alumbrado conectando el amperímetro a un enchufe. De lo contrario se producirá un cortocircuito. La intensidad de la corriente alcanza una magnitud tan grande, cuando la resistencia del aparato es pequeña, que el devanado del amperímetro se funde.

SHUNT AMPERIMÉTRICO. Todo amperímetro está calculado para medir intensidades de corriente de hasta cierto valor máximo I_0 . Pero valiéndose de una resistencia auxiliar, llamada SHUNT, conectada en paralelo con el amperímetro, puede medirse una intensidad de corriente n veces mayor: $I = nI_0$.

Hallemos la resistencia R_{sh} que debe tener el shunt para medir una intensidad de corriente n veces mayor que aquella para la cual está calculado el aparato. La resistencia del amperímetro la designaremos por R_a .

Al conectar el shunt una parte de la intensidad de la corriente I_{sh} pasa por él. A través del amperímetro debe pasar una corriente no mayor que I_0 (fig. 154). La intensidad de corriente I_0 es n veces menor que la que se mide ($I_0 = I/n$). Por consiguiente, el valor de cada división de la escala del aparato aumenta n veces, es decir, la desviación de la aguja indicadora en una división de la escala corresponderá a una intensidad n veces mayor. Dicho de otra forma, la sensibilidad del amperímetro disminuye n veces: conectando el shunt, la aguja del aparato se desviará un ángulo n veces menor que sin el shunt.

En la conexión en paralelo $I = I_0n = I_0 + I_{sh}$, y la tensión en el shunt y en el amperímetro es la misma e igual, según la ley de Ohm a: $I_0R_a = I_{sh}R_{sh}$. Despejando la intensidad I_0 en las últimas ecuaciones, se obtiene:

$$R_{sh} = \frac{R_0}{n-1}. \quad (9.13)$$

MEDIDA DE LA TENSIÓN. Para medir la tensión en un trozo de circuito de resistencia R , se conecta en paralelo a él un voltímetro. La tensión en el voltímetro coincidirá con la tensión en el trozo considerado (fig. 155).

Si la resistencia del voltímetro es R_v , después de conectarlo al circuito la resistencia del trozo no será R , sino $R' = RR_v/(R + R_v) < R$. Debido a esto, la tensión que se mide en dicho trozo disminuye. Para que el voltímetro no introduzca variaciones sensibles en la tensión que se mide, su resistencia

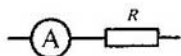


Fig. 153

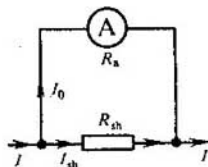


Fig. 154

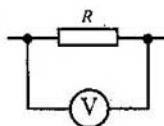


Fig. 155

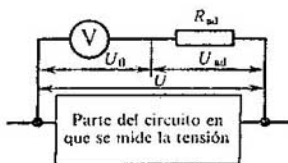


Fig. 156

debe ser grande en comparación con la del trozo de circuito en que se mide la tensión. El voltímetro se puede conectar a la red sin peligro de que se funda, siempre que esté calculado para una tensión mayor que la de la red.

RESISTENCIA ADICIONAL A UN VOLTÍMETRO. Todo voltímetro está calculado para una tensión límite U_0 . Pero mediante la conexión en serie con el voltímetro de una resistencia adicional R_{ad} se pueden medir tensiones n veces mayores: $U = nU_0$. Hallemos la resistencia adicional necesaria para medir tensiones n veces mayores que aquellas para las cuales está calculado el aparato. La resistencia del voltímetro la anotaremos por R_v .

Al conectar al circuito del voltímetro la resistencia adicional, al voltímetro corresponderá, lo mismo que antes, la tensión U_0 , pero esto constituye solamente la $1/n$ parte de la tensión que se mide ($U_0 = U/n$). La parte restante ($U_{ad} = U - U_0$) corresponderá a la resistencia adicional (fig. 156). Por eso los límites dentro de los cuales puede medir el voltímetro aumentan n veces y el mismo número de veces aumenta el valor de las divisiones de su escala y, por consiguiente, disminuye su sensibilidad.

En el voltímetro y en la resistencia adicional se establece una misma intensidad de corriente. Por lo tanto, $U_0 = IR_v$, $U_{ad} = IR_{ad}$ y $U = U_0 + U_{ad} = IR_v + IR_{ad} = nU_0 = nIR_v$. De donde

$$R_{ad} = R_v(n - 1). \quad (9.14)$$

9.8. Trabajo y potencia de la corriente continua

En el circuito eléctrico se produce una serie de transformaciones de la energía. Durante el movimiento ordenado de las partículas cargadas en un conductor, el campo eléctrico realiza trabajo. Este trabajo se suele llamar TRABAJO DE LA CORRIENTE.

Consideremos un trozo arbitrario de circuito. Éste puede ser un conductor homogéneo, por ejemplo, el filamento de una lámpara de incandescencia, el devanado de un motor, etc. Supongamos que en el tiempo Δt pasa por la sección transversal del conductor la carga Δq . En este caso el campo eléctrico realiza el trabajo $A = \Delta q U$.

Como la intensidad de la corriente $I = \Delta q / \Delta t$, el trabajo será:

$$A = IU \Delta t. \quad (9.15)$$

El trabajo de la corriente en un trozo de circuito es igual al producto de la intensidad de la corriente por la tensión y por el tiempo durante el cual se realizó el trabajo.

De acuerdo con la ley de conservación de la energía, este trabajo debe ser igual a la variación de la energía del trozo de circuito considerado. Por eso la energía desprendida en el trozo de circuito dado durante el tiempo Δt es igual al trabajo de la corriente (9.15).

Si en el trozo de circuito no se realiza trabajo mecánico ni la corriente efectúa acciones químicas, sólo tiene lugar el calentamiento del conductor. El conductor caliente cede calor a los cuerpos que lo rodean.

El calentamiento del conductor transcurre como sigue. El campo eléctrico acelera los electrones. Al chocar con los iones de la red cristalina, los electrones transmiten a éstos su energía. Como resultado, la energía del movimiento caótico de los iones en torno a las posiciones de equilibrio, aumenta. Esto significa que la energía interna aumenta. La temperatura del conductor se eleva y éste empieza a transmitir calor a los cuerpos que lo rodean. Al cabo de cierto tiempo corto de haber cerrado el circuito, el proceso se estabiliza y la temperatura cesa de variar con el tiempo. Al conductor llega continuamente energía a costa del trabajo del campo eléctrico. Pero su energía interna permanece constante, ya que el conductor cede a los cuerpos circundantes una cantidad de calor igual al trabajo de la corriente. De este modo, la fórmula (9.15) del trabajo de la corriente determina la cantidad de calor que el conductor transmite a otros cuerpos.

Si en la fórmula (9.15) se expresa la tensión por medio de la intensidad de la corriente, o la intensidad de la corriente por medio de la tensión, valiéndose de la ley de Ohm para un trozo de circuito, se obtienen tres fórmulas equivalentes del trabajo de la corriente:

$$A = IU \Delta t = I^2 R \Delta t = \frac{U^2}{R} \Delta t = Q. \quad (9.16)$$

La fórmula $A = I^2 R \Delta t$ conviene aplicarla cuando se trata de conductores conectados en serie, porque en este caso la intensidad de la corriente es igual en todos los conductores. Si la conexión es en paralelo, es mejor aplicar la fórmula $A = U^2 \Delta t / R$, ya que la tensión es igual en todos los conductores.

La ley que determina la cantidad de calor que desprende un conductor con corriente hacia el medio circundante la establecieron por primera vez, empíricamente, los científicos J. P. Joule, inglés, y E. C. Lenz, ruso. La ley de Joule-Lenz fue enunciada como sigue: la cantidad de calor que desprende un conductor con corriente es igual al producto del cuadrado de la intensi-

dad de la corriente por la resistencia del conductor y por el tiempo:

$$Q = I^2 R \Delta t. \quad (9.17)$$

Hemos obtenido esta ley valiéndonos de razonamientos basados en la ley de conservación de la energía. La fórmula (9.17) permite calcular la cantidad de calor que se desprende en cualquier trozo de un circuito que contenga todo tipo de conductores.

Todo aparato eléctrico, sea una lámpara, un motor eléctrico u otro cualquiera, está calculado para consumir una energía determinada en la unidad de tiempo. Por eso, además del trabajo de la corriente, tiene gran importancia el concepto de potencia de la corriente. La potencia de la corriente es igual a la razón del trabajo realizado por la corriente durante el tiempo Δt , a este intervalo de tiempo.

De acuerdo con la definición de potencia

$$P = \frac{A}{\Delta t} = IU. \quad (9.18)$$

Esta expresión de la potencia puede escribirse en varias formas equivalentes si se aplica la ley de Ohm para un trozo de circuito:

$$P = IU = I^2 R = U^2/R.$$

En la mayoría de los aparatos se indica la potencia que consumen.

¿ ?

1. ¿Cómo se enuncia la ley de Ohm?
2. ¿Cómo varía con la temperatura la resistencia de los metales y de las soluciones electrolíticas?
3. ¿Qué dificultades técnicas principales ofrece la utilización de los superconductores en la práctica?
4. ¿Por qué la resistencia del amperímetro debe ser pequeña y la del voltímetro, grande?
5. ¿A qué se llama trabajo de la corriente?

Ejemplos de resolución de problemas

Para resolver los problemas sobre la aplicación de la ley de Ohm (9.3), además de dicha ley es necesario tener presente que en las conexiones en serie la intensidad de la corriente es igual en todos los conductores, y la tensión en los extremos del circuito es igual a la suma de las tensiones en los trozos de circuito por separado. En las conexiones en paralelo la tensión es la misma en todos los conductores, y la intensidad de la corriente en el circuito no ramificado es igual a la suma de las intensidades de la corriente en los conductores por separado. Las fórmulas (9.7), (9.8), (9.10) y (9.12) se infieren de la ley de Ohm, pero es preferible recordarlas y aplicarlas directamente al resolver los problemas.

Para resolver los problemas relativos al trabajo y la potencia de la corriente deben aplicarse las fórmulas (9.16) y (9.18).

1. La intensidad de la corriente en un circuito, en el cual hay un reóstato, es $I =$

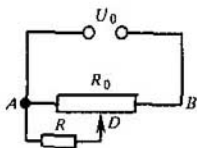


Fig. 157

= 3,2 A. La tensión entre los bornes del reóstato es $U = 14,4$ V. ¿Cuál es la resistencia R de la parte del reóstato en que existe corriente?

Solución. Según la ley de Ohm $I = U/R$, de donde $R = U/I$; $R = 4,5\Omega$.

2. El dispositivo que sirve para suministrar a la entrada de un circuito eléctrico una parte arbitraria U de una tensión continua U_0 dada, se llama divisor de tensión. Por lo general, se hace de un conductor que posee gran resistividad y se provee de un contacto deslizante que permite regular suavemente la tensión U .

Este divisor de tensión recibe el nombre de POTENCIÓMETRO. El esquema de su conexión se representa en la fig. 157. La resistencia del conductor AB es $R_0 = 4$ k Ω , la tensión en él, $U_0 = 220$ V. Entre el contacto deslizante D y el borne A del potenciómetro hay conectada una carga (consumidor), cuya resistencia es $R = 10$ k Ω .

Determinar la tensión U en la carga, cuando el contacto deslizante D está colocado de tal modo que divide al conductor AB en dos partes iguales.

Solución. En el circuito hay dos trozos conectados en serie: el AD , formado por la mitad del conductor AB (cuya resistencia es $R_0/2$) y la carga (cuya resistencia es R), conectadas en paralelo, y el DB , de resistencia igual a $R_0/2$. La resistencia del trozo AD es:

$$R_{AD} = \frac{\frac{R_0}{2} R}{\frac{R_0}{2} + R} = \frac{R_0 R}{R_0 + 2R}.$$

La resistencia total del circuito es:

$$R_{AB} = R_{AD} + \frac{R_0}{2} = \frac{2R_{AD} + R_0}{2}.$$

La intensidad de la corriente en el circuito:

$$I = \frac{U_0}{R_{AB}} = \frac{2U_0}{2R_{AD} + R_0}.$$

Y la tensión buscada será:

$$U = IR_{AD} = \frac{2U_0 R_{AD}}{2R_{AD} + R_0} = \frac{2U_0 R}{R_0 + 4R}; U = 100 \text{ V}.$$

Ejercicio
11

1. Los electrones lanzados hacia la pantalla de un tubo catódico de televisión forman un haz electrónico. ¿En qué sentido está dirigida la corriente en dicho haz?

2. En los experimentos descritos en el § 9.2, para observar la caída del potencial a lo largo del conductor se utilizó una varilla de madera y no un conductor metálico, ¿por qué?
3. Determinar el área de la sección transversal y la longitud de un conductor de cobre, si su resistencia es de $0,2\Omega$ y su masa, de $0,2$ kg. La densidad del cobre es de 8900 kg/m³.
4. Un galvanómetro, cuya resistencia interna es de 600Ω , se shunta con una resistencia de 25Ω . ¿Cuántas veces mayor se hará el valor de las divisiones de la escala del galvanómetro?
5. Con un voltímetro, cuya resistencia interna es $R_v = 1000\Omega$, calculado para la tensión máxima $U_0 = 150$ V, hay que medir una tensión seis veces mayor, $U = 900$ V. ¿Qué resistencia adicional habrá que conectar en serie con el voltímetro para realizar esta medición?
6. A los extremos de un conductor de cobre de 300 m de longitud se aplica una tensión de 36 V. Hallar la velocidad media del movimiento ordenado de los electrones en el conductor, si la concentración de los electrones de conducción en el cobre es de $8,5 \cdot 10^{28}$ m⁻³.
7. ¿Cómo cerciorarse de que en un superconductor anular se establece en realidad una corriente invariable?
8. Un alambre largo, en cuyos extremos se mantiene una tensión constante, se calienta hasta ponerse rojo. Si una parte de este alambre se sumerge en agua fría, la parte que queda fuera del agua se calienta aún más, ¿por qué?
9. La espiral de un hornillo eléctrico se ha fundido. Después de volver a unir sus extremos la espiral queda algo más corta. ¿Cómo variará la cantidad de calor que desprende el hornillo en un tiempo determinado?
10. Durante cierto intervalo de tiempo un hornillo eléctrico conectado a una red de tensión constante desprende la cantidad de calor Q . ¿Qué cantidad de calor desprenderán en el mismo tiempo dos hornillos eléctricos, iguales que el primero, conectados en serie a la misma red? ¿Y si se conectan en paralelo?
11. El devanado de aluminio de un electroimán a 0°C consume 5 kW de potencia. ¿Qué potencia consumirá este devanado si durante el funcionamiento su temperatura se eleva hasta 60°C y la tensión permanece invariable? Responder a esta misma pregunta si en el devanado se mantiene invariable la intensidad de la corriente.
12. La tirada de "Física 3" es de tres millones de ejemplares (en ruso). Para editarla se necesitan 1200 t de papel, cuya fabricación requiere $840\,000$ kW·h de energía eléctrica. La magnitud de estas cifras se puede valorar en el siguiente ejemplo.

Una locomotora eléctrica que arrastrara un tren de la misma masa que dicho papel y que consumiera la misma energía eléctrica, recorrería en 7 días 7500 km.

¿Cuál es el rendimiento de la locomotora eléctrica y la intensidad de la corriente en sus motores, si la tensión en la red de contacto es de 3000 V y la fuerza de tracción de la locomotora es igual, aproximadamente, a $1/30$ del peso del tren?

9.9. Fuerza electromotriz

Si por medio de un conductor se unen dos esferas metálicas, portadoras de cargas de signos contrarios, bajo la influencia del campo eléctrico de éstas se produce en el conductor una corriente eléctrica (fig. 158). Pero esta corriente durará muy poco. Las cargas se neutralizan

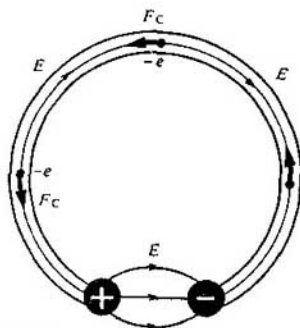


Fig. 158

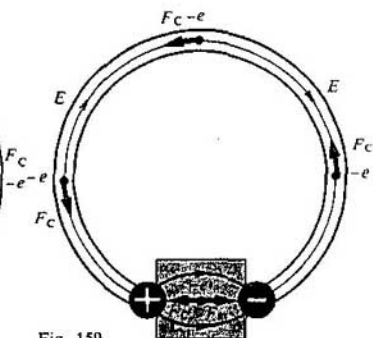


Fig. 159

pronto, la diferencia de potencial entre las esferas se equilibra y la intensidad del campo eléctrico se anula.

FUERZAS EXTERIORES. Para que la corriente sea continua hay que mantener constante la tensión entre las esferas. Esto requiere un dispositivo (fuente de corriente) que transporte las cargas de una esfera a otra en sentido contrario al de las fuerzas que actúan sobre estas cargas por parte del campo eléctrico de las esferas. En este dispositivo deben actuar sobre las cargas fuerzas de origen no electrostático (fig. 159). El campo eléctrico de las partículas cargadas (campo coulombiano) es incapaz él solo de mantener la corriente continua en el circuito.

Toda fuerza que actúe sobre las partículas cargadas eléctricamente, a excepción de las fuerzas de origen electrostático (o sea, coulombianas), recibe el nombre de fuerza exterior.

La conclusión de que las fuerzas exteriores son necesarias para mantener la corriente continua en el circuito se hace aún más evidente si se recurre a la ley de conservación de la energía. El campo electrostático es un campo de potencial. El trabajo que realiza este campo en trasladar las partículas cargadas a lo largo de un circuito eléctrico cerrado es nulo. En cambio, el paso de la corriente por los conductores va acompañado de desprendimiento de energía, ya que el conductor se calienta. Por consiguiente, en todo circuito debe haber una fuente que suministre energía al circuito. En esta fuente, además de las fuerzas de Coulomb, deben actuar necesariamente fuerzas exteriores, no potenciales. El trabajo de estas fuerzas a lo largo del circuito cerrado debe ser distinto de cero. Precisamente durante el proceso de realización del trabajo por estas fuerzas, las partículas cargadas adquieren energía dentro de la fuente de corriente y, luego, al moverse por los conductores del circuito eléctrico, la ceden.

Las fuerzas exteriores ponen en movimiento las partículas cargadas dentro de todas las fuentes de corriente: en los generadores de las centrales eléctricas, en las pilas, en los acumuladores, etc.

Al cerrar un circuito se crea el campo eléctrico en todos los conductores que lo forman. Dentro de la fuente las cargas se mueven, bajo la acción de

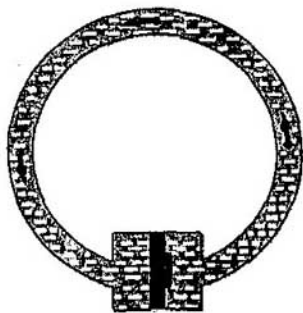


Fig. 160

las fuerzas exteriores, en sentido opuesto al de las fuerzas de Coulomb (las negativas van del más al menos), y en el resto del circuito las pone en movimiento el campo eléctrico (fig. 159).

ANALOGÍA ENTRE LA CORRIENTE ELÉCTRICA Y LA CORRIENTE DE UN LÍQUIDO. Para que se comprenda mejor lo antedicho vamos a recurrir a la analogía entre la corriente eléctrica en un conductor y la corriente de un líquido por los tubos. En cualquier trozo horizontal de tubería el líquido corre a costa de la diferencia de presión entre los extremos del trozo. El líquido se mueve en el sentido en que disminuye la presión. Pero la fuerza de la presión en el líquido es un tipo de las fuerzas de elasticidad, que son potenciales, y, por lo tanto, semejantes a las de Coulomb. Por eso el trabajo de estas fuerzas en un camino cerrado es nulo y dichas fuerzas son incapaces de producir una circulación duradera del líquido por los tubos. La corriente del líquido lleva consigo pérdidas de energía, debidas a la acción de las fuerzas de rozamiento. Para que el agua circule hace falta una bomba. El émbolo de esta bomba actúa sobre las partículas del líquido y crea una diferencia de presión constante entre la entrada y la salida de la bomba (fig. 160). En virtud de esto el líquido pasa por el tubo. La bomba es la análoga de la fuente de corriente y el papel de las fuerzas externas lo desempeña la fuerza que actúa sobre el agua por parte del émbolo en movimiento. Dentro de la bomba el líquido pasa de la parte en que la presión es menor a la parte en que la presión es mayor.

NATURALEZA DE LAS FUERZAS EXTERIORES. La naturaleza de las fuerzas exteriores puede ser diversa. En los generadores de las centrales eléctricas la fuerza exterior es la fuerza que, por parte del campo magnético, actúa sobre los electrones en el conductor que se mueve. De esto se trató brevemente en el curso de "Física 1" (Ed. MIR).

En una pila, por ejemplo en la de Volta, actúan fuerzas químicas de naturaleza electromagnética. La pila de Volta consta de un electrodo de zinc y otro de cobre sumergidos en una solución de ácido sulfúrico. Las fuerzas químicas hacen que el zinc se disuelva en el ácido. A la solución pasan los iones de zinc, cargados positivamente, y el propio electrodo de zinc se carga negativamente. El cobre se disuelve muy poco en el ácido sulfúrico. Por eso

entre los electrodos de zinc y de cobre se produce una diferencia de potencial que condiciona la corriente en el circuito eléctrico cerrado.

FUERZA ELECTROMOTRIZ. La acción de las fuerzas exteriores se caracteriza por una magnitud física importante llamada FUERZA ELECTROMOTRIZ (abreviado f.e.m.). La fuerza electromotriz en un circuito cerrado es la razón del trabajo de las fuerzas exteriores en transportar la carga a lo largo del circuito, a esta misma carga¹⁾:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ex}}}{\Delta q} \quad (9.19)$$

Lo mismo que la diferencia de potencial, la fuerza electromotriz se expresa en voltios.

Puede hablarse de fuerza electromotriz en cualquier trozo de circuito. Ésta será el trabajo específico de las fuerzas exteriores (trabajo de traslación de la carga unitaria) no en todo el circuito, sino únicamente en el trozo dado. La fuerza electromotriz de una pila es el trabajo que realizan las fuerzas exteriores en trasladar, dentro de ella, una carga positiva unitaria de un polo a otro. Debe subrayarse una vez más que el trabajo de las fuerzas exteriores no puede expresarse por medio de la diferencia de potencial, porque las fuerzas exteriores no son potenciales y su trabajo depende de la forma de la trayectoria. Así, por ejemplo, el trabajo que realizan las fuerzas exteriores en trasladar una carga entre los bornes de la fuente de corriente, fuera de ésta, es nulo.

Como la fuerza electromotriz es un trabajo específico, es también una magnitud escalar que puede ser tanto positiva como negativa.

9.10. Ley de Ohm para un circuito cerrado

Consideremos un circuito cerrado muy simple, formado por una fuente (pila, acumulador o generador) y una resistencia R (fig. 161). La fuente de corriente tiene la f.e.m. \mathcal{E} y la resistencia r . La resistencia de la fuente se suele llamar resistencia interna, para diferenciarla de la resistencia exterior R del circuito. En un generador r es la resistencia de los devanados, y en una pila, la resistencia de la solución electrolítica y de los electrodos.

La ley de Ohm para un circuito cerrado relaciona la intensidad de la corriente en el circuito, f.e.m. y la resistencia total $R + r$. Esta relación puede establecerse teóricamente aplicando la ley de conservación de la energía y la ley de Joule-Lenz (9.17).

Supongamos que en el tiempo Δt pasa por la sección transversal del conductor la carga Δq . Entonces el trabajo que realizan las fuerzas exteriores

¹⁾ Como se ve por la definición, la f.e.m. es numéricamente igual al trabajo realizado en transportar una carga positiva unitaria, y no una fuerza en el sentido ordinario de esta palabra. En este caso la terminología que se emplea tampoco es acertada, pero fue establecida hace mucho tiempo.

en trasladar la carga Δq se puede escribir así: $A_{\text{ex}} = \mathcal{E} \Delta q$. De acuerdo con la definición de intensidad de corriente (9.1), $\Delta q = I \Delta t$. Por lo tanto,

$$A_{\text{ex}} = \mathcal{E} I \Delta t. \quad (9.20)$$

Al realizarse este trabajo en las partes interna y externa del circuito, cuyas resistencias son r y R , se desprende cierta cantidad de calor. Según la ley de Joule-Lenz este calor será:

$$Q = I^2 R \Delta t + I^2 r \Delta t. \quad (9.21)$$

Y, de acuerdo con la ley de conservación de energía, $A = Q$. Igualando entre sí (9.20) y (9.21), se obtiene:

$$\mathcal{E} = IR + Ir. \quad (9.22)$$

El producto de la intensidad de la corriente por la resistencia del trozo de circuito se suele denominar CAÍDA DE TENSIÓN EN DICHO TROZO. Por lo tanto, la f.e.m. es igual a la suma de las caídas de tensión en las partes interna y exterior del circuito cerrado.

Por lo general, la ley de Ohm para un circuito cerrado se escribe en la forma siguiente:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}. \quad (9.23)$$

La intensidad de la corriente en un circuito cerrado es igual a la razón de la f.e.m. del circuito a su resistencia total.

La intensidad de la corriente depende de tres magnitudes: la f.e.m. \mathcal{E} y las resistencias R y r de las partes interna y exterior del circuito. La resistencia interna de la fuente de corriente no ejerce una influencia apreciable en la intensidad de la corriente, si es pequeña en comparación con la resistencia de la parte exterior del circuito ($R \gg r$). En este caso la tensión en los bornes de la fuente es aproximadamente igual a la f.e.m.: $U = IR \approx \mathcal{E}$.

Pero si se produce un cortocircuito ($R \rightarrow 0$) la intensidad de la corriente en el circuito la determina precisamente la resistencia interna de la fuente y puede ser muy grande cuando la fuerza electromotriz es de varios voltios, si r es pequeña (por ejemplo, en un acumulador $r \approx 0,1-0,001 \Omega$). Los cables pueden fundirse y la fuente misma inutilizarse.

Si en el circuito hay varias pilas conectadas en serie, cuyas f.e.m. sean

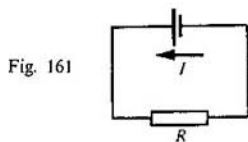


Fig. 161

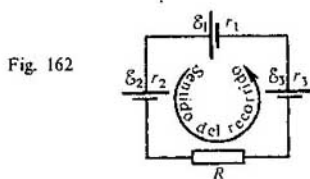


Fig. 162

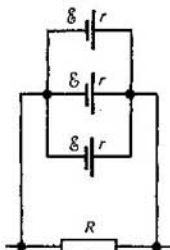


Fig. 163

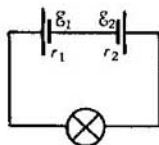


Fig. 164

$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$, etc., la f.e.m. total del circuito será igual a la suma algebraica de las f.e.m. de las pilas por separado. Para determinar el signo de la f.e.m. de una fuente cualquiera es preciso primero elegir convencionalmente el sentido positivo de la corriente en el circuito. En la fig. 162 se considera positivo (arbitrariamente) el sentido opuesto al de las agujas del reloj.

Si al recorrer el circuito se pasa del polo negativo de una fuente al positivo, la f.e.m. $\mathcal{E} > 0$. En este caso las fuerzas exteriores realizan dentro de la fuente un trabajo positivo. En cambio, si al recorrer el circuito se pasa del polo positivo de la fuente al negativo, la f.e.m. será negativa y las fuerzas exteriores realizarán dentro de la fuente un trabajo negativo. Así, para el circuito representado en la fig. 162:

$$\mathcal{E} = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = |\epsilon_1| - |\epsilon_2| + |\epsilon_3|.$$

Si $\mathcal{E} > 0$, de acuerdo con (9.23), la intensidad de la corriente $I > 0$, es decir, el sentido de la corriente coincide con el del recorrido del circuito. Cuando $\mathcal{E} < 0$, al contrario, el sentido de la corriente es opuesto al del recorrido del circuito. La resistencia total del circuito R_t es igual a la suma de todas las resistencias: $R_t = R + r_1 + r_2 + r_3$.

Si varias pilas (u otras fuentes) de igual f.e.m. están conectadas en paralelo, la f.e.m. de la batería es igual a la f.e.m. de una de las pilas (fig. 163). La resistencia interna de la batería se calcula por la regla general de la conexión de conductores en paralelo. Para el circuito representado en la fig. 163, según la ley de Ohm para un circuito cerrado, la intensidad de la corriente se determina por la fórmula

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + \frac{r}{3}}.$$

¿ ?

1. ¿Por qué el campo eléctrico de las partículas cargadas (campo coulombiano) es incapaz de mantener la corriente eléctrica continua en un circuito?
2. ¿Qué son las fuerzas exteriores?
3. ¿A qué se llama fuerza electromotriz?
4. Enuncie la ley de Ohm para un circuito cerrado.
5. ¿De qué depende el signo de la f.e.m. en la ley de Ohm para un circuito cerrado?

Ejemplos de resolución de problemas

En los problemas relacionados con la f.e.m. hay que conocer la ley de Ohm para un circuito cerrado (9.23) y saber colocar correctamente los signos de las f.e.m. en esta ley, cuando en el circuito hay varias fuentes de corriente. Además, en muchos problemas es necesario aplicar la ley de Ohm para un trozo de circuito (9.3) y las expresiones (9.16) y (9.18) del trabajo y de la potencia de la corriente.

1. Un acumulador de f.e.m. $|\mathcal{E}| = 6 \text{ V}$ y de resistencia interna $r = 0,1 \Omega$, alimenta un circuito exterior de resistencia $R = 12,4 \Omega$. ¿Qué cantidad de calor Q se desprende en el tiempo $t = 10 \text{ min}$ en todo el circuito?

Solución. De acuerdo con la ley de Ohm para un circuito cerrado, la corriente en el circuito es $I = \mathcal{E}/(R + r)$. La cantidad de calor que se desprende en la parte exterior del circuito es $Q_1 = I^2 R t$, y en la parte interna, $Q_2 = I^2 r t$. La cantidad total de calor que se desprende será:

$$Q = Q_1 + Q_2 = I^2 (R + r) t = \frac{\mathcal{E}^2 t}{R + r}; \quad Q = 1728 \text{ J.}$$

2. Una pila de f.e.m. $|\mathcal{E}| = 5 \text{ V}$ y resistencia interna $r = 0,2 \Omega$, se conecta en circuito cerrado con una resistencia exterior $R = 40 \Omega$. ¿A qué será igual la tensión U en la resistencia externa?

Solución. De acuerdo con la ley de Ohm para un trozo de circuito, $U = IR$. La intensidad de la corriente en el circuito cerrado $I = \mathcal{E}/(R + r)$. De donde $U = \mathcal{E}R/(R + r)$; $U \approx 4,8 \text{ V}$.

- Ejercicio 12
1. ¿A qué es igual la tensión en los bornes de una pila, cuya f.e.m. es igual a \mathcal{E} , si el circuito está abierto?
 2. ¿A qué será igual la intensidad de la corriente si se cortocircuita un acumulador de f.e.m. $|\mathcal{E}| = 12 \text{ V}$ y resistencia interna $r = 0,01 \Omega$?
 3. La batería de una linterna de bolsillo se conecta a un reóstato. Cuando la resistencia del reóstato es de $1,65 \Omega$, la tensión en él es de $3,30 \text{ V}$, y cuando la resistencia es de $3,50 \Omega$, la tensión es de $3,50 \text{ V}$. Hallar la f.e.m. y la resistencia interna de la batería.
 4. Dos pilas, cuyas f.e.m. respectivas son de $4,50$ y $1,50 \text{ V}$ y cuyas resistencias internas son de $1,50$ y $0,50 \Omega$, están conectadas como se ve en la fig. 164 y alimentan una lamparita de linterna de bolsillo. ¿Qué potencia consume dicha lamparita, si se sabe que la resistencia de su filamento cuando está caldeado es igual a 23Ω ?
 5. Un circuito cerrado se alimenta de una fuente con 6 V de f.e.m. y $0,1 \Omega$ de resistencia interna. Construir las gráficas de la intensidad de la corriente en el circuito y de la tensión en los bornes de la fuente, en función de la resistencia de la parte exterior.
 6. Dos pilas de igual f.e.m., de $4,1 \text{ V}$ cada una, pero de resistencias internas distintas, la una de 4Ω y la otra de 6Ω , están acopladas por los polos de igual signo, de los cuales se han hecho bornes. ¿Qué f.e.m. y qué resistencia interna debe tener una pila para poder sustituir a esta batería?

Breve resumen del capítulo IX

El movimiento dirigido (ordenado) de las partículas cargadas se llama corriente eléctrica. La intensidad de la corriente es igual a la razón de la carga Δq transportada a través de la sección transversal del conductor durante un intervalo de tiempo Δt , a este mismo intervalo: $I = \Delta q / \Delta t$.

La intensidad de la corriente se mide en amperios. Según la ley de Ohm para un trozo de circuito

$$I = \frac{U}{R},$$

donde U es la tensión en los extremos del trozo de circuito, y R , la resistencia de éste. La resistencia se mide en ohmios: $1\Omega = 1\text{ V}/1\text{ A}$.

La resistencia de los conductores metálicos aumenta, al elevarse su temperatura, de un modo aproximadamente lineal. Una serie de metales puros y aleaciones a temperaturas próximas al cero absoluto pierden totalmente la resistencia. Este fenómeno se llama superconductibilidad.

Durante el movimiento ordenado de las partículas cargadas por el conductor, el campo eléctrico realiza el trabajo denominado trabajo de la corriente. El trabajo de la corriente durante el tiempo Δt en un trozo de conductor es:

$$A = IU\Delta t.$$

La cantidad de calor que se desprende en el conductor con corriente, según la ley de Joule-Lenz, es:

$$Q = I^2 R \Delta t.$$

La potencia de la corriente $P = A/\Delta t = IU$.

Las fuerzas potenciales del campo coulombiano no pueden mantener la corriente continua en un circuito cerrado, ya que no realizan trabajo al trasladar las partículas cargadas a lo largo del circuito cerrado. En el circuito deben existir fuerzas externas no potenciales de una u otra naturaleza. Estas fuerzas actúan dentro de la fuente de corriente que se conecta al circuito.

La razón del trabajo que realizan las fuerzas exteriores en trasladar la carga Δq a lo largo del circuito cerrado, a dicha carga, se llama fuerza electromotriz:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ex}}}{\Delta q}.$$

La intensidad de la corriente en un circuito cerrado es igual a la razón de la f.e.m. del circuito a su resistencia total:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}.$$

10. La corriente eléctrica en distintos medios

10.1. Conductibilidad eléctrica de las diversas sustancias

Hemos estudiado con detalles la corriente eléctrica en los conductores metálicos y conocido la característica tensión-intensidad de estos conductores establecida empíricamente, es decir, la ley de Ohm. Los conductores metálicos se emplean mucho en la transmisión de la energía eléctrica desde la fuente de corriente hasta el consumidor. Así mismo estos conductores se utilizan en los motores y generadores eléctricos, en los aparatos eléctricos de caldeo, etc.

A la vez que los metales, son buenos conductores, es decir, *sustancias con gran cantidad de partículas cargadas libres*, las soluciones acuosas o las fusiones de electrolitos y el gas ionizado o plasma. Estos conductores también se usan mucho en la técnica. En los dispositivos electrónicos de vacío la corriente eléctrica la forman los flujos de electrones.

Además de los conductores y de los dieléctricos o *sustancias con pequeña cantidad de partículas cargadas libres*, existe un grupo de sustancias cuya conductibilidad ocupa una posición intermedia entre los conductores y los dieléctricos. Estas sustancias conducen la electricidad no tan bien que sea posible llamarlas conductoras, ni tan mal que se las pueda calificar de dieléctricas. Por eso se les ha dado el nombre de SEMICONDUCTORES.

Hasta hace poco tiempo los semiconductores no desempeñaban un papel práctico apreciable. En la electrónica y en radiotecnia se utilizaban exclusivamente diversos conductores y dieléctricos. Pero la situación ha cambiado radicalmente e incluso puede decirse que en radiotecnia se ha producido una revolución cuando, al principio teóricamente y después por vía experimental, fue descubierta y estudiada la posibilidad de controlar fácilmente la conductibilidad eléctrica de los semiconductores.

Es natural que para transmitir la energía eléctrica por cables se siguen empleando los materiales conductores. Los semiconductores se utilizan como elementos transformadores de la corriente en los receptores de radio, en las máquinas calculadoras, etc.

En este capítulo vamos a estudiar los procesos físicos que condicionan el paso de la corriente eléctrica a través de los diversos medios. Empezaremos por los conductores metálicos. La característica tensión-intensidad de estos conductores nos es conocida, pero hasta ahora no se ha dicho nada de su explicación desde el punto de vista de la teoría cinético-molecular.

10.2. Conducción por electrones de los metales

Los portadores de la carga libre en los metales son los electrones. Estos electrones participan en el movimiento térmico caótico. Bajo la acción del campo eléctrico empiezan a desplazarse ordenadamente con una velocidad media del orden de 10^{-4} m/s (véase el 9.1).



Leonid Isaákovich Mandelshtam (1879–1944), uno de los más grandes físicos soviéticos, académico. Hizo una gran aportación al desarrollo de la teoría de las oscilaciones, de la radiofísica y de la óptica. Con G.S. Lándsberg descubrió la dispersión de la luz por los cristales que va acompañada de la variación de la frecuencia (llamada dispersión de combinación y también efecto Raman). L. I. Mandelshtam creó toda una dirección en la física soviética. Discípulos suyos fueron después los académicos A. A. Andrónov y M. A. Leontóvich y los profesores S. M. Ritov y S. P. Strelkov.

DEMOSTRACIÓN EXPERIMENTAL DE LA EXISTENCIA DE LOS ELECTRONES LIBRES EN LOS METALES. La demostración experimental de que la conductibilidad de los metales se debe al movimiento de los electrones libres fue dada por L. I. Mandelshtam y N. D. Papalexí (en 1913) y por T. Stewart y R. Tolman (en 1916).

El esquema de estos experimentos es el siguiente. En una bobina se arrolla un alambre, cuyos extremos se sueldan a dos discos metálicos aislados entre sí (fig. 165). A los bordes de los discos, por medio de contactos deslizantes, se conecta un galvanómetro.

La bobina se hace girar con rapidez y luego se para bruscamente. Después de parar bruscamente la bobina, las partículas cargadas libres se mueven por inercia respecto del conductor durante cierto tiempo y, por consiguiente, en dicha bobina se produce corriente eléctrica. Esta corriente dura poco, ya que, a causa de la resistencia del conductor, las partículas cargadas se deceleran y su movimiento ordenado, que genera la corriente, cesa.

Las observaciones demostraron que en el circuito, después de parar la bobina, existe corriente durante cierto tiempo. El sentido de ésta indica que está creada por el movimiento de partículas con carga negativa. La carga transportada al ocurrir esto es proporcional a la razón de la carga de las partículas que crean la corriente, a su masa, es decir, e/m . Por eso, midiendo

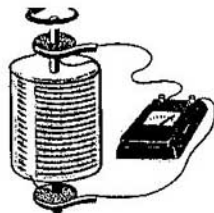


Fig. 165

la carga que pasa por el galvanómetro durante el tiempo que existe la corriente en el circuito, se consiguió determinar la relación e/m , que resultó ser igual a $1,8 \cdot 10^{11}$ C/kg. Esta magnitud coincide con la razón de la carga a la masa del electrón, hallada antes en otros experimentos.

MOVIMIENTO DE LOS ELECTRONES EN UN METAL. Los electrones, bajo la influencia de la fuerza continua que actúa sobre ellos por parte del campo eléctrico, adquieren una velocidad determinada del movimiento ordenado. Esta velocidad no aumenta después con el tiempo, porque por parte de los iones de la red cristalina actúa sobre los electrones cierta fuerza deceleradora. Esta fuerza es semejante a la de la resistencia que actúa sobre una piedra cuando ésta se hunde en el agua. Como resultado la velocidad media del movimiento ordenado de los electrones es proporcional a la intensidad del campo eléctrico en el conductor; $v \sim E$, y, por lo tanto, a la diferencia de potencial en los extremos del conductor, ya que $E = U/l$, siendo l la longitud del conductor.

Sabemos que la intensidad de la corriente en el conductor es proporcional a la velocidad del movimiento ordenado de las partículas (véase la fórmula 9.2). Por consiguiente, podemos decir que la intensidad de la corriente es proporcional a la diferencia de potencial entre los extremos del conductor, $I \sim U$. En esto consiste la explicación cualitativa de la ley de Ohm sobre la base de la teoría electrónica de la conductibilidad de los metales.

Construir una teoría cuantitativa satisfactoria del movimiento de los electrones en el metal, basándose en las leyes de la mecánica clásica, es imposible. Esto se debe a que las condiciones en que se efectúa el movimiento de los electrones en el metal son tales, que la mecánica clásica de Newton es inaplicable para su descripción. Esto se puede ver claramente en el ejemplo que sigue. Si se determina experimentalmente la energía cinética media del movimiento térmico de los electrones en el metal a la temperatura ambiente y se halla la temperatura correspondiente a esta energía por la fórmula $mv^2/2 = 3kT/2$, se obtiene una temperatura del orden de 10^5 – 10^6 K. Esa temperatura existe en el interior de las estrellas. El movimiento de los electrones en el metal se subordina a las leyes de la mecánica cuántica (las leyes de la mecánica clásica newtoniana son inaplicables en este caso).

¿ ?

1. Enumere las sustancias (materiales) que son buenos conductores de la corriente eléctrica.
2. La bobina en el experimento representado en la fig. 165 estaba girando en el sentido de las agujas del reloj y después se frenó bruscamente. Determine el sentido de la corriente eléctrica en dicha bobina en el instante de frenarla.
3. ¿Cómo depende la velocidad del movimiento ordenado de los electrones en un conductor metálico de la tensión en los extremos del mismo?

10.3. La corriente eléctrica en los líquidos

Los líquidos, lo mismo que los sólidos, pueden ser dieléctricos, conductores y semiconductores. A los dieléctricos pertenece el agua destilada, a los conductores, las soluciones de electrólitos: ácidos, álcalis y sales. Son semiconductores líquidos, por ejemplo, el selenio fundido y las fusiones de los sulfuros.

DISOCIACIÓN ELECTROLÍTICA. En el curso de química inorgánica se explica detalladamente de por qué las soluciones acuosas de los electrólitos conducen la corriente eléctrica. Cuando los electrólitos se disuelven, bajo la influencia del campo eléctrico de las moléculas polares del agua transcurre la desintegración de las moléculas de los electrólitos en iones separados. Este proceso recibe el nombre de DISOCIACIÓN ELECTROLÍTICA.

El grado de disociación, es decir, la parte de las moléculas de sustancia disuelta que se desintegran en iones depende de la temperatura, de la concentración de la disolución y de la permitividad ϵ del disolvente. Con el aumento de la temperatura crece el grado de disociación y, por consiguiente, aumenta la concentración de iones cargados positiva y negativamente.

Los iones de signos distintos, al encontrarse, se pueden volver a unir formando moléculas neutras (recombinación). Si las condiciones no varían, en la solución se establece un equilibrio dinámico con el cual el número de moléculas que, por segundo, se desintegran en iones es igual al número de pares de iones que en el mismo tiempo vuelven a juntarse y formar moléculas neutras.

CONDUCCIÓN POR IONES. Los portadores de carga en las disoluciones acuosas y en las fusiones de electrólitos son los iones cargados positiva y negativamente.

Si un recipiente con solución de electrólito se conecta a un circuito eléctrico, los iones negativos empiezan a moverse hacia el electrodo positivo o ánodo y los positivos, hacia el negativo o cátodo. Como resultado se establece la corriente eléctrica. En virtud de que el transporte de carga se efectúa en las soluciones acuosas y en las fusiones de electrólitos por medio de los iones, se dice que esta conducción es POR IONES.

Los líquidos pueden conducir también por electrones. Este tipo de conductibilidad lo tienen, por ejemplo, los metales líquidos.

ELECTRÓLISIS. En la conducción por iones el paso de la corriente va ligado a un transporte de sustancia. En los electrodos se produce desprendimiento de las sustancias que entran en la composición de los electrólitos. En el ánodo los iones cargados negativamente ceden sus electrones superfluos (en química esto es una reacción de oxidación), y en el cátodo los iones positivos adquieren los electrones que les faltan (reacción de reducción). El proceso de desprendimiento de sustancia en los electrodos, debido a las reacciones de oxidación y reducción, se llama ELECTRÓLISIS.

APLICACIONES DE LA ELECTRÓLISIS. La electrólisis se utiliza mucho en la técnica para diversos fines. Por vía electrolítica se recubre la superficie de un metal con una tenue capa de otro (niquelado, cromado, cobreado, etc.). Este recubrimiento protege la superficie contra la corrosión.

Si se toman medidas para que el recubrimiento electrolítico se pueda separar fácilmente de la superficie en que se haya depositado el metal (lo que se consigue, por ejemplo, recubriendo de grafito dicha superficie), se puede obtener una copia del relieve de la superficie.

En la industria tipográfica estas copias (estereotipos) se obtienen de las matrices (impreso de la composición sobre un material plástico). Para esto se deposita sobre las matrices una capa gruesa de hierro o de otro material. De esta forma se puede reproducir la composición en tantos ejemplares como sea necesario. Si antes la tirada de un libro se limitaba al número de impresiones posibles de obtener de una composición (porque durante la impresión se desgasta la matriz), ahora el empleo de los estereotipos permite aumentar mucho la tirada.

En la actualidad sólo se recurre a la electrólisis cuando se trata de obtener estereotipos para libros de alta calidad de impresión y con gran número de ilustraciones.

El proceso de obtención de recubrimientos exfoliables (galvanoplastia) fue elaborado por el científico ruso B.S. Yakobi, que en 1836 utilizó este procedimiento para hacer las imágenes huecas que adornan la catedral de San Isaac de Leningrado.

Por medio de la electrólisis se depuran los metales. Así, el cobre impuro obtenido del mineral, se funde, dándole forma de chapas gruesas, las cuales se colocan después en un baño electrolítico como ánodos. Durante la electrólisis el cobre del ánodo se disuelve, las impurezas, que contienen metales raros y de valor, precipitan en el fondo, y sobre el cátodo se deposita cobre puro.

Por electrólisis se obtiene el aluminio de las fusiones de bauxitas. Precisamente por este procedimiento de obtención del aluminio se ha conseguido que éste sea un metal barato y, junto con el hierro, el más extendido en la técnica y en los usos domésticos.

10.4. Ley de la electrólisis

Durante la electrólisis se produce en los electrodos un desprendimiento de sustancia. ¿De qué depende la masa de sustancia que se desprende en un tiempo determinado Δt ? Es evidente que esta masa será igual al producto de la masa de un ion m_{0i} por el número de iones N_i que llegan al electrodo en el tiempo Δt :

$$m = m_{0i} N_i. \quad (10.1)$$

La masa del ion m_{0i} , según la fórmula (1.5), es:

$$m_{0i} = \frac{M}{N_A}, \quad (10.2)$$

donde M es la masa molar (o atómica) de la sustancia, y N_A , la constante de Avogadro, es decir, el número de iones que hay en un mol.

El número de iones que han llegado al electrodo será:

$$N_i = \frac{\Delta q}{q_{0i}}, \quad (10.3)$$

donde $\Delta q = I\Delta t$ es la carga que pasa a través del electrolito en el tiempo Δt ; q_{0i} , la carga del ion, que viene determinada por la valencia n del átomo: $q_{0i} = ne$ (siendo e el módulo de la carga elemental).

Si se disocian moléculas constituidas por átomos monovalentes ($n = 1$), surgen iones de carga única. Por ejemplo, cuando se disocian las moléculas de KBr aparecen los iones K^+ y Br^- . La disociación de las moléculas de sulfato cúprico (vitriolo azul) hace que surjan los iones de carga doble Cu^{2+} y SO_4^{2-} , ya que los átomos de cobre en este compuesto son divalentes ($n = 2$). Sustituyendo en la fórmula (10.1) las expresiones (10.2) y (10.3) y teniendo en cuenta que $\Delta q = I\Delta t$ y $q_{0i} = ne$, se obtiene:

$$m = \frac{M}{neN_A} I\Delta t. \quad (10.4)$$

LEY DE FARADAY. Designemos por k el coeficiente de proporcionalidad entre la masa m de sustancia y la carga $\Delta q = I\Delta t$. Entonces,

$$m = kI\Delta t, \quad (10.5)$$

$$k = \frac{1}{eN_A} \frac{M}{n}; \quad (10.6)$$

k es un coeficiente de proporcionalidad que depende de la naturaleza de la sustancia.

Por consiguiente, la masa de sustancia que se desprende en el electrodo durante el tiempo Δt , al pasar la corriente, es proporcional a la intensidad de la corriente y al tiempo.

Esta afirmación, que hemos obtenido teóricamente, la estableció por primera vez, empíricamente, M. Faraday y lleva el nombre de LEY DE LA ELECTRÓLISIS DE FARADAY.

Por la fórmula (10.5) se ve que el coeficiente k es numéricamente igual a la masa de sustancia que se desprende en los electrodos cuando los iones transportan una carga igual a 1 C. La magnitud k se llama EQUIVALENTE ELECTROQUÍMICO DE LA SUSTANCIA DADA y se expresa en kilogramos por coulombio (kg/C).

El equivalente electroquímico tiene un sentido físico simple. Como $M/N_A = m_{0i}$ y $en = q_{0i}$, de acuerdo con (10.6), $k = m_{0i}/q_{0i}$, es decir, k es igual a la razón de la masa del ion a su carga.

Midiendo las magnitudes m y Δq se pueden determinar los equivalentes electroquímicos de las diversas sustancias.

De que la ley de Faraday es correcta podemos cerciorarnos haciendo un experimento. Montemos la instalación que se representa en la fig. 166. Los tres baños electrolíticos están llenos de la misma solución de electrolito, pero las corrientes que pasan por ellos son distintas. Designemos las intensidades

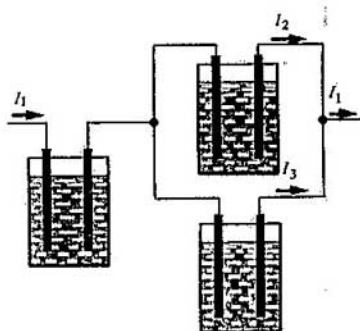


Fig. 166

de dichas corrientes por I_1 , I_2 e I_3 . Entonces $I_1 = I_2 + I_3$. Midiendo las masas m_1 , m_2 y m_3 de la sustancia que se desprende en los electrodos de los distintos baños, podemos convencernos de que estas masas son proporcionales a las respectivas intensidades I_1 , I_2 e I_3 .

CONSTANTE DE FARADAY. El producto de la carga elemental (carga del electrón) por la constante de Avogadro N_A se conoce con el nombre de constante de Faraday: $F = eN_A$. Introduciendo esta constante en la ecuación (10.4) de la masa de sustancia que se desprende durante la electrólisis, se obtiene:

$$m = \frac{1}{F} \frac{M}{n} I \Delta t. \quad (10.7)$$

Según la fórmula (10.7), F es numéricamente igual a la carga que hay que hacer pasar a través de la solución de electrólito para que se desprenda en el electrodo una masa de sustancia numéricamente igual a la razón de la masa molar de dicha sustancia a su valencia. La constante de Faraday, hallada empíricamente es $F \approx 96\,500$ C/mol.

DETERMINACIÓN DE LA CARGA DEL ELECTRÓN. Conociendo la constante de Avogadro y la de Faraday se puede hallar el módulo de la carga del electrón:

$$e = \frac{F}{N_A} = \frac{96\,500}{6,02 \cdot 10^{23}} \text{ C} \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}.$$

Precisamente por este procedimiento fue obtenido por primera vez, en 1874, el valor de la carga eléctrica elemental.

¿ ?

1. ¿A qué se llama disociación electrolítica?
2. ¿Por qué cuando pasa corriente por una solución de electrólito tiene lugar el transporte de sustancia, mientras que cuando circula por un conductor metálico esto no ocurre?
3. Enuncie la ley de Faraday para la electrólisis.
4. ¿Cómo puede determinarse la carga eléctrica elemental por el valor de la constante de Faraday hallado por vía experimental?

10.5. La corriente eléctrica en los gases

DESCARGA ELÉCTRICA EN UN GAS. Tomemos un electrómetro, conectemos a él las placas de un condensador plano y carguémoslo (fig. 167). A la temperatura ambiente, si el aire está suficientemente seco, el condensador no se descarga de un modo apreciable. Esto indica que la corriente eléctrica en el aire, debida a la diferencia de potencial entre las placas, es muy pequeña. Por consiguiente, la conductibilidad eléctrica del aire a la temperatura ambiente es muy pequeña. El aire se puede considerar como dieléctrico.

Calentemos con una cerilla el aire que hay entre las placas (fig. 168). Se observará que la aguja del electrómetro se acerca rápidamente al cero, es decir, el condensador se descarga. Por lo tanto, el gas calentado es conductor y en él se establece la corriente.

El proceso de paso de la corriente a través de un gas se llama descarga en el gas.

IONIZACIÓN DE LOS GASES. Hemos visto que a la temperatura ambiente el aire es muy mal conductor. Al calentarlo, la conductibilidad del aire aumenta. El incremento de la conductibilidad del aire se puede producir por otros procedimientos, como, por ejemplo, por la acción de diversas radiaciones: ultravioletas, de rayos X, radiactivas, etc.

En las condiciones ordinarias los gases están constituidos casi totalmente por átomos o moléculas neutros y, por consiguiente, son dieléctricos. Cuando se calientan o se someten a la acción de una radiación, parte de los átomos se ioniza, o sea, se desintegra en iones cargados positivamente y electrones (fig. 169). En el gas también pueden formarse iones negativos: su aparición se debe a que a los átomos neutros se unen electrones.

La ionización de los gases al calentarlos se explica porque, a medida que se calientan, las moléculas se mueven más de prisa. Algunas de ellas lo hacen tan rápidamente que una parte de las mismas, al chocar, se desintegra convirtiéndose en iones. Cuanto más elevada es la temperatura, más iones se forman.

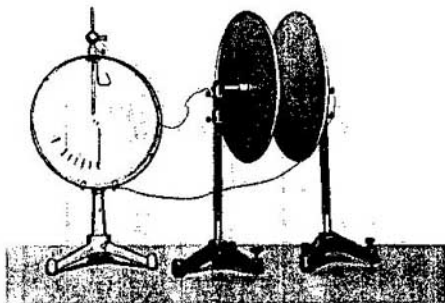


Fig. 167

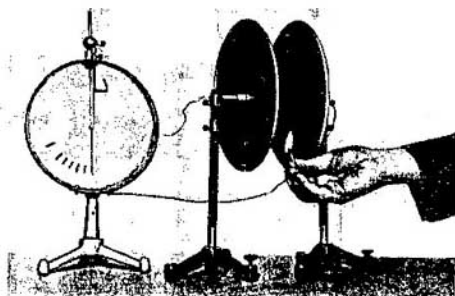


Fig. 168

CONDUCTIBILIDAD DE LOS GASES. El mecanismo de la conductibilidad de los gases se parece al de las soluciones y fusiones de los electrólitos. Pero se diferencia en que la carga negativa no es transportada por los iones negativos, como en aquéllas, sino por los electrones, aunque la conducción por iones negativos también puede desempeñar un papel determinado. Así, pues, en los gases se combina la conducción por electrones, semejante a la de los metales, con la conducción por iones, parecida a la de las soluciones acuosas o de las fusiones de los electrólitos. También existe otra diferencia esencial. En las soluciones electrolíticas la formación de los iones se debe al debilitamiento de las ligaduras intramoleculares de los iones de las moléculas del soluto bajo la acción de las moléculas del solvente (moléculas de agua). En los gases se forman los iones al calentar el gas o a costa de la acción de ionizadores exteriores, como, por ejemplo, de las radiaciones.

RECOMBINACIÓN. Si el ionizador deja de actuar, puede observarse que el electrómetro cargado vuelve a conservar la carga. Esto indica que una vez que cesa la acción del ionizador, el gas deja de ser conductor. La corriente se interrumpe en cuanto todos los iones y electrones llegan a los electrodos.

Así mismo, cuando un electrón se aproxima a un ion cargado positivamente, ambos pueden formar de nuevo un átomo neutro. Esto se representa esquemáticamente en la fig. 170. Este proceso recibe el nombre de **RECOMBINACIÓN DE LAS PARTÍCULAS CARGADAS.**

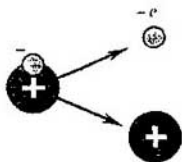


Fig. 169

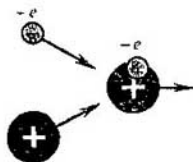


Fig. 170

En ausencia de campo exterior, las partículas cargadas sólo desaparecen a causa de la recombinación y el gas se convierte en dieléctrico. Si la acción del ionizador no varía, se establece un equilibrio dinámico, con el cual el número de pares de partículas cargadas que se forman de nuevo es igual al número medio de pares que desaparecen a causa de la recombinación.

10.6. Descargas mantenida y automantenida

DESCARGA MANTENIDA. Para estudiar la descarga en un gas a distintas presiones conviene utilizar un tubo de vidrio con dos electrodos metálicos (fig. 171).

Supongamos que por medio de un ionizador cualquiera se forma, por segundo, en el gas un número determinado de pares de partículas cargadas: iones y electrones.

Si entre los electrodos existe una pequeña diferencia de potencial, los iones cargados positivamente se desplazan hacia el electrodo negativo y los electrones, hacia el positivo. Como resultado, en el tubo aparece una corriente eléctrica, es decir, se produce la descarga en el gas.

No todos los iones que se forman alcanzan los electrodos: una parte de ellos se junta de nuevo y forma moléculas neutras del gas. A medida que crece la diferencia de potencial entre los electrodos del tubo, la parte de partículas cargadas que alcanza dichos electrodos aumenta. También aumenta la intensidad de la corriente en el circuito. Por fin llega un instante en que todas las partículas cargadas que se forman por segundo en el gas alcanzan en este tiempo los electrodos. La corriente ya no crece más (fig. 172). Como suele decirse, la corriente ha llegado a la SATURACIÓN. Si en estas condiciones cesa la acción del ionizador, se interrumpe la descarga, puesto que no hay otras fuentes de iones. Por esta razón se dice que la descarga es MANTENIDA o NO AUTÓNOMA.

DESCARGA AUTOMANTENIDA. ¿Qué ocurrirá con la descarga en el gas si seguimos aumentando la diferencia de potencial entre los electrodos?

Parecería que, al continuar aumentando la diferencia de potencial, la intensidad de la corriente debería permanecer invariable. Sin embargo, la experiencia demuestra que al aumentar la diferencia de potencial entre los electrodos, a partir de cierto valor, la corriente aumenta de nuevo (fig. 173). Esto significa que en el gas aparecen iones adicionales a los que se forman a costa de la acción del ionizador. La intensidad de la corriente puede aumentar centenares y millares de veces y el número de iones que surgen en el proceso de la descarga puede llegar a ser tan grande que el ionizador exterior será ya innecesario para mantener la descarga. Si ahora se elimina

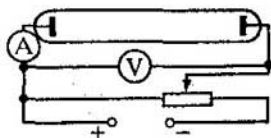
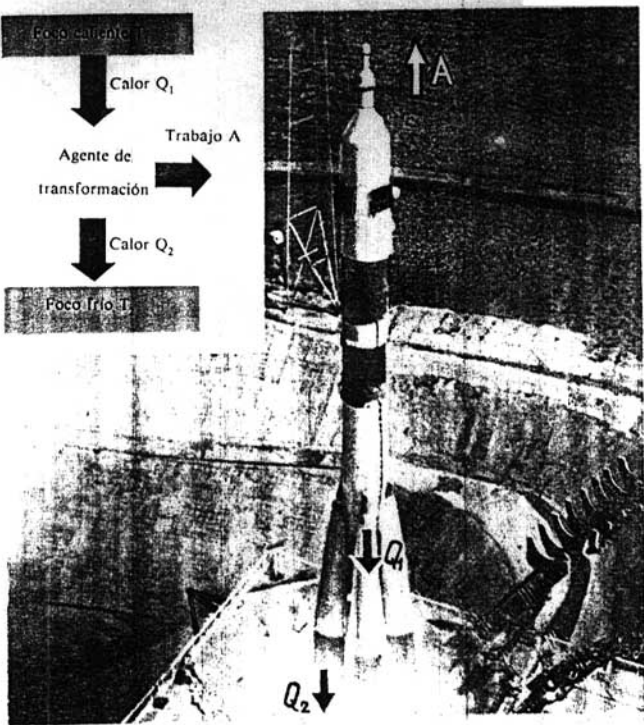
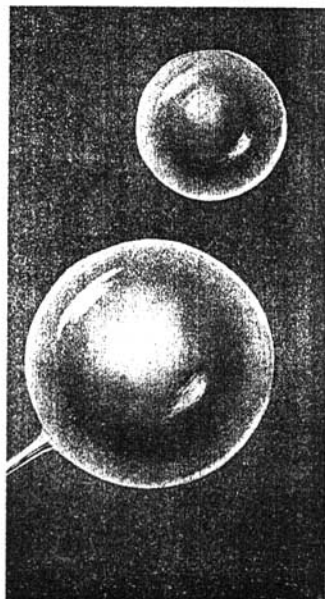
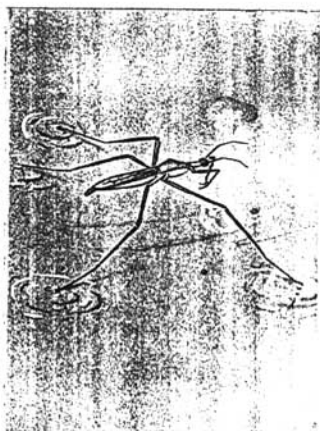


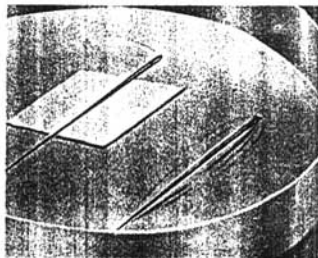
Fig. 171

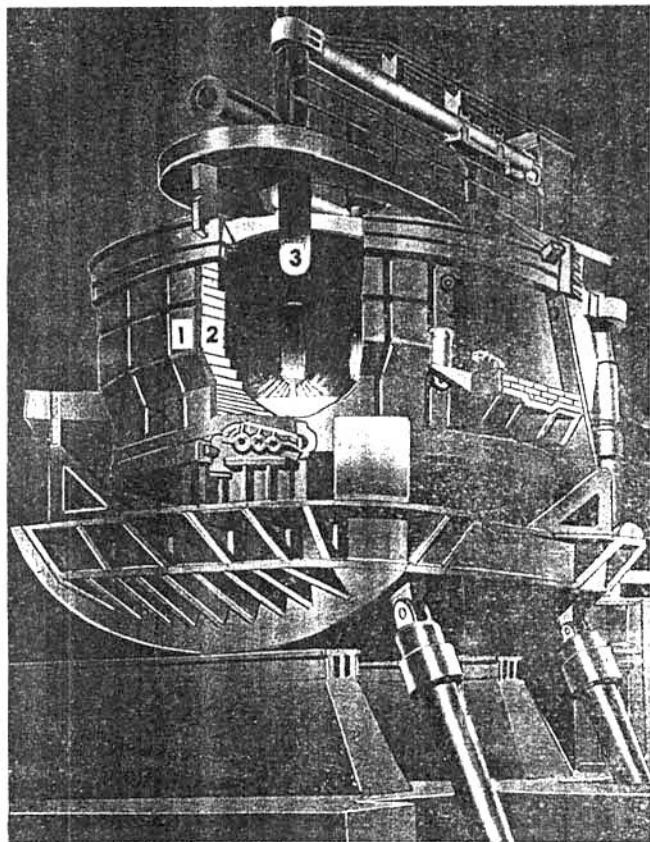


1. Ejemplos de máquinas térmicas: motor de combustión interna y motor cohete. Durante su funcionamiento la máquina térmica recibe la cantidad de calor Q_1 y cede Q_2 . El trabajo que realiza es $A = Q_1 - Q_2$.

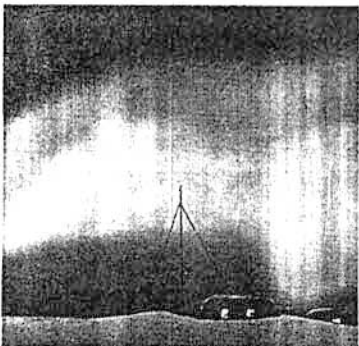
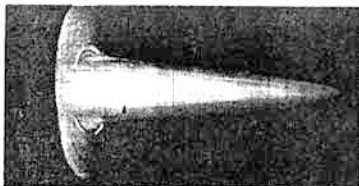


2. Las fuerzas de la tensión superficial mantienen en la superficie del agua una aguja de acero y al insecto llamado zapatero o tejedor. Estas fuerzas determinan la forma y las propiedades de las pompas de jabón y de las gotas de líquido.

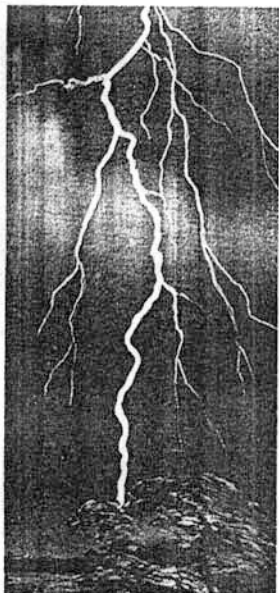
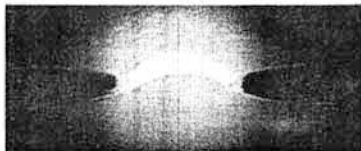




3. Horno eléctrico de arco para fundir
acero: 1, caja; 2, revestimiento; 3,
electrodo.



4. Ejemplos de descargas en gases: chorro de plasma lanzado por la tobera de un plasmatrón; luminiscencia de las capas superiores de la atmósfera bombardeadas por las partículas cósmicas cargadas (aurora boreal); descarga luminiscente en un tubo; arco eléctrico; descarga en chispas gigantesca (rayo); descarga por efecto corona (fuegos de San Telmo).



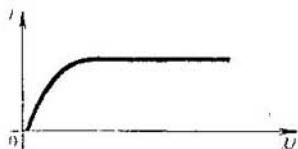


Fig. 172

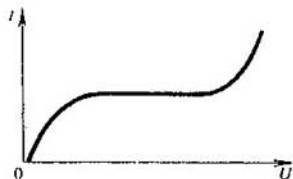


Fig. 173

dicho ionizador, la descarga no cesará. Como en este caso la descarga no necesita para su mantenimiento el ionizador exterior, se dice que es AUTOMANTENIDA o AUTÓNOMA.

IONIZACIÓN POR CHOQUE CON ELECTRONES. ¿Cuál es la causa del brusco crecimiento de la intensidad de la corriente cuando las tensiones son grandes?

Consideremos un par cualquiera de partículas cargadas (un ion y un electrón) que se hayan formado en virtud de la acción de un ionizador exterior. El electrón libre así originado comienza a moverse hacia el electrodo positivo o ánodo, y el ion positivo, hacia el cátodo. En su trayectoria encuentra el electrón iones y átomos neutros. En los intervalos entre dos choques consecutivos la energía del electrón aumenta a expensas del trabajo que realizan las fuerzas del campo eléctrico. Cuanto mayor sea la diferencia de potencial entre los electrodos, tanto mayor será la intensidad del campo eléctrico. La energía cinética del electrón antes del choque de turno es proporcional a la intensidad del campo y a la longitud del recorrido libre del electrón (es decir, entre dos choques consecutivos)

$$\frac{mv^2}{2} = eEl. \quad (10.8)$$

Si la energía cinética del electrón es mayor que el trabajo A_i necesario para ionizar un átomo neutro, o sea, si

$$\frac{mv^2}{2} \geq A_i,$$

al producirse la colisión del electrón con el átomo, éste se ioniza. El esquema de este proceso puede verse en la fig. 174. Como resultado, en vez de un electrón surgen dos (el que incidió sobre el átomo y el que fue arrancado de este último). Estos electrones adquieren a su vez energía en el campo, ionizan los átomos que encuentran a su paso y así sucesivamente. A causa de esto el número de partículas cargadas crece rápidamente y se produce una avalancha electrónica. El proceso que acabamos de describir se llama IONIZACIÓN POR CHOQUE CON ELECTRONES. Pero esta ionización sola no puede asegurar el mantenimiento autónomo de la descarga. En efecto, todos los electrones que surgen de este modo se mueven en dirección al ánodo y al llegar a él "abandonan el juego". Para que la descarga se mantenga es

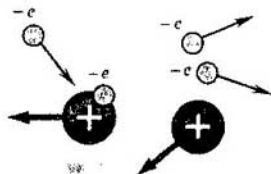


Fig. 174

necesario que el cátodo emita electrones. La emisión de electrones puede ser condicionada por varias causas.

Los iones positivos, que se forman al chocar los electrones con los átomos neutros, moviéndose hacia el cátodo adquieren, bajo la acción del campo, una gran energía cinética. Cuando estos iones rápidos chocan con el cátodo, de la superficie de éste se desprenden electrones.

EMISIÓN TERMOELECTRÓNICA. Además de esto, el cátodo puede emitir electrones cuando se calienta hasta una temperatura elevada. Este proceso se denomina **EMISIÓN TERMOFLECTRÓNICA**. Puede considerarse como si los electrones se evaporaran del metal. En muchos sólidos la emisión termoelectrónica transcurre a temperaturas con las cuales la vaporización de la propia sustancia es aún pequeña. Estas sustancias son las que se emplean para hacer los cátodos.

Cuando la descarga es automantenida, el calentamiento del cátodo puede producirse a costa de su bombardeo por iones positivos. Si la energía de los iones no es demasiado grande, el arranque de electrones del cátodo no tiene lugar y los electrones surgen por emisión termoelectrónica.

10.7. Diversos tipos de descarga automantenida y sus aplicaciones técnicas

En dependencia de las propiedades y del estado del gas, del carácter y disposición de los electrodos y de la tensión aplicada a ellos, existen diversos tipos de descarga automantenida en los gases.

DESCARGA LUMINISCENTE. A presiones bajas (de décimas y centésimas de milímetro de la columna de mercurio) se observa en el tubo la **DESCARGA LUMINISCENTE**. Para excitar esta descarga es suficiente una tensión entre los electrodos de varios centenares de voltios (y a veces mucho menor). En la descarga luminiscente casi todo el tubo, excepto una pequeña zona junto al cátodo, está ocupado por una luminosidad homogénea llamada columna positiva (véase la 4^a lámina en color).

ARCO ELÉCTRICO. Si se ponen en contacto dos electrodos de carbón, en el punto en que se tocan la corriente eléctrica desprende una gran cantidad de calor a causa de la resistencia de contacto. La temperatura se eleva tanto, que comienza la emisión termoelectrónica. A consecuencia de esto, si los electrodos de carbón se van separando, entre ellos empieza la descarga. Ésta toma la forma de una columna de gas resplandeciente llamada **ARCO ELÉCTRICO** o **ARCO VOLTAICO**. La conductividad del gas en este caso es considerable incluso a la presión atmosférica, ya que el número de electrones

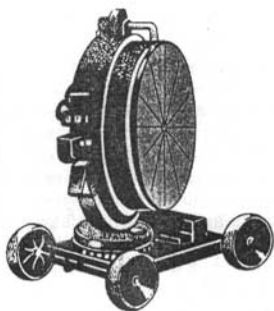


Fig. 175



Fig. 176

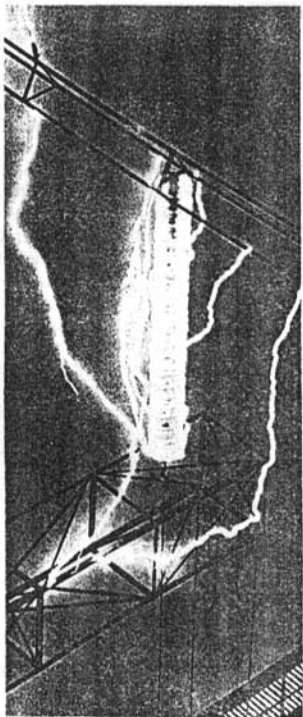


Fig. 177

que emite el electrodo negativo es muy grande. La intensidad de la corriente en un arco pequeño alcanza varios amperios, y en los arcos grandes llega a varios centenares de amperios con diferencias de potencial del orden de 50 V.

El arco eléctrico fue obtenido la primera vez, en 1802, por el académico ruso V. V. Petrov.

La descarga de arco es una poderosa fuente de luz que se utiliza en los proyectores antiaéreos (fig. 175) y en los aparatos de proyección y de cine.

En la metalurgia se emplean mucho los hornos eléctricos, en los cuales la fuente de calor es una descarga de arco (véase la 3^a lámina en color). La descarga de arco se utiliza también para soldar metales (fig. 176).

OTROS TIPOS DE DESCARGA AUTOMANTENIDA. A la presión atmosférica, en las proximidades de las partes puntiagudas de un conductor que porte gran carga eléctrica, se observa una descarga cuya zona luminosa parece una corona (véase la 4^a lámina en color). Esta descarga, llamada EFECTO CORONA, se debe a la gran intensidad (de cerca de $3 \cdot 10^6$ V/m) del campo eléctrico en las cercanías de la punta aguda cargada. El efecto corona debe tenerse en cuenta cuando se opera con alta tensión. Si existen partes salientes o conductores muy delgados puede iniciarse dicho efecto. Esto ocasiona fugas de energía eléctrica. Cuanto mayor sea la tensión de una línea de alto voltaje, tanto más gruesos deben ser los cables conductores.

Si la tensión entre los electrodos es grande, en el aire puede surgir la DESCARGA POR CHISPAS, cuya forma es la de un haz de rayas zigzagueantes que son ramificaciones de un canal delgado (fig. 177). Este tipo de descarga aparece cuando la potencia de la fuente no basta para mantener una descarga de arco o luminiscente. Un ejemplo de descarga por chispas gigantesca es el rayo (véase la 4^a lámina en color).

10.8. Plasma

A temperaturas muy bajas todas las sustancias se encuentran en estado sólido. El calentamiento hace que dichas sustancias pasen del estado sólido al líquido y después al gaseoso.

Cuando las temperaturas son suficientemente altas comienza la ionización del gas a expensas de los choques de los átomos o las moléculas que se mueven rápidamente. Entonces la sustancia pasa a un nuevo estado, llamado PLASMA¹⁾. *El plasma es un gas ionizado parcial o totalmente en el cual las densidades de carga positiva y negativa son prácticamente iguales.* Por lo tanto, el plasma en conjunto es un sistema eléctricamente neutro. En dependencia de las condiciones, el grado de ionización del plasma, o sea, la razón del número de átomos ionizados a su número total, puede ser diverso. En el plasma totalmente ionizado no hay átomos neutros.

¹⁾ Del griego "plasma", formación. Este término se empezó a usar en biología para designar los componentes líquidos incoloros de la sangre y de los tejidos vivos. En física el término "plasma" tiene otro sentido.

La ionización del gas y la formación del plasma puede deberse, además de al calentamiento, a diversos tipos de radiaciones o al bombardeo de los átomos del gas por partículas rápidas cargadas. En este caso se obtiene el llamado plasma frío o de baja temperatura.

PROPIEDADES DEL PLASMA. El plasma posee una serie de propiedades específicas que permiten considerarlo como cuarto estado de la materia.

Debido a la gran movilidad, las partículas cargadas del plasma se trasladan fácilmente bajo la acción de los campos eléctricos y magnéticos. Por eso cualquier alteración de la neutralidad eléctrica de partes aisladas del plasma, causada por una concentración de partículas con carga del mismo signo, se liquida rápidamente. Los campos eléctricos que surgen trasladan las partículas cargadas hasta que se restablezca la neutralidad eléctrica y el campo eléctrico se anule.

A diferencia de un gas neutro, entre cuyas moléculas existen fuerzas de acción próxima, entre las partículas cargadas del plasma actúan fuerzas de Coulomb que disminuyen lentamente al aumentar la distancia. Cada partícula interacciona al mismo tiempo con un gran número de partículas circundantes. En virtud de eso, a la vez que en el movimiento térmico caótico, las partículas del plasma pueden participar en diversos movimientos ordenados (colectivos). En el plasma se excitan con facilidad distintos tipos de oscilaciones y ondas.

La conductividad del plasma aumenta a medida que crece su grado de ionización. A alta temperatura el plasma totalmente ionizado se aproxima por su conductividad a los superconductores.

EL PLASMA EN EL COSMOS Y ALREDEDOR DE LA TIERRA. En estado de plasma se encuentra la inmensa mayoría (cerca del 99%) de la materia del Universo. A causa de la alta temperatura, el Sol y otras estrellas están constituidos en lo fundamental por plasma totalmente ionizado.

De plasma está formado el medio interestelar que llena el espacio entre las estrellas y las galaxias. La densidad de este medio es muy pequeña, en promedio es menor que un átomo por 1 cm^3 . La ionización de los átomos del medio interestelar se debe a la radiación de las estrellas y a los rayos cósmicos, que son flujos de partículas rápidas que atraviesan el espacio universal en todas direcciones. A diferencia del plasma caliente de las estrellas, la temperatura del plasma interestelar es muy baja.

El plasma envuelve nuestro planeta. La capa superior de la atmósfera, a la altura de 100 a 300 km, es un gas ionizado, la ionosfera. La ionización del aire de las capas superiores de la atmósfera la causan la radiación del Sol y los flujos de partículas cargadas que él emite. Por encima de la ionosfera se extienden los cinturones de radiación de la Tierra, descubiertos por medio de los satélites artificiales. Estos cinturones también están constituidos por plasma.

Muchas de las propiedades del plasma las poseen los electrones libres de los metales. A diferencia del plasma ordinario, en el plasma de los sólidos los iones positivos no se pueden trasladar por todo el cuerpo.

APLICACIONES PRÁCTICAS DEL PLASMA. El plasma se produce en todos los tipos de descarga en gases: luminiscente, de arco, de chispas, etc. Este plasma se llama de descarga gaseosa.

En los tubos de los anuncios luminosos y en las lámparas de luz solar se utiliza el plasma de la columna positiva de la descarga luminiscente. En estas últimas la descarga tiene lugar en vapor de mercurio. El tubo de cristal está recubierto de un compuesto especial, llamado luminóforo¹⁾, que bajo la influencia de la radiación del plasma también emite luz. El luminóforo se elige de forma que la composición de su luminosidad esté próxima a la de la luz blanca.

El plasma de descarga gaseosa se emplea en muchos aparatos, como, por ejemplo, en los láseres de gas o generadores cuánticos de luz. Los láseres son las fuentes de luz más potentes. Su radiación tiene una serie de propiedades sobresalientes. Se darán a conocer en el curso de "Física 4" (Ed. MIR).

Un chorro de plasma se utiliza en los generadores magnetohidrodinámicos (MHD), que ya se mencionaron al tratar de la superconductibilidad. Los motores de plasma de pequeña potencia ofrecen perspectivas de aplicación en las naves cósmicas.

Hace relativamente poco tiempo fue creado un nuevo aparato, el plasmatrón. En él se obtienen chorros potentes de plasma denso que se emplean mucho en distintas ramas de la técnica: para cortar y soldar metales, perforar pozos en terrenos duros, etc., (véase la 4ª lámina en color). Sometiéndolas al chorro de plasma se aceleran muchas reacciones químicas y pueden producirse otras que no se efectúan en las condiciones ordinarias.

Las perspectivas de más transcendencia las ven los físicos en la utilización del plasma de alta temperatura (de decenas de millones de grados) para crear reacciones termonucleares controladas. En la actualidad se llevan a cabo intensos trabajos de investigación para conseguir estas reacciones, que van acompañadas de la liberación de una cantidad de energía enorme. La solución de este grandioso problema pondrá en manos del hombre una fuente de energía prácticamente inagotable.

¿?

1. ¿Qué diferencia existe entre la disociación de los electrólitos y la ionización de los gases?
2. ¿Qué condiciones son necesarias para que una descarga en gas mantenida se convierta en automantenida?
3. ¿Qué es la emisión termoelectrónica?
4. Enumere los tipos principales de descarga automantenida.
5. ¿Qué es el plasma?

10.9. La corriente eléctrica en el vacío

En los tubos de rayos catódicos, en las válvulas de los receptores de radio y en otros muchos dispositivos los electrones se mueven en el vacío. ¿Cómo se obtienen los flujos de electrones en el vacío? ¿Qué propiedades tienen estos flujos?

La descarga automantenida en un gas puede producirse en un tubo de vidrio con dos electrodos (fig. 171) solamente con la condición de que la

¹⁾ Del latín "lumen", luz, y el griego "phoros", llevar.

presión del gas no sea demasiado pequeña. Si la presión disminuye hasta valores menores que 0,0001 mm de la columna de mercurio, la descarga se interrumpe, es decir, la intensidad de la corriente se anula aunque la tensión en los electrodos del tubo sea distinta de cero.

Esto ocurre porque quedan demasiado pocos átomos para mantener la corriente a expensas de la ionización por choque con los electrones y del arranque de electrones del cátodo por los iones.

El gas enrarecido tampoco conduce la corriente si se continúa disminuyendo la presión. Siguiendo la extracción del gas, puede llegarse a una concentración tal, que las moléculas tengan tiempo de ir de una pared a otra sin experimentar ni un solo choque entre ellas. Este estado del gas en el tubo se llama VACÍO.

El gas enrarecido se convierte en conductor en virtud de la acción de un ionizador (descarga mantenida en el gas, 10.6). Si hay tan poco gas que puede decirse que existe el vacío, la conducción en el espacio entre los electrodos sólo se puede asegurar introduciendo en el tubo una fuente de partículas cargadas.

Lo más frecuente es que la acción de dicha fuente se base en la propiedad que tienen los cuerpos calentados hasta altas temperaturas de emitir electrones. El fenómeno de la emisión termoelectrónica, ya mencionado en el § 10.6, tiene un amplísimo campo de aplicación práctica. En la mayoría de los aparatos electrónicos de vacío modernos la fuente de partículas cargadas es un cátodo calentado.

10.10. Válvula diodo de dos electrodos

El fenómeno de la emisión termoelectrónica hace que el electrodo metálico caliente, a diferencia del frío, emita continuamente electrones, los cuales forman a su alrededor una "nube electrónica". Al mismo tiempo este electrodo se carga positivamente y bajo la acción del campo eléctrico una parte de los electrones de la nube retornan al electrodo. En estado de equilibrio el número de electrones que abandonan el electrodo por segundo es igual al número de los que retornan a él en el mismo tiempo. Cuanto más elevada sea la temperatura del metal, tanto mayor será la densidad de la nube electrónica.

La diferencia entre los electrodos caliente y frío, soldados a un recipiente del que se ha extraído el gas, hace que la conducción de la corriente eléctrica entre ellos sea unilateral. Cuando los electrodos se conectan a una fuente de corriente, entre ellos se produce un campo eléctrico. Si el polo positivo de la fuente se conecta con el electrodo frío (ánodo) y el negativo, con el caliente (cátodo), la intensidad del campo eléctrico estará dirigida hacia el electrodo caliente. Bajo la acción de este campo los electrones abandonan parcialmente la nube electrónica y se mueven hacia el electrodo frío. El circuito se cierra y en él se establece la corriente eléctrica. Si la fuente de corriente se conecta al revés, la intensidad del campo estará dirigida del cátodo al ánodo. El campo eléctrico repelerá los electrones de la nube hacia atrás, es decir, hacia el cátodo. El circuito resultará abierto y la corriente no pasará por él.

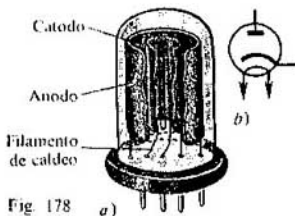


Fig. 178

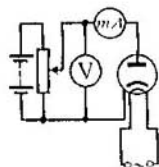


Fig. 179

DIODO. La conducción unilateral se aprovecha en los aparatos electrónicos de dos electrodos o **DIODOS DE VACÍO**.

La estructura del diodo de vacío moderno es la siguiente. Dentro de una ampolla de vidrio o metalocerámica, de la cual se ha extraído el aire hasta la presión de 10^{-6} o 10^{-7} mm de la columna de mercurio, hay dos electrodos (fig. 178, a). Uno de ellos, el cátodo, tiene la forma de un cilindro metálico vertical, recubierto generalmente de una capa de óxidos de metales alcalinotérreos (bario, estroncio, calcio). Éste es el llamado cátodo revestido de óxido. Cuando se calienta un cátodo de este tipo, de su superficie se desprenden muchos más electrones que de la superficie de un cátodo de metal puro. Dentro del cátodo se encuentra un conductor aislado, calentado por corriente alterna. El cátodo caliente emite electrones, los cuales llegan al ánodo si éste tiene un potencial más alto que el del cátodo.

El ánodo de la válvula es un cilindro circular u ovalado coaxial al cátodo. La fig. 178, b da la representación esquemática de un diodo.

CARACTERÍSTICA TENSIÓN-INTENSIDAD DEL DIODO. Las propiedades más importantes de un dispositivo electrónico cualquiera las pone de manifiesto su característica tensión-intensidad, o sea, la dependencia de la intensidad de la corriente respecto de la diferencia de potencial en los bornes de dicho dispositivo. La característica tensión-intensidad de un diodo se puede obtener por medio de un circuito cuyo esquema se muestra en la fig. 179. A diferencia de la característica de un conductor metálico, ésta para el diodo no es lineal (fig. 180). La causa principal de que la característica del diodo de vacío no sea lineal es que los electrones libres que originan la corriente en el espacio del mismo son emitidos por uno de los electrodos en cantidad limitada. Además, en el movimiento de los electrones, a la vez que el campo creado por las cargas, sobre los electrones ejerce una influencia importante el campo de la carga espacial de la nube electrónica que hay junto al cátodo.

Cuanto mayor sea la tensión entre el ánodo y el cátodo, tanto menor será la carga espacial de la nube electrónica, tanto mayor la cantidad de electrones que llegue al ánodo y, por consiguiente, tanto mayor la intensidad de la corriente en la válvula. Si el cátodo no está recubierto de óxido, cuando la tensión es suficientemente grande todos los electrones que abandonan el cátodo llegan al ánodo y si continúa aumentando la tensión la corriente no varía, comienza la saturación (línea de trazos de la fig. 181). Si la temperatura del cátodo se eleva (lo que puede conseguirse variando la

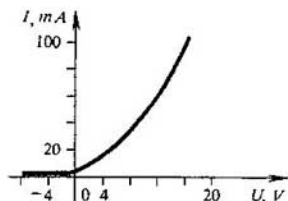


Fig. 180

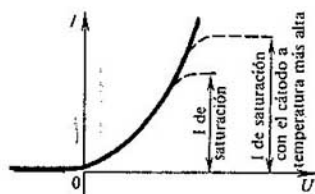


Fig. 181

resistencia del reóstato en el circuito de caldeo), el número de electrones que se desprenden de él será mayor. La nube electrónica alrededor del cátodo se hará más densa. La corriente de saturación comenzará a una tensión más elevada entre el ánodo y el cátodo, y la intensidad de la corriente de saturación crecerá (segunda línea de trazos de la fig. 181). En la válvula electrónica con cátodo de óxido es imposible alcanzar la saturación, ya que esto requiere unas diferencias de potencial tan grandes que con ellas el cátodo se destruye.

Los diodos se utilizan para rectificar la corriente eléctrica alterna.

10.11. Cañones electrónicos. Tubo catódico

Si en el ánodo de una válvula electrónica se practica un orificio, parte de los electrones, acelerados por el campo eléctrico, pasa por dicho orificio y forma detrás del ánodo un haz electrónico. La cantidad de electrones que hay en el haz se puede regular colocando entre el cátodo y el ánodo un electrodo auxiliar y variando su potencial. Cuando las partículas rápidas del haz electrónico interaccionan con una sustancia originan diversos fenómenos que se aprovechan en la práctica.

PROPIEDADES DE LOS HACES ELECTRÓNICOS Y SUS APLICACIONES. El haz electrónico, cuando incide sobre los cuerpos, los calienta. En la técnica moderna esta propiedad se utiliza en la fundición electrónica en el vacío de metales ultrapuros.

Al ser frenados los electrones rápidos, que inciden sobre una sustancia, se produce la radiación de Roentgen. Esta propiedad se aprovecha en los tubos de rayos X, de los cuales se tratará en "Física 4".

Algunas sustancias (como el vidrio y los sulfuros de zinc y de cadmio) emiten luz cuando se bombardean con electrones. En la actualidad entre los materiales de este tipo (luminóforos) se emplean algunos en los cuales se convierte en energía luminosa hasta el 25% de la energía del haz electrónico.

Los haces electrónicos son desviados por el campo eléctrico. Por ejemplo, al pasar entre las placas de un condensador, los electrones se desvían de la placa cargada negativamente hacia la cargada positivamente (fig. 182).

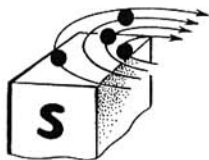
El haz electrónico también es desviado por el campo magnético. Al pasar sobre el polo norte de un imán, los electrones se desvían hacia la izquierda,



Fig. 182



Fig. 183



y cuando pasan sobre el polo sur, se desvian hacia la derecha (fig. 183). La desviación por el campo magnético de la Tierra de los flujos electrónicos que vienen del Sol, hace que la luminiscencia de los gases de las capas superiores de la atmósfera (auroras boreales) sólo se puedan observar cerca de los polos.

La posibilidad de dirigir el haz electrónico, por medio de un campo eléctrico o magnético, y la luminiscencia de una pantalla recubierta de luminóforo, sometida a la acción del haz, se utiliza en los tubos catódicos.

TUBO DE RAYOS CATÓDICOS. El tubo de rayos catódicos es el elemento fundamental del receptor de televisión y del OSCILÓGRAFO¹⁾, aparato que sirve para analizar los procesos rápidamente variables que tienen lugar en los circuitos eléctricos (fig. 184).

La estructura del tubo de rayos catódicos se muestra en la fig. 185. El tubo es una ampolla, en que se ha practicado el vacío, una de cuyas paredes sirve de pantalla. En el extremo delgado de la ampolla se encuentra la fuente de electrones rápidos o cañón electrónico (fig. 186). Éste consta del cátodo,



Fig. 184

¹⁾ Del latín "oscillum", oscilación, y el griego "grapho", escribo.

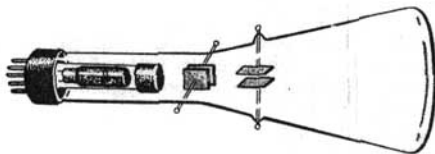


Fig. 185

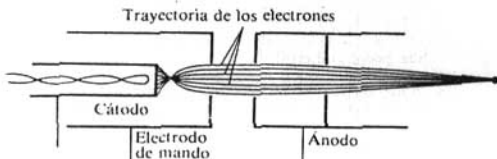


Fig. 186

del electrodo de mando y del ánodo (lo más frecuente es que sean varios ánodos colocados uno detrás de otro). Los electrones son emitidos por la capa de óxido caldeada del extremo del cátodo cilíndrico y pasan a través del orificio que hay en el electrodo cilíndrico de mando (que regula el número de electrones que hay en el haz). Cada ánodo consta de dos discos, con pequeños orificios, montados en un cilindro metálico. Entre el primer ánodo y el cátodo se crea una diferencia de potencial de centenares e incluso millares de voltios. El intenso campo eléctrico acelera los electrones y éstos adquieren una gran velocidad. La forma, la disposición y los potenciales de los ánodos se eligen de tal modo, que al mismo tiempo que la aceleración de los electrones se produzca el enfoque del haz electrónico, es decir, la disminución del área de la sección transversal del haz sobre la pantalla casi hasta convertirse en un punto.

En su camino hacia la pantalla el haz pasa sucesivamente por entre dos pares de placas de desviación, semejantes a las de un condensador plano. Si entre dichas placas no existe campo eléctrico, el haz no se desvía y el punto luminoso se sitúa en el centro de la pantalla. Cuando a las placas colocadas verticalmente se les comunica una diferencia de potencial, el haz se desvía en dirección horizontal, y cuando se les comunica diferencia de potencial a las placas horizontales, el haz se desvía en dirección vertical.

La utilización simultánea de los dos pares de placas permite desplazar el punto luminoso por la pantalla en cualquier dirección. Como la masa de los

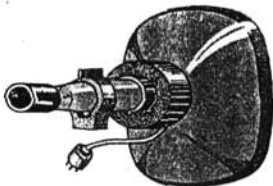


Fig. 187

electrones es muy pequeña, éstos reaccionan casi instantáneamente a la variación de la diferencia de potencial de las placas de desviación.

En el tubo catódico que se utiliza en los receptores de televisión (llamado cinescopio), el control del haz creado por el cañón electrónico se efectúa por medio de un campo magnético. Este campo lo crean unas bobinas que se montan en el cuello del tubo (fig. 187).

¿?

1. ¿Con qué fin se practica el vacío en el tubo catódico y en las válvulas electrónicas?
2. ¿Qué estructura tiene el diodo?
3. Dibuje la característica tensión-intensidad de un diodo y explique sus peculiaridades.
4. ¿Cómo se dirigen los haces electrónicos?
5. ¿Qué estructura tiene el tubo catódico?

10.12. La corriente eléctrica en los semiconductores

En lo que más claramente se diferencian los materiales semiconductores de los conductores es en el carácter de la dependencia de su conductancia respecto de la temperatura. Las mediciones muestran que en una serie de elementos (silicio, germanio, selenio y otros) y compuestos químicos (PbS, CdS y otros) la resistividad no aumenta al elevarse la temperatura, como ocurre en los metales (véase la fig. 149), sino al contrario, disminuye (fig. 188). Estas sustancias se llaman SEMICONDUCTORES.

En la gráfica representada en esta figura se ve que, a temperaturas próximas al cero absoluto, la resistividad de los semiconductores es muy grande. Esto significa que a bajas temperaturas el semiconductor se comporta como dieléctrico. A medida que se eleva la temperatura, la resistividad disminuye rápidamente. ¿A qué se debe esto?

ESTRUCTURA DE LOS SEMICONDUCTORES. Para poder comprender el mecanismo de la aparición de la conductibilidad en los semiconductores es necesario conocer la estructura de los cristales semiconductores y la naturaleza de los enlaces que mantienen los átomos del cristal unos junto a otros. Como ejemplo vamos a considerar un cristal de silicio.

El silicio es un elemento tetravalente. Esto quiere decir que en su capa periférica el átomo de silicio tiene cuatro electrones débilmente ligados con el núcleo. El número de átomos vecinos de cada átomo de silicio también es

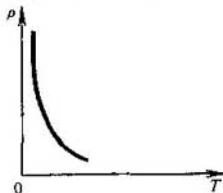


Fig. 188

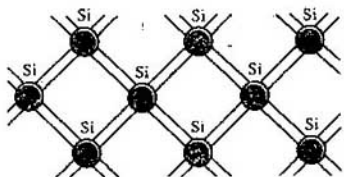


Fig. 189

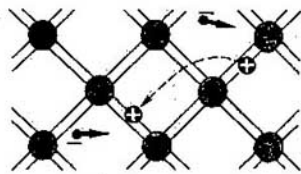


Fig. 190

igual a cuatro. El esquema plano de la estructura del cristal de silicio se representa en la fig. 189.

La interacción de los pares de átomos vecinos se efectúa por medio del enlace por par electrónico llamado ENLACE COVALENTE (véase el curso de "Química inorgánica"). En la formación de este enlace participa un electrón de valencia de cada átomo, el cual se desprende de éste (siendo "colectivizado" por el cristal) y durante su movimiento se encuentra la mayor parte del tiempo en el espacio entre los átomos vecinos. Su carga negativa mantiene los iones positivos de silicio uno junto a otro.

No debe pensarse que el par de electrones colectivizado pertenece solamente a dos átomos. Cada átomo forma cuatro enlaces con sus vecinos y un electrón de valencia dado puede moverse por cualquiera de ellos. Una vez que llega a un átomo vecino puede pasar al siguiente y después seguir adelante a lo largo de todo el cristal. Los electrones de valencia colectivizados pertenecen a todo el cristal.

Los enlaces por pares electrónicos del silicio son suficientemente fuertes y no se rompen a bajas temperaturas. Por eso el silicio a baja temperatura no conduce la corriente eléctrica. Los electrones de valencia que toman parte en el enlace están fuertemente ligados a la red cristalina y un campo eléctrico exterior no ejerce influencia apreciable sobre su movimiento. Una estructura análoga la tiene el cristal de germanio.

CONDUCCIÓN POR ELECTRONES. Si el silicio se calienta, la energía cinética de los electrones de valencia aumenta y empiezan a romperse algunos enlaces. Ciertos electrones abandonan su "camino trillado" y se convierten en electrones libres, semejantes a los de un metal. En un campo eléctrico estos electrones se mueven entre los nodos de la red y originan la corriente eléctrica (fig. 190).

La conductibilidad de los semiconductores debida a la existencia en ellos de electrones libres se llama CONDUCCIÓN POR ELECTRONES. A medida que aumenta la temperatura crece el número de enlaces rotos y, por lo tanto, de electrones libres. Esto hace que disminuya la resistencia.

CONDUCCIÓN POR HUECOS. Cuando se rompe un enlace se origina un sitio vacante en el cual falta un electrón. Este lugar recibe el nombre de HUECO. En el hueco existe una carga positiva excedente en comparación con los demás enlaces normales (fig. 190).

La posición de un hueco en el cristal no es invariable. Continuamente se

desarrolla el proceso que sigue. Uno de los electrones, que aseguran el enlace de los átomos, salta al sitio en que se ha formado el hueco y restablece aquí el enlace por par electrónico, mientras que en el sitio desde el cual saltó se forma un hueco nuevo. De este modo un hueco puede trasladarse por todo el cristal.

Si la intensidad del campo eléctrico en la muestra es nula, el desplazamiento de los huecos, equivalente a un desplazamiento de cargas positivas, transcurre caóticamente y, por lo tanto, no crea corriente eléctrica. Pero en presencia de un campo eléctrico aparece el movimiento ordenado de los huecos y, así, a la corriente eléctrica de los electrones libres se suma la corriente eléctrica debida al desplazamiento de los huecos. La dirección del movimiento de los huecos es opuesta a la dirección en que se mueven los electrones.

Por consiguiente, en los semiconductores hay dos tipos de portadores de carga: los electrones y los huecos. En los semiconductores, además de la CONDUCCIÓN POR ELECTRONES, existe la CONDUCCIÓN POR HUECOS.

10.13. Conductibilidad eléctrica de los semiconductores con impurezas

Hemos estudiado el mecanismo de la conductibilidad de los semiconductores ideales. La conductancia en estas condiciones se llama CONDUCTIBILIDAD INTRÍNSECA DE LOS SEMICONDUCTORES.

Esta conductibilidad, por lo general, no es grande, ya que el número de electrones libres es pequeño, por ejemplo, en el germanio a la temperatura ambiente $n_e = 3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, mientras que el número de átomos que hay en 1 cm^3 de germanio es del orden de 10^{23} . Por lo tanto, el número de electrones libres constituye aproximadamente la diezmilmillonésima parte del número total de átomos. La conductibilidad intrínseca de los semiconductores se asemeja mucho a la de las soluciones acuosas o de las fusiones de electrólitos. En uno y otro caso el número de portadores de carga libres crece al aumentar la intensidad del movimiento térmico. Por eso en los semiconductores, en las soluciones acuosas y en las fusiones de electrólitos se observa el aumento de la conductibilidad cuando la temperatura se eleva.

Una peculiaridad esencial de los semiconductores consiste en que cuando tienen impurezas, junto con la conductibilidad intrínseca, surge otra adicional, llamada CONDUCTIBILIDAD EXTRÍNSECA o POR IMPUREZAS. Variando la concentración de impurezas puede cambiarse mucho el número de portadores de carga de uno u otro signo. En virtud de esto se pueden crear semiconductores en los cuales predomine la concentración de portadores de carga negativos o positivos. Esta particularidad de los semiconductores abre amplias posibilidades para su aplicación práctica.

IMPUREZAS DONADORAS. Resulta que, si el semiconductor contiene impurezas, por ejemplo, átomos de arsénico, incluso si su concentración es muy pequeña, el número de electrones libres aumenta muchas veces. Esto ocurre por lo siguiente. Los átomos de arsénico tienen cinco electrones de

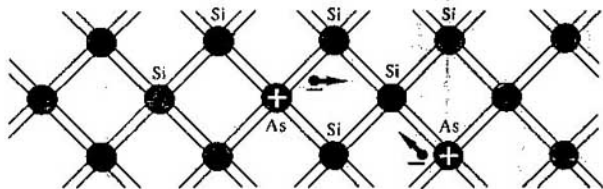


Fig. 191

valencia. Cuatro de ellos participan en la creación del enlace covalente del átomo dado con los circundantes, por ejemplo, con los átomos de silicio. El quinto electrón de valencia resulta ligado débilmente con el átomo. Este electrón se desprende fácilmente del átomo de arsénico y se convierte en electrón libre (fig. 191).

Si se añade una diezmillonésima parte de átomos de arsénico, la concentración de electrones libres se hace igual a 10^{16} cm^{-3} , es decir, mil veces mayor que la concentración de electrones libres en el semiconductor intrínseco.

Las impurezas que ceden fácilmente electrones y que, por consiguiente, aumentan el número de electrones libres, se llaman **IMPUREZAS DONADORAS** (de donar, ceder).

Como los semiconductores con impureza donadora poseen mayor número de electrones (en comparación con el número de huecos), se denominan semiconductores tipo *n* (de la palabra negativo). En un semiconductor tipo *n* los electrones son los portadores de carga **MAYORITARIOS** y los huecos, los **MINORITARIOS**.

IMPUREZAS ACEPTORAS. Si como impureza se emplea el indio, cuyo átomo es trivalente, el carácter de la conductibilidad del semiconductor cambia. En este caso, para formar los enlaces por pares electrónicos normales con sus vecinos, al átomo de indio le falta un electrón. Como resultado se origina un hueco. El número de huecos que hay en el cristal es igual al número de átomos de impureza.

Las impurezas de este tipo se llaman **ACEPTORAS** (de aceptar, recibir).

En presencia del campo eléctrico los huecos se trasladan por el campo y se produce la conducción por huecos. Los semiconductores en los cuales predomina la conducción por huecos sobre la conducción por electrones se llaman semiconductores tipo *p* (de la palabra positivo). Los portadores de carga mayoritarios en un semiconductor tipo *p* son los huecos, y los minoritarios, los electrones.

10.14. Corriente eléctrica a través de un contacto de semiconductores tipo p y tipo n

En la fig. 192 se representa el esquema de un semiconductor cuya parte derecha contiene impurezas donadoras y, por lo tanto, es un semiconductor tipo n , mientras que la parte izquierda contiene impurezasceptoras y es un semiconductor tipo p . Los electrones se han representado por círculos de color y los huecos por círculos negros. El contacto de estos dos conductores recibe el nombre de UNIÓN $p-n$.

Conectemos un semiconductor con unión $p-n$ a un circuito eléctrico (fig. 193). Primero conectemos la batería de tal forma que el potencial del semiconductor tipo p sea positivo y el del semiconductor tipo n , negativo. En este caso la corriente a través de la unión $p-n$ la efectuarán los portadores mayoritarios: de la región n a la región p , los electrones, y de la región p a la región n , los huecos (fig. 194). Como consecuencia de esto la conductividad de toda la muestra será grande y su resistencia, pequeña.

La unión que acabamos de examinar se llama DIRECTA. La dependencia de la intensidad de la corriente respecto de la diferencia de potencial, o sea, la característica tensión-intensidad de la unión directa, se representa en la fig. 195 por medio de la línea continua.

Conmutemos los polos de la batería. Entonces, con la misma diferencia de potencial, la intensidad de la corriente en el circuito resulta ser mucho menor que en la unión directa. Esto se debe a lo siguiente. Los electrones que atraviesan ahora el contacto van de la región p a la n , y los huecos, de la región n a la p . Pero en el semiconductor tipo p hay pocos electrones libres y en el semiconductor tipo n , pocos huecos. El paso a través del contacto lo realizan ahora los portadores minoritarios, cuyo número es pequeño (fig. 196). A consecuencia de esto la conductividad de la muestra resulta ser insignificante y la resistencia, grande. Se forma la llamada CAPA DE BARRERA.

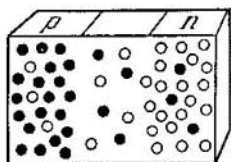


Fig. 192

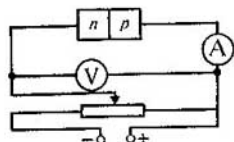


Fig. 193

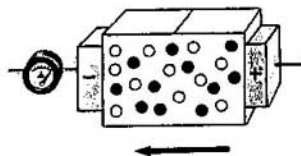


Fig. 194

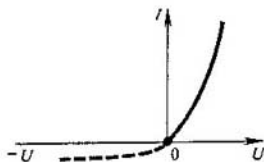


Fig. 195

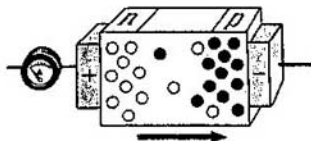


Fig. 196

Esta unión se denomina INVERSA. La característica tensión-intensidad de la unión inversa se representa en la fig. 195 por medio de la línea de trazos.

Por consiguiente, la unión $p-n$ es asimétrica respecto de la corriente: en el sentido directo la resistencia a su paso es mucho menor que en el sentido inverso. Esta propiedad de la unión $p-n$ se aprovecha para rectificar la corriente alterna. Durante la mitad de un período, cuando el potencial del semiconductor tipo $p-n$ es positivo, la corriente pasa libremente por la unión $p-n$. Durante la siguiente mitad del período la corriente es prácticamente nula.

10.15. Diodo semiconductor

En la actualidad, para rectificar la corriente eléctrica en los circuitos radioeléctricos, del mismo modo que las válvulas electrónicas de dos electrodos, se emplean cada vez más los diodos semiconductores, ya que poseen una serie de ventajas.

En la válvula electrónica los portadores de carga (electrones) surgen por cuenta de la emisión termoelectrónica. Esto requiere una fuente especial de energía eléctrica para calentar el filamento del cátodo.

En la unión $p-n$ los portadores de carga se originan al introducir en el cristal la impureza aceptora o donadora. Por lo tanto, en ella no es necesario el empleo de una fuente de energía para obtener los portadores de carga libres. En los circuitos complejos, la economía que esto representa resulta ser muy importante.

Los rectificadores semiconductores, para valores iguales de la corriente rectificada, son mucho más pequeños que las válvulas electrónicas. En virtud de esto los aparatos de radio con semiconductores son más compactos.

Estas ventajas de los elementos semiconductores tienen especial importancia cuando se utilizan en los satélites artificiales de la Tierra, en las naves cósmicas y en las máquinas calculadoras electrónicas.

Los diodos semiconductores se hacen de germanio, selenio y otras sustancias.

Veamos cómo se crea la unión $p-n$ cuando en el diodo se utiliza germanio, que posee conductividad tipo n , a costa de una pequeña adición de impureza donadora. Esta unión es imposible obtenerla juntando mecánicamente dos semiconductores de distinto tipo de conductividad, porque en este caso la holgura que queda entre ellos es demasiado grande. El grosor de la unión $p-n$ no debe ser mayor que las distancias interatómicas. Por eso, sobre una de las superficies de la muestra se suelda indio. La

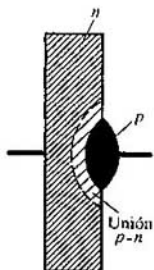


Fig. 197

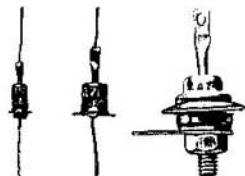


Fig. 198

difusión de los átomos de indio en el monocristal de germanio hace que en la superficie de este último se forme una región de conductibilidad tipo p . La parte restante de la muestra de germanio, en la cual no han penetrado átomos de indio, continúa teniendo conductibilidad tipo n . Entre las dos regiones de conductibilidad de distinto signo se origina la unión $p-n$ (fig. 197). En este diodo semiconductor el germanio hace las veces de cátodo y el indio, las de ánodo.

Para evitar las acciones perniciosas del aire y de la luz, el cristal de germanio se encierra en una cajita metálica hermética (fig. 198).

Los rectificadores semiconductores son muy seguros y duran mucho, pero sólo pueden funcionar en un intervalo de temperaturas limitado (aproximadamente de -70 a 125°C).

10.16. Transistor

Las propiedades de la unión $p-n$ en los semiconductores se puede utilizar para amplificar y generar oscilaciones eléctricas. Actualmente, en lo fundamental, se emplean para este fin los dispositivos llamados triodos semiconductores o transistores¹⁾.

Examinemos uno de los tipos de transistores de germanio o silicio con impurezas donadoras yceptoras. La distribución de las impurezas es tal, que se crea una capa muy delgada (del orden de varias micras) de semiconductor tipo n entre dos capas de semiconductor tipo p (fig. 199). Esta capa delgada recibe el nombre de BASE DEL TRANSISTOR.

En el cristal se forman dos uniones $p-n$, cuyos sentidos directos son opuestos. Tres terminales de las regiones de conductibilidad de distinto tipo dan la posibilidad de conectar el transistor en el circuito representado esquemáticamente en la fig. 199. Así conectado, la unión $p-n$ de la izquierda es DIRECTA y separa la base de la región de conductibilidad tipo p , llamada EMISOR. Si no existiera la unión $p-n$ de la derecha, en el circuito "emisor-base" habría una corriente que dependería de las tensiones de las

¹⁾ De las palabras inglesas "transfer", llevar, y "resistor", resistencia.

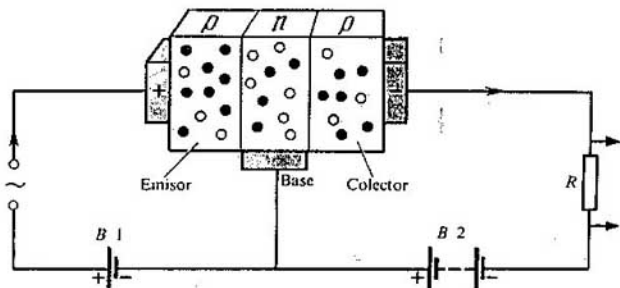


Fig. 199

fuentes (batería *B1* y fuente de tensión alterna) y de la resistencia del circuito, incluyendo la resistencia de la unión directa "emisor-base".

La batería *B2* está conectada de tal modo que la unión *p-n* de la derecha en el esquema (fig. 199) es INVERSA. Esta unión separa la base de la región derecha, de conductibilidad tipo *p*, llamada COLECTOR. Si no existiera la unión *p-n* de la izquierda, la intensidad de la corriente en el circuito del colector sería aproximadamente nula, ya que la resistencia de la unión inversa es muy grande. Pero cuando existe corriente en la unión *p-n* de la izquierda, también aparece corriente en el circuito del colector, con la particularidad de que la intensidad de la corriente en el colector sólo es un poco menor que la intensidad de la corriente en el emisor.

El hecho consiste aquí en lo siguiente. Cuando se crea tensión entre el emisor y la base, los portadores mayoritarios del semiconductor tipo *p*, es decir, los huecos, penetran en la base, donde ya son portadores minoritarios. Como el grosor de la base es muy pequeño y el número de portadores mayoritarios (electrones) que hay en ella es pequeño, dichos huecos casi no se recombinan con los electrones de la base y penetran por difusión en el colector. La unión *p-n* de la derecha está cerrada para los portadores de carga mayoritarios de la base, o sea, para los electrones, pero no para los huecos. En el colector los huecos son arrastrados por el campo eléctrico y cierran el circuito. La intensidad de la corriente que se deriva de la base al circuito del emisor es muy pequeña, porque el área de la sección de la base en el plano horizontal (según la fig. 199) es mucho menor que la sección en el plano vertical.

La intensidad de la corriente en el colector, prácticamente igual a la intensidad de la corriente en el emisor, varía al mismo tiempo que la corriente en éste. La resistencia *R* influye poco en la corriente que pasa por el colector, por lo que puede hacerse bastante grande. Regulando la corriente del emisor por medio de la fuente de tensión alterna conectada a su circuito, obtenemos una variación sincrónica de la tensión en la resistencia *R*. Si la resistencia *R* es grande, la variación de la tensión en ella puede superar decenas de millares de veces la variación de la tensión de la señal en el

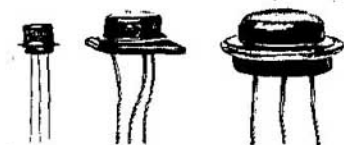


Fig. 200

circuito del emisor. Esto significa una amplificación de la tensión o voltaje. La potencia que se disipa en la carga R será mucho mayor que la potencia que consume el circuito del emisor. Se produce, pues, una ampliación o ganancia de potencia.

APLICACIONES DE LOS TRANSISTORES. El empleo de los transistores (fig. 200) se ha extendido mucho en la técnica moderna. Sustituyen las válvulas electrónicas en muchos circuitos eléctricos de aparatos científicos, industriales y de uso doméstico. También suele darse el nombre de "transistores" a los receptores de radio portátiles que utilizan estos dispositivos.

La ventaja de los transistores, lo mismo que la de los diodos semiconductores, en comparación con las válvulas electrónicas, consiste ante todo en la ausencia del cátodo caldeado, que consume bastante potencia y que requiere tiempo para calentarse. Además, las dimensiones y la masa de estos dispositivos son decenas y hasta centenas de veces menores que las de las válvulas electrónicas. Funcionan a tensión más baja.

Los inconvenientes de los transistores también son los mismos que los de los diodos semiconductores. Son muy sensibles a la elevación de la temperatura, a las sobrecargas eléctricas y a las radiaciones fuertemente penetrantes. Por ahora también tienen otro inconveniente serio: al fabricarlos, la dispersión de los parámetros de los transistores es mayor que la de las válvulas electrónicas. No obstante, el perfeccionamiento de la tecnología y la elaboración de nuevas estructuras de los dispositivos semiconductores permiten confiar en que estos inconvenientes serán pronto soslayados.

10.17. Termistores y células fotorresistentes

TERMISTORES. En los semiconductores la resistencia eléctrica depende en alto grado de la temperatura. Esta propiedad se aprovecha para medir la temperatura ateniéndose a la intensidad de la corriente en el circuito del semiconductor. Los dispositivos que se emplean para este fin se llaman **TERMISTORES** o **TERMORRESISTENCIAS**.

Los termistores figuran entre los dispositivos semiconductores más



Fig. 201

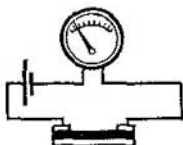


Fig. 202

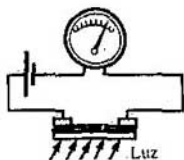


Fig. 203

simples. La industria produce termistores en forma de barras, tubos, discos, arandelas y bolitas cuyas dimensiones van desde varias micras hasta varios centímetros (fig. 201).

La gama de temperaturas medibles con la mayoría de los termistores se encuentra en el intervalo de 170 a 570 K. Pero existen termistores para medir tanto temperaturas muy altas (≈ 1300 K) como muy bajas ($\approx 4-80$ K).

Los termistores se emplean para medir las temperaturas a distancia, para la señalización contra incendios y con otros fines.

CÉLULAS FOTORRESISTENTES. La conductibilidad eléctrica de los semiconductores aumenta no sólo al ser calentados, sino también por la acción de la luz.

De esto es fácil cerciorarse valiéndose del dispositivo cuyo esquema se da en la fig. 202. Puede observarse que, cuando se ilumina el semiconductor (fig. 203), la corriente que pasa por el circuito aumenta sensiblemente. Esto indica que la conductibilidad de los semiconductores aumenta (o que su resistencia disminuye) por la acción de la luz. Este efecto no está relacionado con el calentamiento, ya que también se puede observar si la temperatura permanece invariable.

La conductibilidad eléctrica aumenta a causa de la rotura de los enlaces y de la formación de electrones libres y huecos a expensas de la energía de la luz que incide sobre el semiconductor. Este fenómeno se conoce con el nombre de EFECTO FOTOELÉCTRICO.

Los aparatos en que se utiliza el efecto fotoeléctrico en los semiconductores se llaman CÉLULAS FOTORRESISTENTES o FOTOCONDUCTORAS. La pequeñez y alta sensibilidad de estas células dan la posibilidad de utilizarlas en las ramas más diversas de la ciencia y de la técnica para registrar y medir flujos luminosos débiles. Valiéndose de las células fotorresistentes se determina la calidad de las superficies, se controlan las dimensiones de las piezas, etc.

¿ ?

1. ¿En qué difiere la dependencia de la resistencia en los semiconductores respecto de la temperatura, de esta característica en los metales?
2. ¿Qué portadores de carga móviles existen en un semiconductor intrínseco?
3. ¿Qué ocurre cuando se encuentran un electrón y un hueco?
4. ¿Por qué la resistencia de un semiconductor depende mucho de la presencia en él de impurezas?

- ¿Qué impureza, donadora o aceptora, hay que introducir para obtener un semiconductor tipo n ?
- ¿Qué portadores de carga son mayoritarios y cuáles minoritarios en un semiconductor con impureza aceptora?
- ¿Qué ventajas tiene el diodo semiconductor frente al de vacío?

Ejemplo de resolución de problemas

Las leyes cuantitativas más simples son las de la corriente eléctrica en los metales y electrólitos. Los problemas sobre la ley de Ohm, que se cumple para estos conductores, se dieron en el capítulo anterior. En este capítulo vamos a examinar preferentemente los problemas relacionados con la aplicación de la ley de la electrólisis. La fórmula fundamental es la (10.7). También se aplica la fórmula (10.5), que es más simple. Hay que conocer la constante de Faraday $F = 96\,500 \text{ C/mol}$.

Una esfera conductora, de radio $R = 5 \text{ cm}$, se encuentra en un baño electrolítico lleno de solución de sulfato cúprico (vitriolo azul). ¿Cuánto aumentará la masa de la esfera si el cobre se deposita durante el tiempo $t = 30 \text{ min}$ y la carga eléctrica que llega a cada centímetro cuadrado de superficie de la esfera, por segundo, es igual a $0,01 \text{ C}$? La masa molar del cobre es $M = 0,0635 \text{ kg/mol}$.

Solución. El área de la superficie exterior de la esfera es $S = 4\pi R^2 = 314 \text{ cm}^2$. Por consiguiente, la carga transportada por los iones en el tiempo $t = 30 \text{ min} = 1800 \text{ s}$ será $\Delta q = 0,01 \text{ C}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}) \cdot 314 \text{ cm}^2 \cdot 1800 \text{ s} = 5652 \text{ C}$. La masa del cobre que se deposita será:

$$m = \frac{1}{F} \frac{M}{n} \Delta q; \quad m = 1,9 \cdot 10^{-3} \text{ kg}.$$

Ejercicio

13

- Para recubrir de zinc un objeto metálico se ha colocado en un baño electrolítico un electrodo de zinc cuya masa es $m = 0,01 \text{ kg}$. ¿Qué carga debe pasar por el baño para que dicho electrodo se gaste totalmente? El equivalente electroquímico del zinc $k = 3,4 \cdot 10^{-7} \text{ kg/C}$.
- Con una intensidad de corriente de $1,6 \text{ A}$, en el cátodo de un baño electrolítico se depositan en 10 min $0,316 \text{ g}$ de cobre. Determinar el equivalente electroquímico del cobre.
- ¿Cómo hay que colocar los electrodos para recubrir por electrólisis la superficie interna de un objeto metálico hueco?
- Durante el niquelado de una pieza la intensidad de la corriente a través del baño fue de 25 A y la operación duró 2 h . El equivalente electroquímico del níquel es $3 \cdot 10^{-7} \text{ kg/C}$ y su densidad, $8,9 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$. ¿Qué espesor tiene la capa de níquel depositada, si la superficie de la pieza es igual a $0,2 \text{ m}^2$?
- Un campo eléctrico homogéneo de intensidad \vec{E} se crea en un metal y en el vacío. ¿El camino que recorra un electrón en uno y otro caso, será igual en el mismo tiempo? La velocidad inicial del electrón era nula.
- Determinar la velocidad de los electrones que salen de un cañón electrónico cuando la diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo es de 500 y de 5000 V .

Breve resumen del capítulo X

La conductibilidad eléctrica de los metales se debe a los electrones libres (conducción por electrones).

La conductancia de las disoluciones acuosas de electrolitos, está condicionada por los iones positivos y negativos (conducción por iones). Estos iones se forman al descomponerse las moléculas de los electrolitos durante el proceso de disolución (disociación electrolytica).

En la conducción por iones el paso de la corriente va acompañado del desprendimiento sobre los electrodos de las sustancias que entran en la composición de los electrolitos. Este proceso, que se utiliza mucho en la técnica, se llama electrolisis.

La masa de sustancia que se deposita en la electrolisis durante un tiempo Δt , es:

$$m = \frac{1}{F} \frac{M}{n} I \Delta t,$$

donde M es la masa molar de la sustancia; n , su valencia; $F = eN_A$, el número de Faraday; N_A , la constante de Avogadro, y e , la carga del electrón.

Los gases a temperaturas próximas a la ambiente están formados por moléculas neutras y son dieléctricos. Cuando se calientan, o bajo la acción de radiaciones u otros factores, se origina la ionización de los gases. Éstos se hacen conductores (y se produce la descarga en el gas). La conductibilidad de los gases se debe fundamentalmente a los iones positivos y a los electrones. La descarga que cesa cuando se desconecta el ionizador se llama mantenida o no autónoma.

Se da el nombre de descarga automantenida o autónoma a la que existe sin la acción de ionizadores. En la descarga automantenida los iones y los electrones se forman a expensas de la ionización por choque con electrones, de la emisión termoelectrónica, etc. Existen los siguientes tipos de descarga automantenida: luminiscente, por arco, por chispas y por efecto corona.

Para crear la corriente en el vacío hay que introducir en el tubo de vacío una fuente de electrones. Por lo general esta fuente es un cátodo caldeado. La corriente eléctrica en el vacío se utiliza en muchos dispositivos técnicos, como, por ejemplo, en los diodos para rectificar la corriente alterna y en los tubos de rayos catódicos con haz de electrones controlado por campos eléctricos o magnéticos. Estos tubos son el elemento fundamental de los receptores de televisión y de los oscilógrafos.

En la actualidad se emplean mucho en radiotecnica los semiconductores, cuya resistencia disminuye a medida que aumenta la temperatura y depende en alto grado de la presencia de impurezas. La facilidad con que puede controlarse la conductibilidad de los semiconductores da la posibilidad de utilizarlos en los diodos semiconductores y en los transistores, dispositivos que sirven para ampliar y generar oscilaciones eléctricas.

11. Campo magnético

11.1. Interacción de las corrientes. Campo magnético

Entre las cargas eléctricas en reposo actúan las fuerzas que determina la ley de Coulomb. De acuerdo con la teoría de la acción próxima esta interacción se efectúa así: cada una de las cargas crea un campo eléctrico, el campo de una carga actúa sobre la otra carga y viceversa.

Pero entre las cargas eléctricas pueden existir fuerzas de otra naturaleza. Estas fuerzas se pueden poner de manifiesto por medio del experimento siguiente. Tomemos dos conductores flexibles, sujetémoslos verticalmente y conectemos sus extremos inferiores a los polos de una fuente de corriente (fig. 204). En estas condiciones no se observa atracción ni repulsión entre los conductores¹⁾. Pero si los otros extremos de los conductores se cierran con un alambre, de manera que en los conductores aparezcan corrientes de sentido opuesto (fig. 205), éstos empiezan a repelerse entre sí. En el caso en que las corrientes tengan el mismo sentido en los dos conductores, éstos se atraen (fig. 206).

Las interacciones entre conductores con corriente, es decir, las interacciones entre cargas eléctricas en movimiento se llaman magnéticas. Las fuerzas con que los conductores con corriente actúan entre sí se denominan FUERZAS MAGNÉTICAS. Las interacciones magnéticas se dieron a conocer en el curso de "Física I" (Ed. MIR). Ahora pasaremos a estudiar las fuerzas magnéticas más detalladamente.

CAMPO MAGNÉTICO. Según la teoría de la acción próxima, la

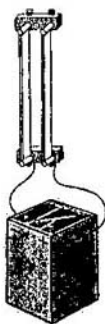


Fig. 204

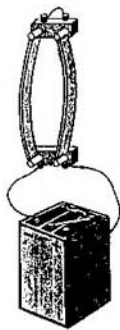


Fig. 205

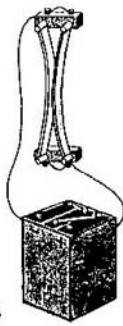


Fig. 206

¹⁾ Los conductores se cargan a expensas de la fuente de corriente, pero sus cargas cuando la diferencia de potencial entre ellos es de varios voltios son insignificantes. Por eso las fuerzas de Coulomb no se manifiestan.

corriente en uno de los conductores no puede actuar directamente sobre la otra corriente.

De un modo semejante a como en el espacio que rodea las cargas eléctricas en reposo surge un campo eléctrico, en el espacio que rodea las corrientes aparece un campo, llamado magnético.

La corriente eléctrica en uno de los conductores crea a su alrededor un campo magnético que actúa sobre la corriente que pasa por el segundo conductor. Y el campo creado por la segunda corriente actúa sobre la primera.

El campo magnético es una forma especial de la materia, mediante la cual se efectúan las interacciones entre las partículas en movimiento eléctricamente cargadas.

Las propiedades fundamentales del campo magnético, establecidas empíricamente, son:

1. *El campo magnético es generado por la corriente eléctrica* (es decir, por las cargas en movimiento).

2. *El campo magnético se manifiesta por su acción sobre una corriente* (o sea, sobre las cargas en movimiento).

Lo mismo que el campo eléctrico, *el campo magnético existe en realidad, independientemente de nosotros y de nuestros conocimientos acerca de él.* Una demostración experimental de la realidad del campo magnético, como también de la realidad del campo eléctrico, es el hecho de la existencia de las ondas electromagnéticas (véase el § 8.7).

CIRCUITO CERRADO CON CORRIENTE EN UN CAMPO MAGNÉTICO. Para estudiar el campo magnético sería conveniente, al parecer, tomar un elemento de corriente muy pequeño, es decir, un trozo pequeño de conductor delgado con corriente, de un modo semejante a como para investigar el campo eléctrico se utilizó un cuerpo cargado pequeño. Pero una corriente continua no puede existir en un trozo de conductor, porque todo circuito por el cual pasa corriente continua está siempre cerrado.

Para estudiar el campo magnético lo mejor es tomar un circuito cerrado de pequeñas dimensiones (en comparación con las distancias a las cuales el campo magnético varía sensiblemente). Por ejemplo, puede tomarse un pequeño cuadro de forma arbitraria, plano, de alambre (fig. 207). Los conductores que aportan la corriente deben estar próximos entre sí o trenzados juntos. Entonces la fuerza resultante que por parte del campo magnético actúa sobre estos conductores será nula.

El carácter de la acción del campo magnético sobre el circuito con corriente se puede establecer por medio del experimento siguiente. Colguemos de unos conductores flexibles delgados, trenzados juntos, un pequeño cuadro móvil plano, formado por varias espiras de alambre. A una distancia mucho mayor que las dimensiones del cuadro situamos un conductor vertical (fig. 208, a). Si se hace pasar la corriente por el conductor y por el cuadro, este último gira y se coloca de tal modo que el conductor resulta estar en el plano del cuadro (fig. 208, b). Si el sentido de la corriente cambia en el conductor, el cuadro gira 180° .

Por el curso de "Física I" (Ed. MIR) se sabe que el campo magnético no

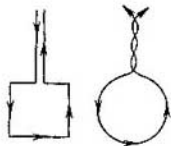


Fig. 207

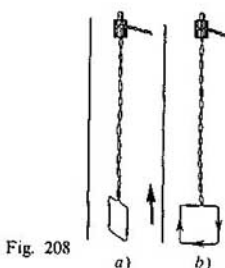


Fig. 208

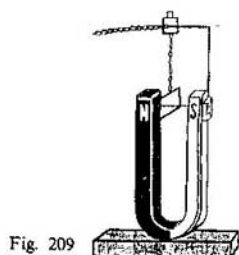


Fig. 209

sólo lo crea la corriente eléctrica, sino también los imanes permanentes. Si entre los polos de un imán se cuelga de unos conductores flexibles un cuadro con corriente, éste girará hasta que su plano se coloque perpendicularmente a la línea que une los dos polos del imán (fig. 209). Por lo tanto, *el campo magnético ejerce sobre el cuadro móvil con corriente una acción orientadora*¹⁾.

11.2. Vector inducción magnética

El campo eléctrico se caracteriza por una magnitud vectorial, la intensidad del campo eléctrico. Para caracterizar el campo magnético es necesario introducir una magnitud física especial.

Hemos visto que en el campo magnético un cuadro con corriente colgado de una suspensión flexible, por parte de la cual no actúan fuerzas de elasticidad que impidan la orientación del cuadro, gira hasta que tome una posición rigurosamente determinada. Por el curso de "Física 1" sabemos que del mismo modo se comporta la aguja magnética. Esto indica que la magnitud que caracteriza el campo magnético debe ser vectorial y que la dirección y el sentido del vector deben estar relacionados con la orientación del cuadro o de la aguja magnética. *La magnitud vectorial que caracteriza el campo magnético se llama vector inducción magnética.* Este vector se designa por la letra \vec{B} .

DIRECCIÓN Y SENTIDO DEL VECTOR INDUCCIÓN MAGNÉTICA. Establezcamos la regla para determinar la dirección del vector \vec{B} . Como dirección del vector inducción magnética en el sitio en que se encuentra el cuadro con corriente se toma la dirección de la perpendicular (normal \vec{n}) al cuadro. Esta perpendicular se toma en el sentido en que avanzaría un sacacorchos (o tornillo a derechas) si su mango se hiciera girar en el sentido de la corriente en el marco (fig. 210).

Así, teniendo un pequeño cuadro con corriente y permitiéndole girar

¹⁾ Un campo magnético homogéneo, es decir, un campo que sea igual en todos los puntos del espacio en que se encuentre el cuadro con corriente, sólo ejerce sobre el cuadro, como demuestra la experiencia, una acción orientadora. En un campo no homogéneo el cuadro, además, se trasladará, atraído hacia el conductor con corriente o repelido por él.

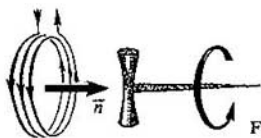


Fig. 210

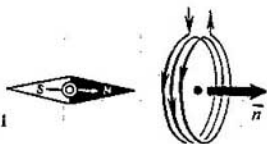


Fig. 211

libremente en el campo magnético, se puede determinar la dirección y el sentido del vector inducción magnética en cualquier punto. Para esto basta esperar a que el cuadro, después de haber girado, se detenga.

La dirección y el sentido del vector inducción magnética se pueden hallar también valiéndose de una aguja magnética. Ésta consiste en un pequeño imán permanente, alargado, con dos polos—sur *S* y norte *N*—en sus extremos. Si la aguja puede orientarse libremente en el espacio, en el campo magnético la dirección y el sentido de la recta trazada por el centro de la aguja de *S* a *N* (fig. 211) coincide con la dirección y el sentido de la normal *n* al cuadro. Pero el sentido de esta normal, relacionado por medio de la regla del tornillo a derechas con el sentido de la corriente en el cuadro, se toma como sentido del vector que caracteriza al campo magnético. Por lo tanto, la dirección y el sentido de *S* a *N* de la aguja magnética orientada libremente se puede tomar como dirección y sentido del vector inducción magnética.

Valiéndose de la aguja magnética se pueden repetir los experimentos antes realizados con el cuadro en el campo magnético del imán permanente (fig. 212) y del conductor recto con corriente.

En el campo magnético del conductor recto con corriente la aguja magnética se sitúa tangencialmente a una circunferencia (fig. 213). El plano de esta circunferencia es perpendicular al conductor y el centro de la circunferencia se halla en el eje de dicho conductor. La dirección y el sentido del vector inducción magnética se halla en este caso por la REGLA DEL SACACORCHOS. ESTA REGLA CONSISTE EN LO SIGUIENTE: SI LA DIRECCIÓN

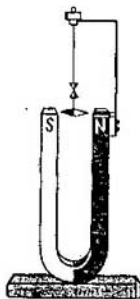


Fig. 212

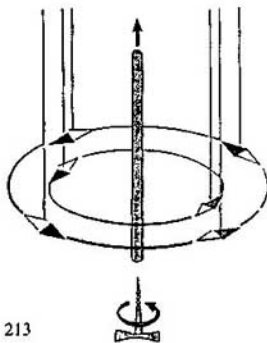


Fig. 213

Y EL SENTIDO DEL MOVIMIENTO DE TRASLACIÓN DEL SACACORCHOS COINCIDE CON LA DIRECCIÓN Y EL SENTIDO DE LA CORRIENTE EN EL CONDUCTOR, EL SENTIDO DE LA ROTACIÓN DEL MANGO DEL SACACORCHOS COINCIDE CON EL SENTIDO DEL VECTOR INDUCCIÓN MAGNÉTICA.

El experimento de determinación de la dirección y el sentido del vector inducción magnética de la Tierra lo realiza todo aquel que se orienta en un lugar por medio de la brújula.

11.3. Líneas de inducción magnética

LÍNEAS DE INDUCCIÓN MAGNÉTICA. Una imagen intuitiva del campo magnético se puede obtener construyendo las llamadas **LÍNEAS DE INDUCCIÓN MAGNÉTICA**. Se llaman líneas de inducción magnética aquellas cuyas tangentes tienen la misma dirección y sentido que el vector \vec{B} en el punto dado del campo (fig. 214). En este aspecto las líneas de inducción magnética son análogas a las líneas de intensidad del campo electrostático.

Vamos a construir las líneas de inducción magnética del campo magnético de un conductor recto con corriente. De los experimentos antes realizados se sigue que las líneas de inducción magnética en este caso serán circunferencias concéntricas que se encuentran en un plano perpendicular al conductor con corriente. El centro de estas circunferencias se hallará en el eje del conductor (fig. 215). Las flechitas que hay sobre las líneas indican el sentido en que está dirigido el vector inducción, tangente a la línea dada. Como en el caso de las líneas de intensidad del campo eléctrico, las líneas de inducción magnética se trazan de tal modo que su densidad sea tanto mayor cuanto más intenso sea el campo en la región dada del espacio.

Daremos también la imagen del campo magnético de una bobina (solenoides) con corriente. En este caso la imagen de las líneas de inducción magnética, construida con ayuda de agujas magnéticas o de pequeños circuitos con corriente, se muestra en la fig. 216 (el solenoide está cortado longitudinalmente). Si la longitud del solenoide es mucho mayor que su



Fig. 214

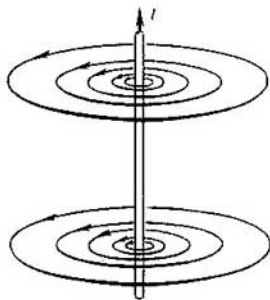


Fig. 215

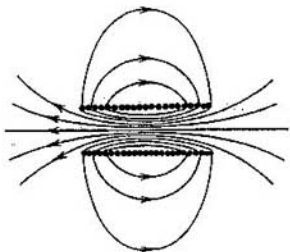


Fig. 216

diámetro, el campo dentro de él puede considerarse homogéneo. *Las líneas de inducción magnética de este campo son paralelas y su densidad es la misma en todas partes.*

La imagen de las líneas de inducción magnética puede hacerse "visible" por medio de finas limaduras de hierro. Este procedimiento se dio a conocer en el curso de "Física I".

En el campo magnético cada una de las limaduras de hierro diseminadas en el cartón se imana y se comporta como una pequeña aguja magnética. La existencia de una gran cantidad de agujas da la posibilidad de determinar en un número mayor de puntos la dirección del campo magnético y, por consiguiente, de establecer más exactamente la disposición de las líneas de inducción magnética. Algunas de las imágenes del campo magnético obtenidas por medio de limaduras de hierro se dan en las figs. 217-220.

CAMPO ROTACIONAL. *Una peculiaridad muy importante de las líneas de inducción magnética es la de carecer de principio y de fin. Estas líneas son siempre cerradas.* Se recordará que en el campo eléctrico no ocurría esto. Allí las líneas de fuerza, en todos los casos, empezaban en las cargas positivas y terminaban en las negativas.

Los campos cuyas líneas de fuerza son cerradas se llaman rotacionales. El campo magnético es, pues, un campo rotacional.

El hecho de que las líneas de inducción magnética sean cerradas es la propiedad fundamental del campo magnético. Ésta consiste en que *el campo*

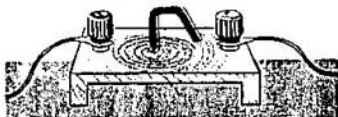


Fig. 217

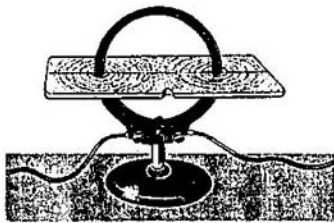


Fig. 218

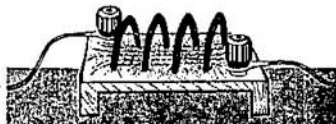


Fig. 219

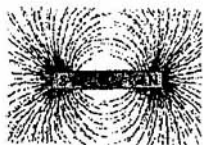


Fig. 220

magnético no tiene fuentes. En la naturaleza no existen cargas magnéticas semejantes a las eléctricas.

¿ ?

1. ¿Qué fuerzas se llaman magnéticas?
2. Enumere las propiedades fundamentales del campo magnético.
3. ¿Cómo se mueven un circuito cerrado con corriente y una aguja magnética en un campo magnético homogéneo?
4. Indique un procedimiento para hallar la dirección y el sentido del vector inducción magnética.
5. ¿A qué se da el nombre de líneas de inducción magnética?
6. ¿Qué campos se llaman rotacionales?

11.4. Aparatos de medida eléctrica

MOMENTO DE LAS FUERZAS QUE ACTÚAN SOBRE UN CIRCUITO CON CORRIENTE. Según las leyes de la mecánica, el giro de un cuerpo alrededor de su eje se debe a la acción sobre él de un momento de fuerzas. Por consiguiente, el hecho de que bajo la influencia del campo magnético gire un circuito con corriente (efecto orientador del campo magnético, 11.1) significa que sobre el circuito actúa, por parte del campo, un momento de fuerzas.

Este momento depende de la posición del circuito respecto del vector inducción magnética \vec{B} . Si la normal al circuito coincide con la dirección del vector \vec{B} , el momento de fuerzas será, evidentemente, nulo, ya que en esta posición el circuito no gira. El momento de fuerzas aumenta a medida que crece el ángulo entre \vec{n} y \vec{B} . Se puede demostrar experimentalmente que el valor máximo del momento de fuerzas corresponde al ángulo de 90° , en cuyo caso las líneas de inducción magnética se hallan en el plano del circuito ¹⁾.

APARATOS DE MEDIDA ELÉCTRICA. La acción orientadora del campo magnético sobre un circuito móvil con corriente se aprovecha en los aparatos de medida eléctrica, basados en el sistema magnetoelectrónico.

La estructura de los aparatos de medida que utilizan este sistema es la

¹⁾ El momento de las fuerzas que actúan sobre un circuito con varias espiras es, evidentemente, proporcional al número de éstas N . Todo el campo magnético actúa sobre cada espira del mismo modo y, sobre el circuito de N espiras actúa un momento de fuerzas N veces mayor.

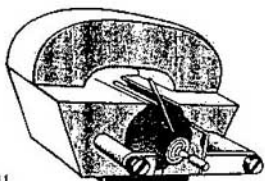


Fig. 221

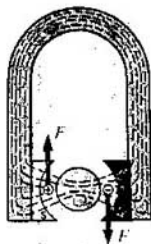


Fig. 222

siguiente. Sobre un cuadro ligero de aluminio de forma rectangular, al cual va sujeta una aguja indicadora, hay arrollada una bobina. El cuadro está sujeto a dos semiejes. En la posición de equilibrio lo mantienen dos finos muellecitos en espiral (en la fig. 221 se ve uno de ellos). El momento de las fuerzas de elasticidad de estos muelles, que hace que la bobina retorne a la posición de equilibrio, es proporcional al ángulo de desviación de la aguja respecto de dicha posición. La bobina se encuentra entre los polos de un imán permanente con piezas polares de forma especial.

Dentro de la bobina hay un cilindro de hierro dulce. Esta estructura asegura que las líneas de inducción magnética tengan dirección radial en la región en que se hallan las espiras de la bobina (fig. 222). Como resultado; cualquiera que sea la posición de la bobina, el momento de las fuerzas que actúan sobre ella por parte del campo magnético es máximo y, si la intensidad de la corriente no varía, siempre es el mismo. La bobina con corriente gira hasta que equilibra el momento de las fuerzas de elasticidad por parte del muelle con el momento de las fuerzas que actúan sobre el cuadro por parte del campo magnético. Duplicando la intensidad de la corriente observamos que la aguja gira un ángulo dos veces mayor y así sucesivamente. Esto significa que el momento de fuerzas M máximo que actúan sobre la bobina por parte del campo magnético es directamente proporcional a la intensidad de la corriente: $M \sim I$. En virtud de esto se puede hallar la intensidad de la corriente por el ángulo de giro de la bobina, si previamente se gradúa el aparato. Para eso hay que establecer qué ángulos de giro de la aguja corresponden a valores conocidos de la intensidad de la corriente.

11.5. Módulo del vector inducción magnética. Flujo magnético

MÓDULO DEL VECTOR INDUCCIÓN MAGNÉTICA.

Haciendo experimentos con circuitos de área distinta se puede establecer que el ángulo de giro de la aguja, si la intensidad de la corriente permanece invariable, es proporcional al área del circuito S . Como el ángulo de giro viene determinado por el momento de fuerzas que actúan sobre el circuito móvil por parte del campo magnético, resulta que $M \sim S$.

Así pues, el momento de fuerzas que actúan sobre el circuito móvil con corriente es proporcional a la intensidad de la corriente que pasa por dicho circuito y a su área: $M \sim IS$. Este hecho experimental puede utilizarse para determinar el módulo del vector inducción magnética. En efecto, como el momento de fuerzas máximo es proporcional a la intensidad de la corriente en el circuito y a su área, la relación

$$\frac{M}{IS} = B \quad (11.1)$$

no depende de las propiedades del circuito y caracteriza el campo magnético en una región determinada del espacio¹⁾. Esta magnitud es el **MÓDULO DEL VECTOR INDUCCIÓN MAGNÉTICA**. El campo magnético se caracteriza totalmente con el vector de inducción magnética \vec{B} . En cada punto del campo se pueden determinar la dirección y el sentido del vector inducción magnética y su módulo, midiendo el momento de fuerzas que actúan sobre un circuito móvil con corriente.

La ley que define la inducción magnética de un elemento pequeño de corriente es bastante compleja y no vamos a estudiarla aquí.

UNIDAD DE INDUCCIÓN MAGNÉTICA. Como unidad de inducción magnética se toma la inducción magnética de un campo en el cual sobre un circuito de área igual a 1 m^2 , con corriente de 1 A de intensidad, actúa por parte del campo un momento de fuerzas máximo $M = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$:

$$1 \text{ unidad de inducción magnética} = 1 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{A} \cdot \text{m}^2} = 1 \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}}$$

A la unidad de inducción magnética se le da el nombre de **TESLA** (y se designa por **T**) en honor del científico electrotécnico yugoslavo N. Tesla.

MAGNETÓMETRO. Prácticamente, en los aparatos para medir la inducción magnética (magnetómetros), en vez de un circuito móvil con corriente, se utiliza un pequeño imán. La inducción magnética se aprecia en este caso por el momento de fuerzas que actúan sobre el imán por parte del campo magnético.

FLUJO MAGNÉTICO. El vector inducción magnética \vec{B} caracteriza el campo magnético en cada punto del espacio. Puede introducirse otra magnitud que depende de los valores del módulo del vector \vec{B} no en un punto, sino en todos los puntos de la superficie limitada por el circuito cerrado plano.

Para esto consideremos un conductor cerrado, plano (circuito), que limite una superficie cuya área sea S y que se encuentre en un campo magnético homogéneo. La normal \vec{n} al plano del conductor forma el ángulo α con la dirección del vector inducción magnética \vec{B} (fig. 223). Se llama flujo

¹⁾ Análogamente, la razón de la fuerza que sobre una carga ejerce el campo eléctrico, a esta misma carga, no depende de la carga y por eso caracteriza el campo eléctrico en un punto dado del espacio.

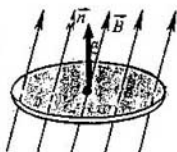


Fig. 223

magnético Φ a través de la superficie de área S la magnitud igual al producto del módulo del vector inducción magnética \vec{B} por el área S y por el coseno del ángulo α entre los vectores \vec{B} y \vec{n} (normal a la superficie):

$$\Phi = BS \cos \alpha. \quad (11.2)$$

El producto $B \cos \alpha = B_n$ es la proyección del vector inducción magnética sobre la normal al plano del circuito. Por eso

$$\Phi = B_n S. \quad (11.3)$$

El flujo magnético puede interpretarse intuitivamente como una magnitud proporcional al número de líneas de inducción magnética que atraviesan la superficie de área S .

11.6. Ley de Ampère

El campo magnético actúa sobre todas las partes del conductor con corriente. La ley que determina la fuerza que actúa sobre un trozo aislado de conductor (elemento de corriente) fue establecida en 1820 por A. M. Ampère¹⁾. Como crear un elemento de corriente separado es imposible, Ampère hizo sus experimentos con conductores cerrados. Cambiando la forma de los conductores y sus posiciones, Ampère consiguió establecer la expresión de la fuerza que actúa sobre un elemento de corriente separado.

MÓDULO DE LA FUERZA DE AMPÈRE. Para explicar de qué depende la fuerza que actúa sobre un conductor con corriente en un campo magnético, se puede utilizar el dispositivo representado en la fig. 224.

El campo magnético es creado por un imán permanente y actúa en lo fundamental sobre un conductor horizontal. La fuerza se mide por medio de una balanza especial unida al conductor por dos varillas.

Duplicando la intensidad de la corriente se puede advertir que también se duplica la fuerza que actúa sobre el conductor. Añadiendo otro imán

¹⁾ Más exactamente, Ampère estableció la ley de la fuerza de interacción entre dos trozos pequeños (elementos) de conductores con corriente. Él era partidario de la teoría de la acción a distancia y no utilizó el concepto de campo. No obstante, por tradición y como reconocimiento a los méritos de este científico, la expresión de la fuerza magnética que actúa sobre un conductor con corriente por parte del campo magnético, también se llama ley de Ampère.

André Marie Ampère (1775-1836), gran físico y matemático francés, uno de los fundadores de la electrodinámica. Introdujo en la física el concepto de "corriente eléctrica" y construyó la primera teoría del magnetismo, basada en la hipótesis de las corrientes moleculares, descubrió la interacción mecánica entre las corrientes eléctricas y estableció las relaciones cuantitativas para la fuerza de estas interacciones. Maxwell llamó a Ampère "el Newton de la electricidad". Ampère trabajó también en las ramas de la mecánica, de la teoría de las probabilidades y del análisis matemático.



duplicamos, aproximadamente, la longitud de la parte del conductor sobre la cual actúa el campo magnético. En estas condiciones la fuerza también se duplica aproximadamente. Utilizando distintos imanes se puede establecer que la fuerza magnética (fuerza de Ampère) es directamente proporcional al módulo del vector \vec{B} .

Finalmente, la fuerza de Ampère depende del ángulo que forma el vector \vec{B} con el conductor. De esto podemos cerciorarnos cambiando la inclinación del soporte sobre el cual descansan los imanes, de manera que varíe el ángulo entre el conductor y las líneas de inducción magnética.

Como es natural, todas las conclusiones a que hemos llegado tienen carácter cualitativo. Ahora vamos a formular exactamente la ley de Ampère.

Supongamos que el vector inducción magnética \vec{B} forma con la dirección del trozo de conductor con corriente (elemento de corriente) el ángulo

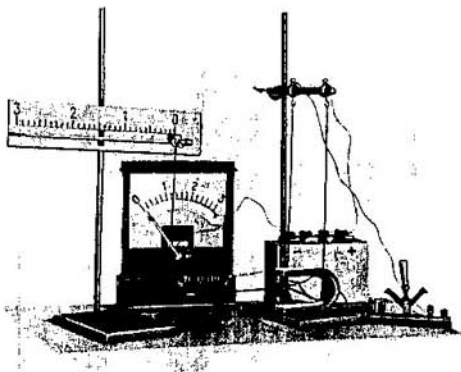


Fig. 224

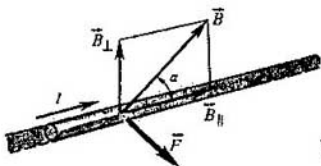


Fig. 225

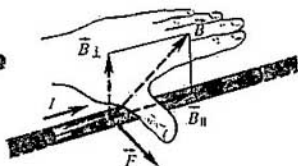


Fig. 226

α (fig. 225). (Como sentido del elemento de corriente se toma el de la corriente que pasa por el conductor.) La experiencia demuestra que el campo magnético cuyo vector inducción está dirigido a lo largo del conductor con corriente no ejerce acción alguna sobre la corriente. Por eso el módulo de la fuerza sólo depende del módulo de la componente del vector \vec{B} perpendicular al conductor, o sea, de $B_{\perp} = B \sin \alpha$, y no depende de la componente de \vec{B} dirigida a lo largo del conductor. La expresión del módulo F de la fuerza que actúa sobre un pequeño trozo Δl del conductor, por el cual pasa la corriente I , por parte del campo magnético, cuya inducción \vec{B} forma con el elemento de corriente el ángulo α , tiene el aspecto:

$$F = B |I| \Delta l \sin \alpha. \quad (11.4)$$

Esta expresión recibe el nombre de LEY DE AMPÈRE.

DIRECCIÓN DE LA FUERZA DE AMPÈRE. En el experimento antes considerado el vector \vec{F} es perpendicular al elemento de corriente y al vector \vec{B} . Su dirección y sentido se determina por la regla de la mano izquierda. Esta regla consiste en lo siguiente:

si la mano izquierda se dispone de modo que la componente perpendicular al conductor del vector \vec{B} entre por la palma y los cuatro dedos extendidos señalen el sentido de la corriente, el pulgar, abierto 90° , indica el sentido de la fuerza que actúa sobre el trozo de conductor (fig. 226).

APLICACIÓN DE LA LEY DE AMPÈRE. Conociendo la dirección, el sentido y el módulo de la fuerza que actúa sobre cualquier trozo de un conductor se puede calcular la fuerza que actúa sobre todo el conductor cerrado. Para eso hay que hallar la suma de las fuerzas que actúan sobre todas las partes del conductor. La absoluta seguridad en que la ley de Ampère es correcta se infiere de que el valor calculado de este modo de la fuerza resultante para cualquier conductor cerrado coincide con el valor de la fuerza determinado experimentalmente.

La ley de Ampère se aplica para calcular las fuerzas que actúan sobre un conductor con corriente en muchos dispositivos técnicos, en particular, en los motores eléctricos.

La acción de todos los motores eléctricos se basa en la utilización de las fuerzas de Ampère. Por el devanado de la parte giratoria del motor (rotor) pasa corriente eléctrica. Un potente electroimán crea el campo magnético

que actúa sobre los conductores con corriente y los obliga a moverse. El rotor se hace de chapas de acero y a los polos del electroimán se les da una forma especial, para concentrar la inducción magnética en los sitios en que se encuentra el devanado del rotor.

Unos dispositivos especiales aseguran que la dirección de las corrientes en los devanados sea tal, que la interacción magnética cree un momento de fuerzas que haga que el rotor gire continuamente.

11.7. Acción del campo magnético sobre una carga en movimiento. Fuerza de Lorentz

Una corriente eléctrica es un conjunto de partículas cargadas que se mueven ordenadamente. Por eso la acción del campo magnético sobre un conductor con corriente es el resultado de la acción de dicho campo sobre las partículas cargadas que se mueven dentro del conductor.

La fuerza que el campo magnético ejerce sobre una partícula con carga en movimiento se llama fuerza de Lorentz, en honor del gran físico holandés H.A. Lorentz, fundador de la teoría electrónica de la constitución de la sustancia. Esta fuerza puede hallarse aplicando la ley de Ampère. El módulo de la fuerza de Lorentz es igual a la razón del módulo de la fuerza F que actúa sobre un trozo de conductor de longitud Δl , al número N de partículas cargadas que se mueven ordenadamente en dicho trozo de conductor:

$$F_L = \frac{F}{N}. \quad (11.5)$$

Consideremos un trozo de conductor recto, delgado, con corriente (fig. 227). Supongamos que la longitud de este trozo Δl y el área de su sección transversal S son tan pequeñas que el vector inducción del campo magnético \vec{B} se puede suponer invariable dentro de los límites del trozo de conductor. La intensidad de la corriente I en el conductor se relaciona con la carga q_0 de las partículas, la concentración de éstas (número de cargas por unidad de volumen) n y la velocidad v de su movimiento ordenado, por la fórmula siguiente (véase 9.1):

$$I = q_0 n v S. \quad (11.6)$$

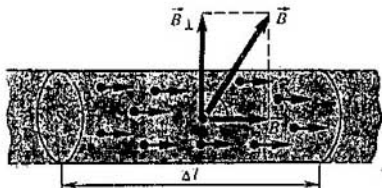


Fig. 227

El módulo de la fuerza con que actúa el campo magnético sobre el elemento de corriente elegido será:

$$F = |I| \Delta l B \sin \alpha.$$

Sustituyendo aquí la intensidad de la corriente I por su expresión (11.6), se obtiene:

$$F = |q_0| n v S \Delta l B \sin \alpha = v |q_0| N B \sin \alpha,$$

donde $N = nS\Delta l$ es el número de partículas cargadas que hay en el volumen considerado. Por consiguiente, sobre cada carga en movimiento actuará el campo magnético con la fuerza de Lorentz

$$F_L = \frac{F}{N} = |q_0| v B \sin \alpha, \quad (11.7)$$

donde α es el ángulo entre el vector velocidad y el vector inducción magnética. La fuerza de Lorentz es perpendicular a los vectores \vec{B} y \vec{v} y su sentido se determina por la regla de la mano izquierda, lo mismo que el sentido de la fuerza de Ampère.

Si la mano izquierda se dispone de modo que la componente de la inducción magnética \vec{B} , perpendicular a la velocidad de la carga, entre por la palma, y que los cuatro dedos extendidos señalen el sentido del movimiento de la carga positiva (inverso al movimiento de la negativa), el pulgar, abierto 90°, indica el sentido de la fuerza de Lorentz F_L que actúa sobre la carga (fig. 228).

El campo eléctrico actúa sobre la carga q_0 con la fuerza $\vec{F}_{el} = q_0 \vec{E}$. Por lo tanto, si existe un campo eléctrico y un campo magnético, la fuerza total \vec{F} que actúa sobre la carga será ¹⁾:

$$\vec{F} = \vec{F}_{el} + \vec{F}_L. \quad (11.8)$$

Como la fuerza de Lorentz es perpendicular a la velocidad de las partículas, no realiza trabajo. De acuerdo con el teorema de la energía cinética (véase el texto de "Física 2"), esto significa que la fuerza de Lorentz no varía la energía cinética de las partículas y, por lo tanto, el módulo de su velocidad. Bajo la acción de la fuerza de Lorentz sólo cambia la dirección de la velocidad de la partícula.

La acción de la fuerza de Lorentz sobre los electrones en movimiento se puede observar acercando un electroimán (o un imán permanente) a un tubo de rayos catódicos. Variando la corriente en el electroimán puede apreciarse

¹⁾ Con frecuencia se da el nombre de fuerza de Lorentz a la fuerza total (11.8) con que el campo electromagnético actúa sobre la partícula cargada. En este caso la fuerza (11.7) se llama parte magnética de la fuerza de Lorentz.

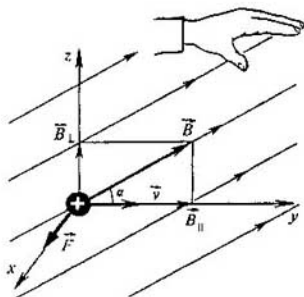


Fig. 228

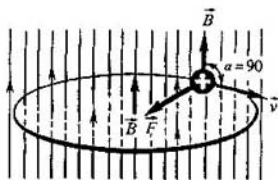


Fig. 229

que la desviación del rayo electrónico aumenta al crecer el módulo B de la inducción magnética del campo. Si se invierte el sentido de la corriente en el electroimán, el rayo electrónico se desvía en el sentido opuesto.

La dependencia de la fuerza de Lorentz respecto del ángulo α entre los vectores \vec{B} y \vec{v} puede ponerse de manifiesto observando cómo cambia la desviación del rayo electrónico al variar el ángulo entre el eje del imán y el eje del tubo catódico.

MOVIMIENTO DE UNA PARTÍCULA CARGADA EN UN CAMPO MAGNÉTICO HOMOGÉNEO. Estudiemos el movimiento de una partícula, cuya carga sea q_0 , en un campo magnético homogéneo \vec{B} dirigido perpendicularmente a la velocidad inicial \vec{v} de la partícula (fig. 229). La fuerza de Lorentz depende del módulo de la velocidad de la partícula y de la inducción del campo. Como el campo magnético no varía el módulo de la velocidad, el módulo de la fuerza de Lorentz permanece también invariable. Esta fuerza es perpendicular a la velocidad y, por consiguiente, determina la aceleración centrípeta de la partícula. La invariabilidad del módulo de la aceleración centrípeta de una partícula, que se mueve con velocidad de módulo constante, significa que la partícula se mueve uniformemente por una circunferencia de radio r . Determinemos este radio. De acuerdo con la segunda ley de Newton (fig. 229)

$$m \frac{v^2}{r} = |q_0| v B.$$

De donde

$$r = \frac{mv}{|q_0| B}. \quad (11.9)$$

UTILIZACIÓN DE LA FUERZA DE LORENTZ. La acción del campo magnético sobre una carga en movimiento se utiliza mucho en la técnica

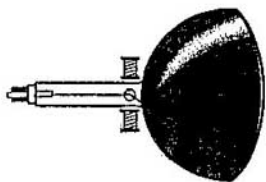


Fig. 230

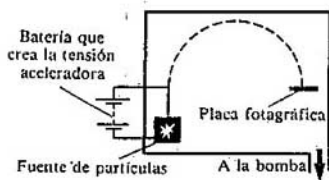


Fig. 231

moderna. Baste recordar los tubos catódicos de televisión (cinescopios), en los cuales los electrones lanzados hacia la pantalla son desviados por medio del campo magnético que crean unas bobinas especiales (fig. 230).

La acción del campo magnético ha encontrado otra aplicación en los dispositivos que permiten separar las partículas cargadas atendiendo a sus cargas específicas, es decir, a la razón de la carga de la partícula a su masa y, por los resultados obtenidos, determinar exactamente la masa de las partículas. Estos dispositivos se conocen con el nombre de ESPECTRÓGRAFOS DE MASAS.

La fig. 231 representa el esquema teórico de un espectrógrafo de masas muy simple. La cámara de vacío del dispositivo se encuentra en un campo magnético (cuyo vector intensidad \vec{B} es perpendicular al plano del dibujo). Las partículas cargadas (electrones o iones), aceleradas por el campo eléctrico, describen un arco y van a parar a una placa fotográfica, en la cual dejan una huella que da la posibilidad de medir con gran exactitud el radio r . Conociendo el radio de la trayectoria se determina la carga específica del ion. Y una vez conocida la carga del ion es fácil calcular su masa.

¿ ?

1. ¿Cuál es el principio básico del funcionamiento de los aparatos de medida eléctrica que utilizan el sistema magnetoelectrónico?
2. ¿Cómo se determina el módulo del vector inducción magnética?
3. ¿A qué se da el nombre de flujo de inducción magnética?
4. ¿A qué es igual el módulo de la fuerza de Ampère?
5. Enuncie la regla para hallar la dirección y el sentido de la fuerza de Ampère.
6. Enuncie la regla para determinar la dirección y el sentido de la fuerza de Lorentz.
7. ¿A qué es igual el módulo de la fuerza de Lorentz?
8. ¿Por qué la fuerza de Lorentz no varía el módulo de la velocidad de las partículas cargadas?
9. ¿Cómo se mueve una partícula cargada en un campo magnético homogéneo, si la velocidad inicial de la partícula es perpendicular a las líneas de inducción magnética?

11.8. Propiedades magnéticas de la sustancia

PERMEABILIDAD MAGNÉTICA. Como ya hemos dicho, el campo magnético no sólo lo crean las corrientes, sino también los imanes permanentes. Estos últimos sólo se pueden hacer de unas cuantas sustancias, pero todas las sustancias colocadas en un campo magnético se imanán, es decir, crean de por sí un campo magnético. En virtud de eso, el vector inducción magnética \vec{B} en un medio homogéneo se diferencia del vector \vec{B}_0 en el mismo punto del espacio, pero en el vacío.

La relación $B/B_0 = \mu$, que caracteriza las propiedades magnéticas del medio, recibe el nombre de **PERMEABILIDAD MAGNÉTICA DE DICHO MEDIO.**

Por lo tanto, en un medio homogéneo la inducción magnética será:

$$\vec{B} = \mu \vec{B}_0, \quad (11.10)$$

donde μ es la permeabilidad magnética¹⁾.

HIPÓTESIS DE AMPÈRE. La causa a consecuencia de la cual poseen los cuerpos propiedades magnéticas fue descubierta por el científico francés A. M. Ampère. Primero, bajo la impresión directa que le produjo observar cómo giraba la aguja magnética al aproximarla a un conductor con corriente en los experimentos de H. Ch. Oersted, supuso Ampère que el magnetismo de la Tierra era debido a corrientes eléctricas que pasaban por el interior del globo terráqueo. El paso principal estaba dado: las propiedades magnéticas de un cuerpo se podían explicar por las corrientes que circulaban dentro de él. Después llegó Ampère a la conclusión general: las propiedades magnéticas de todo cuerpo están determinadas por corrientes eléctricas cerradas dentro de él. Este paso definitivo que dio Ampère pasando de la posibilidad de explicar las propiedades magnéticas de los cuerpos por las corrientes, a la afirmación categórica de que las interacciones magnéticas son interacciones de corrientes, son prueba de la gran audacia científica de aquél.

Según la hipótesis de Ampère, dentro de las moléculas y los átomos circulan corrientes eléctricas elementales. (Ahora sabemos bien que estas corrientes son originadas por el movimiento de los electrones en los átomos.) Si los planos en que circulan estas corrientes se encuentran, a causa del movimiento desordenado térmico de las moléculas, dispuestos caóticamente unos respecto de otros (fig. 232, a), sus acciones se compensan mutuamente y el cuerpo no pone de manifiesto propiedades magnéticas. En estado imanado, las corrientes elementales están orientadas en el cuerpo de tal modo que sus acciones se suman (fig. 232, b).

¹⁾ La fórmula (11.10) sólo es correcta para un medio homogéneo que llene todo el espacio o para los casos de cuerpos de simetría especial, como, por ejemplo, para una varilla homogénea dentro de un solenoide. Si el cuerpo tiene forma arbitraria, al introducirlo en el campo magnético de inducción \vec{B}_0 , la inducción dentro de él no estará definida por la fórmula (11.10). La dependencia entre \vec{B} y \vec{B}_0 es mucho más compleja y viene determinada por la forma del cuerpo y su orientación respecto de \vec{B}_0 .

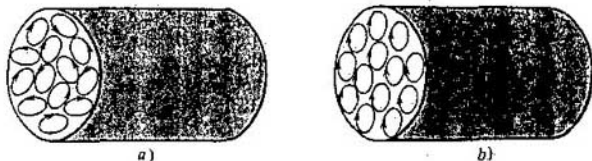


Fig. 232

La hipótesis de Ampère explica por qué la aguja magnética y el cuadro (circuito) con corriente se comportan de igual modo en el campo magnético (véase el 11.1). La aguja puede considerarse como un conjunto de pequeños circuitos con corriente orientados en el mismo sentido.

En los cuerpos con gran permeabilidad magnética ($\mu \gg 1$), llamados FERROMAGNÉTICOS (hierro, cobalto, níquel, gadolinio y muchas aleaciones), los campos magnéticos se crean, sin embargo, no a consecuencia del movimiento de rotación de los electrones alrededor de los núcleos, sino a causa de su "rotación propia". El electrón, como si girase alrededor de su eje y, poseyendo carga, crea siempre un campo magnético además del que surge a expensas de su movimiento orbital¹⁾.

MATERIALES FERROMAGNÉTICOS Y SU UTILIZACIÓN. Aunque en la naturaleza no son muchos los cuerpos ferromagnéticos, son ellos los que tienen más importancia práctica. Poniendo un núcleo de hierro o de acero a una bobina se puede conseguir que el campo magnético creado por ella sea muchas veces más intenso sin aumentar la intensidad de la corriente en la bobina. Los núcleos de los transformadores, generadores, motores eléctricos, etc., se hacen de materiales ferromagnéticos.

La permeabilidad magnética de los ferromagnéticos no es constante²⁾. Depende de la inducción del campo magnético.

Cuando se desconecta el campo magnético exterior, el material ferromagnético permanece imanado, es decir, crea un campo magnético en el espacio que lo rodea. La orientación ordenada de las corrientes elementales no desaparece al desconectar el campo exterior. En virtud de esto existen los imanes permanentes.

Los imanes permanentes se utilizan mucho en los aparatos de medida eléctrica, en los altavoces y teléfonos, en los registradores de sonido, en las brújulas magnéticas, etc.

TEMPERATURA DE CURIE. A temperaturas mayores que una determinada temperatura para cada material ferromagnético, desaparecen las

¹⁾ Hay que anteponer "como si" al verbo "girar" porque el electrón, por sus propiedades, no se parece a una esferita pequesísima. Su movimiento se subordina a las leyes de la mecánica cuántica y no a la mecánica clásica de Newton. El momento de rotación propio o intrínseco (momento cinético) del electrón se llama "espín".

²⁾ De los procedimientos para medir la permeabilidad magnética de los ferromagnéticos se tratará en el capítulo siguiente.

propiedades ferromagnéticas de dicho material. Esta temperatura se llama **TEMPERATURA (O PUNTO) DE CURIE**, en honor del científico francés que descubrió este fenómeno. Si un clavo imanado se calienta mucho pierde su aptitud para atraer objetos de hierro. El punto de Curie para el hierro es 753°C , para el níquel, 365°C , y para el cobalto, 1000°C . Existen aleaciones ferromagnéticas cuya temperatura de Curie es inferior a 100°C .

Las primeras investigaciones detalladas de las propiedades magnéticas de los materiales ferromagnéticos fueron llevadas a cabo por el eminente físico ruso A. G. Stoliétov (1839-1896).

- ¿ ?
1. ¿Qué magnitud caracteriza las propiedades magnéticas de un medio?
 2. ¿Cuál es la esencia de la hipótesis de Ampère?
 3. ¿Qué cuerpos se llaman ferromagnéticos?
 4. ¿Con qué fines se utilizan los materiales ferromagnéticos?

Ejemplos de resolución de problemas

Para resolver los problemas concernientes al campo magnético hay que saber determinar, por medio de la regla de la mano izquierda, la dirección y el sentido de la fuerza de Ampère, conociendo la dirección y el sentido de la corriente y de la inducción magnética (o el sentido de la corriente conociendo el sentido de la fuerza de Ampère y de la inducción magnética). También hay que saber hallar la dirección y el sentido de la fuerza de Lorentz. El sentido de la inducción magnética de una corriente se determina por la regla del sacacorchos.

Los problemas en que se aplican la ley de Ampère y la expresión de la fuerza de Lorentz se deben resolver en el mismo orden que los problemas de mecánica. Pero además de las fuerzas mecánicas hay que tener en cuenta la fuerza de Ampère (11.4) y la fuerza de Lorentz (11.7).

1. Un alambre conductor rectilíneo, con corriente, se encuentra sobre los polos de un imán en herradura (fig. 233, a). El alambre puede desplazarse libremente en todas las direcciones. ¿Cómo se moverá este alambre?

Solución. Hallamos los sentidos de los vectores inducción magnética en distintos puntos y aplicamos la regla de la mano izquierda. El alambre girará en el plano horizontal y, al mismo tiempo, será atraído hacia el espacio comprendido entre los polos del imán (fig. 233, b).



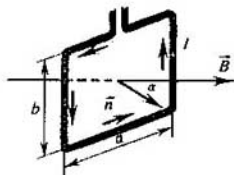


Fig. 234

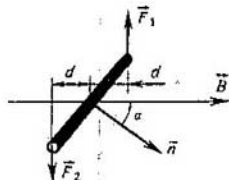


Fig. 235

2. El cuadro rectangular con corriente representado en la fig. 234 tiene las siguientes dimensiones: $a = 3 \text{ cm}$ y $b = 5 \text{ cm}$. La intensidad de la corriente en el cuadro es $I = 10 \text{ A}$. La inducción del campo magnético $B = 0,1 \text{ T}$ forma un ángulo $\alpha = 30^\circ$ con la normal del cuadro. Determinar el momento de fuerzas que actúan sobre el cuadro por parte del campo magnético.

Solución. La fig. 235 muestra la vista desde arriba de la sección del cuadro por un plano horizontal. De acuerdo con la regla de la mano izquierda, sobre los lados del cuadro cuya longitud es b actúa el par de fuerzas \vec{F}_1 y \vec{F}_2 , perpendiculares al vector \vec{B} , que crea un momento de rotación respecto del eje que pasa por el centro del cuadro. Las fuerzas que actúan sobre los lados de longitud a , según la regla de la mano izquierda, lo único que hacen es alargar el cuadro.

Por la ley de Ampère $F_1 = F_2 = F = |I|Bb$. El brazo de cada una de estas fuerzas es $d = a \sin \alpha/2$. El momento de fuerzas total será: $M = 2F(a/2) \sin \alpha = |I|BS \sin \alpha$, siendo $S = ab$ el área del cuadro. Si $\alpha = 90^\circ$ el momento de fuerzas será máximo y coincidirá con el valor de M en la fórmula (11.1), que se introdujo como definición del módulo del vector inducción magnética.

Sustituyendo las magnitudes por sus valores numéricos, se obtiene $M = 7,5 \cdot 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m}$.

3. En un espacio en que actúan simultáneamente un campo eléctrico y otro magnético homogéneos y continuos, se mueve un protón siguiendo una trayectoria rectilínea. Se sabe que la intensidad del campo eléctrico es \vec{E} . ¿Cuál será la inducción \vec{B} del campo magnético?

Solución. El protón puede moverse rectilíneamente en dos casos:

1) Cuando el vector \vec{E} está dirigido a lo largo de la trayectoria del protón. En este caso el vector \vec{B} también debe estar dirigido a lo largo de dicha trayectoria y su módulo puede ser cualquiera, ya que el campo magnético no actuará sobre la partícula.

2) Si los vectores \vec{E} , \vec{B} y \vec{v} son perpendiculares entre si y la fuerza que actúa sobre el protón por parte del campo eléctrico tiene igual módulo y sentido contrario que la fuerza de Lorentz que actúa sobre el protón por parte del campo magnético (fig. 236). Como $e\vec{E} + \vec{E}_L = 0$, resulta $eE - evB = 0$ y $B = E/v$.

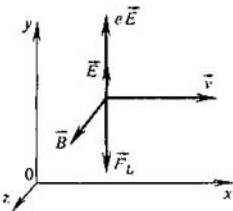


Fig. 236

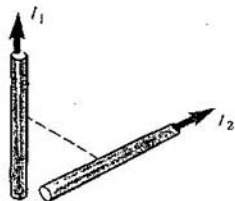


Fig. 237

Ejercicio 14

1. Aplicando las reglas del sacacorchos y de la mano izquierda, mostrar que las corrientes paralelas del mismo sentido se atraen y las de sentido opuesto se repelen.
2. Por dos conductores rectilíneos que se cruzan formando un ángulo recto se hacen pasar las corrientes I_1 e I_2 (fig. 237). ¿Cómo variará la posición de un conductor respecto del otro?
3. El cuadro con corriente, descrito en el ejemplo de resolución del problema 2, está vuelto de tal modo que la normal a él forma un ángulo de 90° con las líneas de inducción magnética. Determinar el momento de fuerzas que actúan sobre el cuadro.
4. Un conductor, de longitud $l = 0,15$ m, por el cual pasa corriente de intensidad $I = 8$ A, es perpendicular a la inducción de un campo magnético homogéneo cuyo módulo es $B = 0,4$ T. Hallar el trabajo realizado al trasladar dicho conductor $0,025$ m en el sentido de la fuerza de Ampère.
5. Determinar la dirección del vector inducción del campo magnético en el cuello de un cinescopio (fig. 230).
6. Una partícula, con carga q y masa m , empieza a moverse con la velocidad \vec{v} en un campo magnético homogéneo cuya inducción es \vec{B} . La velocidad inicial de la partícula forma con el vector \vec{B} un ángulo α . Demostrar que la trayectoria de la partícula será una línea helicoidal. ¿Qué radio tendrá esta hélice?

Breve resumen del capítulo XI

La interacción entre corrientes eléctricas, llamada magnética, se efectúa por medio del campo magnético. La característica fundamental del campo magnético es el vector inducción magnética \vec{B} .

Como sentido del vector inducción magnética se toma el de la normal a un cuadro con corriente que tenga la posibilidad de orientarse libremente en el campo magnético. Este sentido coincide con el de la aguja magnética que se encuentre en el campo, es decir, con el sentido de la recta trazada del polo sur al polo norte de dicha aguja.

El módulo del vector inducción magnética viene determinado por la razón del momento máximo de fuerzas que actúan sobre el cuadro (circuito) por parte del campo magnético, al producto de la intensidad de la corriente en dicho cuadro por el área de este último.

Las líneas de inducción magnética abarcan los conductores con corriente y son siempre cerradas. El campo cuyas líneas de fuerza son cerradas se llama rotacional.

Según la ley de Ampère, sobre un trozo de conductor con corriente, de longitud Δl actúa por parte del campo magnético una fuerza cuyo módulo es:

$$F = B |I| \Delta l \sin \alpha,$$

donde α es el ángulo entre el trozo de conductor y el vector \vec{B} . La dirección y el sentido de esta fuerza se determina por la regla de la mano izquierda.

Sobre una partícula en movimiento cargada actúa la fuerza de Lorentz, cuyo módulo es:

$$F_L = |q_0| v B \sin \alpha,$$

donde α es el ángulo entre la velocidad de la partícula y el vector inducción magnética. La fuerza de Lorentz es perpendicular a la velocidad de la partícula y, por consiguiente, no realiza trabajo. Esta fuerza hace que varíe la dirección de la velocidad de la partícula, pero no varía su energía cinética.

Todos los cuerpos que se encuentran en un campo magnético se inanan, es decir, crean ellos mismos un campo magnético. La razón del vector inducción magnética en un medio homogéneo a la inducción magnética en el vacío se llama permeabilidad magnética de dicho medio y caracteriza las propiedades magnéticas de la sustancia $\mu = B/B_0$.

En la mayoría de las sustancias las propiedades magnéticas se manifiestan débilmente. Sólo en los cuerpos ferromagnéticos, a los cuales pertenece el hierro, la permeabilidad magnética es grande ($\mu \gg 1$) y depende de la inducción magnética. Aunque en la naturaleza son relativamente poco numerosos los materiales ferromagnéticos, éstos tienen gran importancia práctica, ya que dan la posibilidad de aumentar centenares de veces la inducción magnética del campo sin gastar energía.

Los materiales ferromagnéticos se utilizan para hacer núcleos de transformadores, generadores, motores eléctricos, etc., e imanes permanentes.

12. Inducción electromagnética

12.1. Descubrimiento de la inducción electromagnética

Hasta ahora hemos estudiado los campos eléctricos y magnéticos que no varían con el tiempo. Se ha explicado que el campo eléctrico lo crean las cargas eléctricas en reposo y el campo magnético, las cargas en movimiento, es decir, la corriente eléctrica. Pasemos ahora al estudio de los campos eléctricos y magnéticos que varían con el tiempo.

El hecho más importante que se ha logrado descubrir es que entre los campos eléctrico y magnético existe una íntima correlación. *El campo magnético que varía con el tiempo genera un campo eléctrico y el campo eléctrico que varía con el tiempo genera un campo magnético.* Sin la existencia de esta relación entre los campos sería imposible una diversidad de

manifestaciones de las fuerzas electromagnéticas tan grande como la que existe en realidad. Sin ella no existirían las ondas radioeléctricas ni la luz.

No es casual que el paso primero y decisivo hacia el descubrimiento de las nuevas propiedades de las interacciones electromagnéticas lo diera el promotor del concepto de campo electromagnético M. Faraday. Él estaba seguro de que los fenómenos eléctricos y magnéticos eran de naturaleza común. En virtud de esto hizo un descubrimiento que después sirvió de base para construir los generadores de todas las centrales eléctricas del mundo, que transforman la energía mecánica en energía de la corriente eléctrica. (Otras fuentes, como son las pilas voltaicas, los acumuladores, etc., sólo proporcionan una parte insignificante de la energía que se produce.)

La corriente eléctrica, razonaba Faraday, es capaz de imanar un trozo de hierro. ¿No podrá un imán, a su vez, hacer que se produzca una corriente eléctrica?

Durante mucho tiempo no se consiguió descubrir esta relación. Era difícil imaginarse lo esencial, a saber: que sólo un imán en movimiento o un campo magnético variable con el tiempo pueden excitar la corriente eléctrica en una bobina.

El siguiente hecho muestra el tipo de casualidades que podían dificultar dicho descubrimiento. Casi al mismo tiempo que Faraday, el físico suizo J. D. Colladon intentó obtener la corriente eléctrica en una bobina valiéndose de un imán. Para su trabajo utilizó un galvanómetro cuya ligera aguja magnética se encontraba dentro de la bobina del aparato. Para que el imán no ejerciera influencia directa sobre la aguja, los terminales de la bobina en que Colladon movía el imán, con la esperanza de obtener corriente en ella, fueron sacados a la habitación contigua y allí se conectaron al galvanómetro. Colladon introducía el imán en la bobina y, él mismo, iba a la habitación vecina, donde comprobaba desilusionado que el galvanómetro no indicaba corriente alguna. Si durante todo el tiempo hubiera observado el galvanómetro y hubiese encargado a otra persona el desplazamiento del imán, habría hecho el trascendental descubrimiento. Pero no ocurrió así. El imán, en reposo respecto de la bobina, no producía corriente en ella.

El fenómeno de la inducción electromagnética consiste en que la corriente eléctrica surge en un circuito conductor en reposo dentro de un campo magnético variable con el tiempo, o que se mueve dentro de un campo magnético continuo de tal modo que varíe el número de líneas de inducción magnética que atraviesan el circuito. El descubrimiento fue hecho el día 29 de agosto de 1831. Éste es uno de los pocos casos en que la fecha de un descubrimiento importante se conoce exactamente. He aquí cómo el mismo Faraday describe su primer experimento:

"Sobre una bobina ancha de madera se arrolló un alambre de cobre de 203 pies¹⁾ de largo y entre sus espiras se arrolló otro alambre de la misma longitud, pero aislado del primero por medio de hilo de algodón. Uno de estos arrollamientos fue conectado al galvanómetro y el otro a una potente

¹⁾ 1 pie equivale a 304,8 mm.

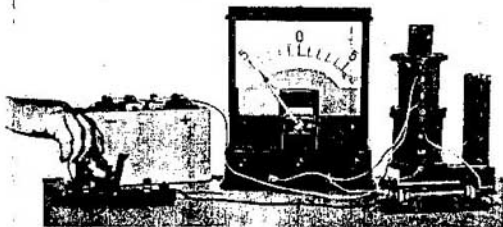


Fig. 238

batería formada por 100 pares de placas ... Al cerrar el circuito se lograba una acción repentina extraordinariamente débil sobre el galvanómetro y lo mismo se observó al interrumpir la corriente. Cuando ésta pasaba continuamente por uno de los arrollamientos no se apreciaba acción alguna sobre el galvanómetro ni, en general, de inducción sobre el otro arrollamiento, a pesar de que el calentamiento de todo el arrollamiento conectado a la batería y el brillo de las chispas que saltaban entre los carbones evidenciaban la potencia de dicha batería" (M. Faraday, "Experimental Researches in Electricity", 1ª serie).

Así pues, primero fue descubierta la inducción en los conductores que se encuentran en reposo uno respecto de otro, durante los cierres y aperturas del circuito. Después, comprendiendo claramente que la aproximación o el alejamiento de los conductores con corriente debía conducir al mismo resultado que el cierre y la apertura del circuito, Faraday demostró con unos experimentos que la corriente se produce cuando las bobinas se desplazan una respecto de la otra. Faraday conocía los trabajos de Ampère y comprendía que un imán es un conjunto de pequeñas corrientes que circulan dentro de las moléculas. El 17 de octubre del mismo año, según registra su diario de laboratorio, fue descubierta la corriente inducida en una

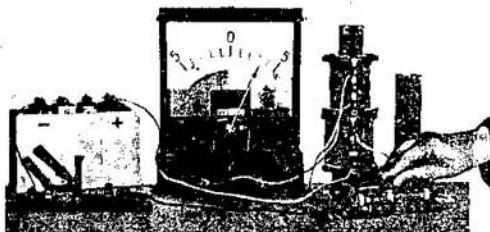


Fig. 239

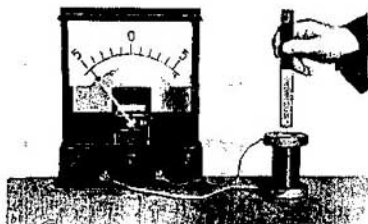
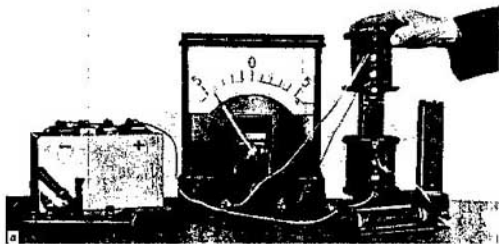


Fig. 240

bobina al introducir en (o sacar de) ella un imán. En un mes descubrió Faraday experimentalmente todas las particularidades esenciales de los fenómenos de inducción electromagnética.

Ahora los experimentos de Faraday puede repetirlos cualquiera. Para esto hay que disponer de dos bobinas, un imán, una batería de pilas y un galvanómetro suficientemente sensible.

En el dispositivo representado en la fig. 238 la corriente inducida se genera en una de las bobinas cuando se cierra o se abre el circuito eléctrico de la otra bobina, en reposo respecto de la primera. En el dispositivo de la fig. 239 se varía la intensidad de la corriente en una de las dos bobinas por medio de un reóstato. En la fig. 240, a la corriente inducida aparece cuando las bobinas se mueven una respecto de la otra, y en la fig. 240, b, cuando se mueve un imán permanente respecto de una bobina.

El mismo Faraday comprendió ya la causa común de la que depende la aparición de la corriente inducida en experimentos que a primera vista parecen distintos.

En un circuito conductor cerrado se produce corriente cuando varía el número de líneas de inducción magnética que atraviesan el área limitada por el circuito. Y cuanto más rápidamente varía el número de líneas de inducción magnética, tanto mayor es la corriente inducida que aparece. La



Fig. 241

causa que motiva la variación del número de líneas de inducción magnética es indiferente. Esta causa puede ser la variación del número de líneas de inducción magnética que atraviesan el área de un circuito conductor en reposo, debida al cambio de la intensidad de la corriente en una bobina contigua (fig. 238), y la variación del número de líneas de inducción causada por el movimiento de un circuito en un campo magnético no homogéneo, en el cual la densidad de las líneas varía en el espacio (fig. 241).

12.2. Sentido de la corriente inducida. Ley de Lenz

Vamos a esclarecer el importante problema del sentido de la corriente inducida.

Conectando la bobina, en que aparece la corriente inducida, a un galvanómetro se pone de manifiesto que el sentido de esta corriente depende de si el imán se acerca a la bobina (por su polo norte, por ejemplo) o se aleja de ella (fig. 240, b).

La corriente inducida, de uno u otro sentido, que se produce interacciona con el imán. La bobina, con la corriente que por ella pasa, se asemeja a un imán con dos polos, norte y sur. El sentido de la corriente de inducción determina qué extremo de la bobina hace las veces de polo norte (las líneas de inducción magnética salen de él) y cuál de polo sur (las líneas de inducción magnética entran en él). Apoyándose en la ley de conservación de la energía se puede predecir en qué casos la bobina atraerá el imán y en cuáles lo repelerá.

INTERACCIÓN DE LA CORRIENTE INDUCIDA CON EL IMÁN.

Si el imán se acerca a la bobina, la corriente inducida que aparece en el conductor repelerá necesariamente el imán. Para aproximar el imán a la bobina hay que realizar un trabajo positivo. La bobina se comporta como un imán cuyo polo de igual nombre mira al del imán que se aproxima. Y los polos homónimos, como es sabido, se repelen.

Figúrese que ocurriera al revés. Al aproximar el imán a la bobina él

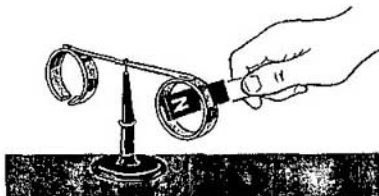


Fig. 242

mismo tendería a introducirse en ella. La ley de conservación de la energía se infringiría en este caso, ya que la energía cinética del imán aumentaría y al mismo tiempo se produciría corriente, para lo cual se requiere un gasto de energía. Es decir, la energía cinética del imán y la energía de la corriente surgirían de la nada, es decir, sin gastar energía.

Al alejar el imán, por el contrario, de acuerdo con la ley de conservación de la energía debe aparecer una fuerza de atracción.

La validez de esta conclusión se puede demostrar con el experimento que muestra la fig. 242. En los extremos de una varilla, que puede girar libremente alrededor del eje vertical están sujetos dos anillos conductores, de aluminio. Uno de ellos está cortado. Si se acerca un imán al anillo no cortado aparece en él corriente inducida cuyo sentido será tal, que el anillo se verá repelido por el imán y la varilla girará. Si el imán se aleja del anillo, éste será atraído por el imán. Con el anillo cortado el imán no interacciona, porque el corte impide que aparezca en él corriente inducida. La repulsión o atracción del imán por la bobina depende del sentido de la corriente inducida. Por eso la ley de conservación de la energía permite enunciar una regla para determinar el sentido de la corriente inducida.

¿En qué consiste la diferencia entre estos dos experimentos: de aproximación del imán a la bobina y de alejamiento del mismo? En que en el primer caso el número de líneas de inducción magnética que atraviesan las espiras de la bobina o, lo que es lo mismo, el flujo magnético, aumenta (fig. 243, a), y en el segundo, disminuye (fig. 243, b). Además, en el primer

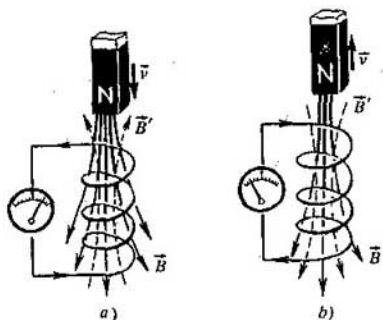


Fig. 243

caso las líneas de inducción magnética salen del extremo superior de la bobina, puesto que ésta repele el imán, y en el segundo, al contrario, dichas líneas entran en este extremo. Estas últimas líneas de inducción magnética se representan en la fig. 243 por líneas de trazos.

LEY DE LENZ. Ahora hemos llegado a lo principal: cuando el flujo magnético a través de la bobina aumenta, la corriente inducida tiene un sentido tal, que el campo magnético que ella crea se opone a que crezca el flujo magnético a través de las espiras de la bobina. En efecto, el vector inducción B' de este campo tiene sentido opuesto al del vector inducción B que crea la corriente eléctrica. En cambio, si el flujo magnético a través de la bobina se debilita, la corriente inducida crea un campo magnético, cuya inducción es B' , que hace que aumente el flujo magnético a través de las espiras de la bobina.

Ésta es la esencia de la regla general para determinar el sentido de la corriente inducida, aplicable a todos los casos. Esta regla, conocida con el nombre de ley de Lenz, fue establecida por el físico ruso E. C. Lenz.

Según la ley de Lenz, la corriente inducida que se produce en un circuito cerrado tiene un sentido tal, que el flujo magnético creado por ella a través del área limitada por el circuito tiende a compensar la variación del flujo magnético que origina dicha corriente.

12.3. Ley de la inducción electromagnética

Enunciemos la ley de la inducción electromagnética. Los experimentos de Faraday demostraron que la intensidad de la corriente inducida I_i en un circuito conductor es proporcional a la velocidad con que varía el número de líneas de inducción magnética B que atraviesan el área limitada por dicho circuito. Más exactamente esta afirmación se puede enunciar aplicando el concepto de flujo magnético.

El flujo magnético se interpreta intuitivamente como el número de líneas de inducción magnética que atraviesan el área de una superficie S . Por eso la velocidad con que varía este número no es nada más que la velocidad con que varía el flujo magnético.

Si en un tiempo pequeño Δt la variación del flujo magnético es $\Delta\Phi$, la velocidad de variación de dicho flujo será $\Delta\Phi/\Delta t$. Por lo tanto, la afirmación que se infiere directamente del experimento se puede enunciar así: la intensidad de la corriente inducida es proporcional a la velocidad con que varía el flujo magnético a través del área limitada por el circuito:

$$I_i \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (12.1)$$

F. E. M. DE INDUCCIÓN. Sabemos que en un circuito se produce corriente eléctrica cuando sobre las cargas libres del conductor actúan fuerzas exteriores. El trabajo de estas fuerzas en transportar una carga positiva unitaria a lo largo de un circuito cerrado se llama fuerza electromotriz (f. e. m.). Por consiguiente, cuando varía el flujo magnético

a través del área limitada por el circuito, en él aparecen fuerzas exteriores cuya acción se caracteriza por una f.e.m., llamada f.e.m. de inducción (o inducida), que se designa por la letra \mathcal{E}_i .

De acuerdo con la ley de Ohm para un circuito cerrado $I_i = \mathcal{E}_i/R$. La resistencia del conductor no depende de la variación del flujo magnético. Por lo tanto, la expresión (12.1) es correcta solamente porque la f.e.m. inducida es proporcional a $\Delta\Phi/\Delta t$.

LEY DE LA INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA. La ley de la inducción electromagnética se enuncia precisamente para la f.e.m., y no para la intensidad de la corriente. Así enunciada esta ley expresa la esencia del fenómeno que no depende de las propiedades de los conductores, en los cuales se produce la corriente inducida. De acuerdo con la ley de la inducción electromagnética, la f.e.m. inducida en un circuito cerrado es igual en módulo a la velocidad con que varía el flujo magnético a través del área limitada por el circuito ¹⁾:

$$|\mathcal{E}_i| = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|.$$

¿Cómo puede tenerse en cuenta en la ley de la inducción electromagnética el sentido de la corriente inducida (o el signo de la f.e.m. inducida) de acuerdo con la ley de Lenz?

En la fig. 244 se representa un circuito cerrado. Vamos a considerar positivo el sentido de recorrido del circuito contrario al de las agujas del reloj. La normal \vec{n} al circuito forma un "tornillo a derechas" con el sentido de recorrido del circuito.

Supongamos que la inducción magnética \vec{B} tiene el sentido de la normal al circuito y aumenta con el tiempo. En este caso, $\Phi > 0$ y $\Delta\Phi/\Delta t > 0$.

De acuerdo con la ley de Lenz, la corriente inducida crea un flujo magnético $\Phi' < 0$. Las líneas de inducción del campo magnético de la corriente inducida se representan en la fig. 244 por líneas de trazos. Por consiguiente, la corriente inducida I_i , según la regla del sacacorchos, estará dirigida en el sentido de las agujas del reloj (o sea, contra el sentido positivo de recorrido del circuito) y la f.e.m. inducida será negativa. Por lo tanto, en la ley de la inducción electromagnética deberá figurar el signo menos, que indicará que \mathcal{E}_i y $\Delta\Phi/\Delta t$ tienen signos distintos:

$$\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (12.2)$$

MEDIDA DE LA PERMEABILIDAD MAGNÉTICA DEL HIERRO. El fenómeno de la inducción electromagnética puede utilizarse para medir la

¹⁾ La experiencia sólo demuestra rectamente que entre \mathcal{E}_i y $\Delta\Phi/\Delta t$ existe una proporcionalidad directa. Pero el coeficiente de proporcionalidad puede suponerse igual a la unidad si la unidad de medida del flujo magnético aún no ha sido establecida.

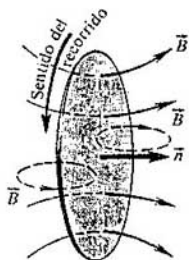


Fig. 244

permeabilidad magnética del hierro y de otros materiales ferromagnéticos.

La f.c.m. inducida es proporcional a la velocidad con que varía el flujo magnético que atraviesa la bobina. Si en una bobina larga se coloca un núcleo de hierro, la inducción magnética, según la fórmula (11.10), aumenta

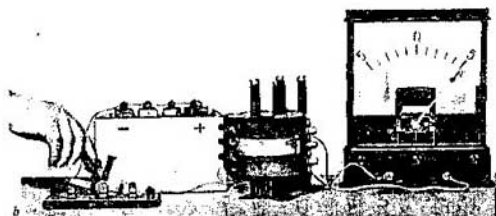
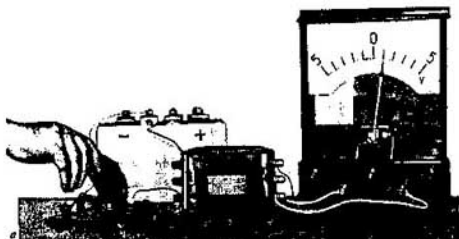


Fig. 245

μ veces. Por consiguiente, el mismo número de veces aumenta el flujo magnético y la f.e.m. inducida. Cuando se abre el circuito que alimenta de corriente continua a la bobina imanante, en una segunda bobina, pequeña, arrollada sobre la principal, se produce corriente inducida, que es registrada por el galvanómetro (fig. 245, a). Si dentro de la bobina se encuentra el núcleo de hierro, la desviación del galvanómetro será μ veces mayor (fig. 245, b). Las mediciones muestran que cuando se introduce el núcleo de hierro en la bobina, el flujo magnético puede aumentar millares de veces. Por lo tanto, la permeabilidad magnética del hierro es enorme.

UNIDADES DE INDUCCIÓN MAGNÉTICA Y DE FLUJO MAGNÉTICO. En el sistema internacional de unidades (SI) la ley de la inducción electromagnética se utiliza para establecer la unidad de flujo magnético. Esta unidad se llama WEBER o WEBERIO (Wb).

Como la f.e.m. de inducción \mathcal{E}_i se mide en voltios y el tiempo en segundos, de acuerdo con (12.2) el weberio se puede definir como sigue: el flujo magnético a través del área limitada por un circuito cerrado es igual a 1 Wb, si al disminuir uniformemente este flujo hasta anularse en 1 s se produce en el circuito una f.e.m. inducida de 1 V. $1 \text{ Wb} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ s}$.

La unidad de inducción magnética se establece basándose en la relación (11.2). Si el vector \vec{B} es perpendicular a la superficie S , resulta $\Phi = BS$. De aquí la inducción magnética será igual a la unidad si crea a través de un área igual a 1 m^2 un flujo magnético igual a 1 Wb.

Esta unidad de inducción magnética recibe el nombre de tesla (T).

$$1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2 = 1 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = 1 \frac{\text{J} \cdot \text{s}}{\text{C} \cdot \text{m}^2} = 1 \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}}$$

¿ ?

1. ¿En qué consiste el fenómeno de la inducción electromagnética?
2. ¿Cómo se determina el sentido de la corriente inducida?
3. ¿Cómo se enuncia la ley de la inducción electromagnética?

12.4. Campo rotacional eléctrico

La f.e.m. de inducción se produce en un conductor en reposo situado dentro de un campo variable con el tiempo, o en un conductor que se mueve dentro de un campo magnético, el cual puede no variar con el tiempo. El valor de la f.e.m. se determina en ambos casos por la ley (12.2), pero el origen de dicha f.e.m. es distinto. Vamos a empezar por estudiar el primer caso.

Supongamos que ante nosotros tenemos un transformador, es decir, dos bobinas montadas sobre un núcleo. Conectando el devanado primario a la red, obtenemos corriente en el devanado secundario (fig. 246) si éste está cerrado. Los electrones se ponen en movimiento en el conductor del devanado secundario. Pero, ¿qué fuerzas hacen que se muevan? El propio campo magnético que atraviesa la bobina no puede hacerlo, ya que este campo actúa exclusivamente sobre las cargas en movimiento (en esto precisamente

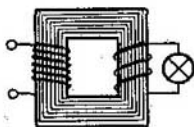


Fig. 246

se diferencia del campo eléctrico) y el conductor, con los electrones que hay en él, está en reposo ¹⁾.

Además del campo magnético, sobre las cargas actúa también el campo eléctrico. Con la particularidad de que este último puede actuar sobre las cargas en reposo. Pero el campo a que hasta ahora nos hemos venido refiriendo (electrostático y estacionario) lo crean las cargas eléctricas, mientras que la corriente inducida aparece bajo la acción de un campo magnético variable. Esto hace suponer que los electrones, en el conductor en reposo, son puestos en movimiento por un campo eléctrico y que este campo es generado directamente por el campo magnético variable. Con esto se afirma una nueva propiedad fundamental del campo: variándolo con el tiempo, el campo magnético genera un campo eléctrico. A esta conclusión llegó por primera vez J. C. Maxwell.

Ahora el fenómeno de la inducción electromagnética se nos presenta bajo un nuevo aspecto. Lo principal en él es el proceso de generación del campo eléctrico por el magnético. Por lo tanto, la existencia de un circuito conductor, como, por ejemplo, una bobina, no cambia la esencia del fenómeno. El conductor con su reserva de electrones (o de otras partículas) libres sólo da la posibilidad de poner de manifiesto el campo eléctrico que se produce. El campo pone en movimiento los electrones del conductor y con esto se manifiesta. La esencia del fenómeno de la inducción electromagnética en un conductor en reposo consiste no tanto en la aparición de la corriente inducida, como en el surgimiento del campo eléctrico, que hace que se muevan las cargas eléctricas.

El campo eléctrico que se genera cuando varía el campo magnético tiene una estructura totalmente distinta de la del electrostático. No está relacionado directamente con las cargas eléctricas y sus líneas de intensidad no pueden empezar y terminar en ellas. Estas líneas, en general, no empiezan ni terminan en parte alguna, sino que son líneas cerradas semejantes a las de inducción del campo magnético. Éste es el llamado CAMPO ROTACIONAL ELÉCTRICO (fig. 247).

El sentido de sus líneas de fuerza coincide con el sentido de la corriente inducida. La fuerza que ejerce el campo rotacional eléctrico sobre una carga q_0 es, lo mismo que antes, $\vec{F} = q_0 \vec{E}$. Pero a diferencia del campo eléctrico estacionario, el trabajo que realiza el campo rotacional en una trayectoria

¹⁾ En realidad el problema no es tan simple. En el conductor en reposo los electrones efectúan también el movimiento térmico caótico. Pero la velocidad media de este movimiento es nula. Por lo tanto, la intensidad de la corriente producida directamente por el campo magnético también debe ser nula.

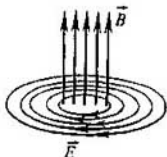


Fig. 247

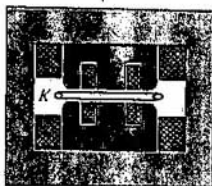


Fig. 248

cerrada no es nulo. Esto se explica porque durante la traslación de una carga a lo largo de una línea de intensidad del campo eléctrico cerrada (fig. 247) el trabajo tendrá el mismo signo en todos los trozos de la trayectoria, ya que la fuerza y la traslación tienen el mismo sentido. El trabajo que el campo rotacional eléctrico realiza al trasladar la carga positiva unitaria por el camino cerrado es la f.e.m. inducida en el conductor en reposo.

BETATRÓN. Cuando varía rápidamente el campo magnético de un potente electroimán se producen fuertes torbellinos del campo eléctrico que pueden utilizarse para acelerar electrones hasta velocidades próximas a la de la luz. En este principio se basa la estructura del acelerador de electrones llamado BETATRÓN. En el betatrón los electrones son acelerados por un campo rotacional eléctrico dentro de una cámara de vacío anular *K*, que se encuentra en el espacio polar de un electroimán *M* (fig. 248).

12.5. F.e.m. de inducción en los conductores en movimiento

Si un conductor se mueve en un campo magnético constante con el tiempo, la f.e.m. inducida en el conductor no se debe al campo rotacional eléctrico sino a otra causa.

Al moverse el conductor junto con él se desplazan sus cargas libres. Por lo tanto, sobre estas cargas actúa por parte del campo magnético la fuerza de Lorentz. Esta fuerza hace que las cargas se muevan dentro del conductor. Por consiguiente, la f.e.m. tiene, en este caso, "origen magnético".

En muchas centrales eléctricas de la Tierra es precisamente la fuerza de Lorentz la que produce el desplazamiento de los electrones en los conductores que se mueven.

Calculemos la f.e.m. inducida en un circuito rectangular colocado en un campo magnético homogéneo (fig. 249). Supongamos que el lado del circuito $|MN| = l$ se desliza con velocidad constante \vec{v} a lo largo de los lados *NC* y *MD*, permaneciendo siempre paralelo al lado *CD*. El vector inducción magnética \vec{B} del campo homogéneo es perpendicular al conductor *MN* y forma el ángulo α con la dirección de su velocidad.

La fuerza con la cual el campo magnético actúa sobre una partícula cargada en movimiento (véase el 11.7) tiene el módulo

$$F_L = |q_0| v B \sin \alpha. \quad (12.3)$$

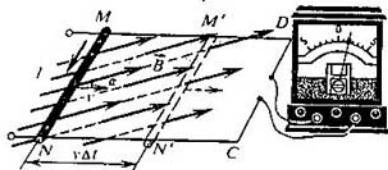


Fig. 249

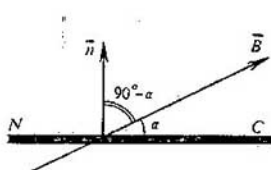


Fig. 250

Esta fuerza está dirigida a lo largo del conductor MN . El trabajo de la fuerza de Lorentz por el camino l es ¹⁾:

$$A = F_L l = |q_0| v B l \sin \alpha.$$

La fuerza electromotriz inducida en el conductor MN es igual a la razón del trabajo de traslación de la carga q_0 a esta misma carga:

$$\mathcal{E}_i = \frac{A}{q_0} = v B l \sin \alpha. \quad (12.4)$$

Esta fórmula es correcta para cualquier conductor de longitud l que se mueva con velocidad \vec{v} en un campo magnético homogéneo.

En los otros conductores del circuito la f.e.m. es nula, puesto que dichos conductores están en reposo. Por consiguiente, la f.e.m. en todo el circuito $MNCD$ es igual a \mathcal{E}_i y permanece invariable si la velocidad de movimiento \vec{v} es constante. La corriente eléctrica aumentará con esto, ya que al desplazarse el conductor MN hacia la derecha disminuye la resistencia total del circuito.

Por otra parte, la f.e.m. de inducción se puede calcular valiéndose de la ley de la inducción electromagnética (12.2). En efecto, el flujo magnético a través del circuito $MNCD$ es

$$\Phi = BS \cos(90^\circ - \alpha) = BS \sin \alpha,$$

donde el ángulo $90^\circ - \alpha$ es el ángulo entre el vector \vec{B} y la normal \vec{n} a la superficie del circuito (fig. 250); S , el área del circuito $MNCD$. Si se considera que en el instante inicial ($t=0$) el conductor MN estaba a la distancia NC del conductor CD (fig. 249), al trasladarse el primero, el área S varía con el tiempo del modo siguiente:

$$S = |MN|(|NC| - vt).$$

En el tiempo Δt el área del circuito varía en $\Delta S = -lv \Delta t$. El signo menos indica que el área disminuye. La variación del flujo magnético durante este

¹⁾ Éste no es el trabajo total de la fuerza de Lorentz. Existe además la componente de la fuerza de Lorentz dirigida en sentido contrario al de la velocidad \vec{v} . Esta componente realiza un trabajo negativo.

tiempo es $\Delta\Phi = -Blv\Delta t \text{ sen } \alpha$. Por consiguiente,

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = Blv \text{ sen } \alpha,$$

como se obtuvo anteriormente (véase la fórmula 12.4).

Si todo el circuito $MNCD$ se mueve en un campo magnético homogéneo conservando su orientación respecto del vector \vec{B} , la f.e.m. en el circuito será nula, ya que el flujo Φ a través del área limitada por el circuito no varía. Esto se explica como sigue. Al moverse el circuito, en los conductores MN y CD aparecen fuerzas (12.3) que actúan sobre los electrones en el sentido de N a M y de C a D . El trabajo total de estas fuerzas cuando el circuito es recorrido en el sentido de las agujas del reloj o al contrario es nulo.

¿ ?

1. ¿Cuál es la naturaleza de las fuerzas exteriores que hacen que aparezca la corriente inducida en un conductor en reposo?
2. ¿En qué difiere el campo rotacional eléctrico del electrostático o estacionario?
3. ¿Cuál es la naturaleza de las fuerzas exteriores que hacen que aparezca la corriente inducida en un circuito en movimiento?

12.6. Autoinducción. Inductancia

AUTOINDUCCIÓN. Si por una bobina pasa corriente alterna, el flujo magnético que atraviesa la bobina varía. Por eso se produce una f.e.m. de inducción en el mismo conductor por el cual pasa la corriente alterna. Este fenómeno se llama **AUTOINDUCCIÓN**. En la autoinducción el circuito conductor desempeña dos papeles: por él pasa la corriente que produce la inducción, y en él mismo aparece la f.e.m. inducida. *El campo magnético variable induce f.e.m. en el mismo conductor por el cual pasa la corriente creadora de dicho campo.*

Por la ley de Lenz, en el instante en que la corriente aumenta, la intensidad del campo rotacional eléctrico está dirigida en sentido contrario al de la corriente. Por lo tanto, en este instante el campo rotacional se opone al aumento de la corriente. Y al contrario, en el instante en que la corriente disminuye, el campo rotacional la mantiene.

Esto hace que cuando se cierra un circuito en el cual existe una f.e.m. constante, no se establece de inmediato un valor determinado de la intensidad de la corriente, sino poco a poco, en el transcurso del tiempo (fig. 251). Por otra parte, cuando se desconecta la fuente, la corriente en los circuitos cerrados no cesa en el mismo instante. La f.e.m. de autoinducción puede ser mayor que la de la fuente, ya que la variación de la corriente y de su campo magnético al desconectar la fuente se produce con mucha rapidez.

El fenómeno de la autoinducción puede observarse en experimentos simples. La fig. 252 muestra el esquema de una conexión en paralelo de dos lámparas iguales. Una de ellas se conecta a la fuente a través de la resistencia R , y la otra, en serie con la bobina L provista de núcleo de hierro.

Cuando se cierra el conmutador, la primera lámpara se enciende

Fig. 251

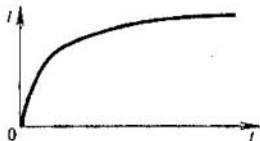


Fig. 252

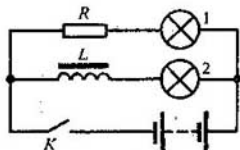
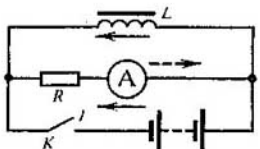


Fig. 253



prácticamente en el acto, y la segunda, con un retraso apreciable. La f.e.m. autoinducida en el circuito de esta lámpara es grande y la intensidad de la corriente no alcanza inmediatamente su valor máximo.

El esquema de un circuito que permite observar la aparición de la f.e.m. autoinducida al desconectarlo se da en la fig. 253. Cuando se abre el conmutador K , en la bobina L se produce una f.e.m. autoinducida que mantiene la corriente inicial. Como resultado, en el instante de la apertura, a través del galvanómetro pasa corriente (flecha de trazos) en sentido contrario al de la corriente inicial, de antes de la apertura del circuito (flecha llena). La intensidad de la corriente al abrir el circuito puede ser mayor que la de la corriente que pasaba por el galvanómetro cuando el conmutador K estaba cerrado. Esto significa que $\mathcal{E}_{ai} > \mathcal{E}$ de la batería de pilas.

ANALOGÍA ENTRE LA AUTOINDUCCIÓN Y LA INERCIA. El fenómeno de la autoinducción es semejante al de la inercia en la mecánica. Así, la inercia hace que bajo la acción de una fuerza el cuerpo adquiera una velocidad determinada no inmediatamente, sino poco a poco. El cuerpo tampoco se puede frenar instantáneamente, por muy grande que sea la fuerza que lo frene. Del mismo modo, a causa de la autoinducción, al cerrar el circuito la intensidad de la corriente no adquiere en el acto un valor determinado, sino que va aumentando poco a poco. Y cuando la fuente se desconecta, la corriente no se interrumpe inmediatamente. La autoinducción la mantiene cierto tiempo a pesar de la resistencia del circuito.

Para aumentar la velocidad de un cuerpo, de acuerdo con las leyes de la mecánica, hay que realizar trabajo. Cuando se frena, el cuerpo mismo realiza trabajo. Del mismo modo, para crear la corriente hay que realizar trabajo contra el campo rotacional eléctrico, y cuando la corriente desaparece, este mismo campo realiza trabajo positivo.

INDUCTANCIA. El módulo B de la inducción magnética creada por una corriente es proporcional a la intensidad de dicha corriente. Como el flujo magnético Φ es proporcional a B , será $\Phi \sim B \sim I$.

Por consiguiente, se puede afirmar que

$$\Phi = LI, \quad (12.5)$$

siendo L el coeficiente de proporcionalidad entre la intensidad de la corriente en el circuito conductor y el flujo magnético creado por ella que atraviesa dicho circuito. La magnitud L recibe el nombre de **INDUCTANCIA DEL CIRCUITO O DE COEFICIENTE DE AUTOINDUCCIÓN DEL MISMO**.

Utilizando la ley de la inducción electromagnética y la expresión (12.5), se obtiene la igualdad

$$\mathcal{E}_{ai} = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}, \quad (12.6)$$

suponiendo que la forma del circuito permanece invariable y que el flujo sólo varía a expensas de la variación de la corriente.

De la fórmula (12.6) se deduce que la inductancia es una magnitud física numéricamente igual a la f.e.m. de autoinducción que se produce en el circuito cuando la intensidad de la corriente varía 1 A en 1 s.

La inductancia, como la capacidad eléctrica, depende de los factores geométricos, es decir, de las dimensiones del conductor y de su forma, pero no depende directamente de la intensidad de la corriente en él. Además de la geometría, la inductancia depende de las propiedades magnéticas del medio en que se encuentra el conductor.

La unidad de inductancia en el SI se llama henrio (H). La inductancia de un conductor es igual a 1 H si, cuando la intensidad de la corriente varía 1 A en 1 s, se produce en él una f.e.m. autoinducida de 1 V:

$$1 \text{ H} = \frac{1 \text{ V}}{1 \frac{\text{A}}{\text{s}}} = 1 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A}}$$

12.7. Energía del campo magnético de una corriente

Hallemos la energía que posee la corriente eléctrica en un conductor. De acuerdo con la ley de conservación de la energía, la energía de la corriente es igual a la que debe gastar la fuente (pila, generador de la central eléctrica u otra) en crear la corriente. Cuando ésta cesa, la misma energía se desprende de una u otra forma.

Si se cierra un circuito que tenga una f.e.m. constante, la energía de la fuente se gasta al principio en crear la corriente, es decir, en poner en movimiento los electrones del conductor, en generar el campo magnético ligado con la corriente y, parcialmente, en aumentar la energía interna del conductor, o sea, en calentarlo. Una vez que se establece el valor constante de la intensidad de la corriente, la energía de la fuente sólo se gasta en el desprendimiento de calor. En estas condiciones la energía de la corriente ya no varía.

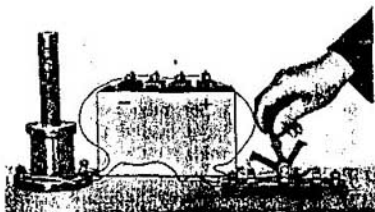


Fig. 254

Exactamente lo mismo, para hacer que un automóvil adquiriera en un trozo horizontal de carretera una velocidad constante v , hay que realizar el trabajo $mv^2/2$. Al principio parte de la potencia del motor se gasta en vencer el rozamiento y parte en aumentar la velocidad del vehículo. Cuando $v = \text{const}$ toda la potencia del motor se gasta en vencer el rozamiento, mientras que la energía cinética del automóvil no varía.

Aclaremos ahora por qué, para crear la corriente, es necesario gastar energía, o sea, hay que realizar trabajo. Esto se explica porque, al cerrar el circuito, cuando la corriente empieza a aumentar en el conductor aparece un campo rotacional eléctrico de sentido opuesto al campo eléctrico ¹⁾ que crea en el conductor la fuente de corriente. Para que la intensidad de la corriente se haga igual a I , la fuente de corriente debe realizar trabajo contra el campo rotacional. Este trabajo se invierte en aumentar la energía del campo magnético de la corriente.

Cuando se abre el circuito, la corriente desaparece y el campo rotacional realiza trabajo positivo. La energía acumulada por la corriente se libera. Esto se manifiesta por medio de la potente chispa que se produce cuando se abre un circuito con gran inductancia (fig. 254).

La expresión de la energía de la corriente I , que pasa por un circuito con inductancia L , se puede escribir basándose en la analogía entre la inercia y la autoinducción, de la cual se habló en el 12.6.

Si la autoinducción es análoga a la inercia, en el proceso de creación de la corriente la inductancia debe desempeñar el mismo papel que la masa cuando, en mecánica, aumenta la velocidad del cuerpo. Las veces de la velocidad del cuerpo las hace, en electrodinámica, la intensidad de la corriente I , como magnitud que caracteriza el movimiento de las cargas eléctricas.

Siendo esto así, la energía de la corriente W_m se puede considerar como una magnitud semejante a la energía cinética del cuerpo $mv^2/2$ en mecánica y escribirla en la forma

¹⁾ Este campo eléctrico lo crean las partículas cargadas que hay en la superficie del conductor, a diferencia del campo rotacional, que es generado por el campo magnético variable.

$$W_m = \frac{LI^2}{2}. \quad (12.7)$$

Esta expresión de la energía de la corriente es la que se obtiene precisamente como resultado de los cálculos.

La energía de la corriente (12.7) se expresa por medio de la característica geométrica L del conductor y de la intensidad de la corriente I que pasa por él. Pero se puede expresar también por medio de las características del campo. Los cálculos muestran que la densidad de la energía del campo magnético (es decir, la energía por unidad de volumen) es proporcional al cuadrado de la inducción magnética, de un modo semejante a como la densidad del campo eléctrico es proporcional al cuadrado de la intensidad del campo eléctrico.

¿ ?

1. ¿A qué se da el nombre de autoinducción?
2. ¿Qué sentido, respecto del de la corriente, tiene el campo rotacional eléctrico en un conductor cuando la intensidad de la corriente aumenta y cuando disminuye?
3. ¿A qué se llama inductancia de un conductor?
4. ¿En qué unidades se mide la inductancia?
5. ¿A qué es igual la f.c.m. de autoinducción?
6. ¿Por qué, para crear una corriente, la fuente tiene que gastar energía?
7. ¿A qué es igual la energía de la corriente eléctrica?

12.8. Leyes fundamentales de la electrodinámica y su aplicación técnica

Las numerosísimas aplicaciones técnicas de la electrodinámica se basan en primer lugar en que la energía eléctrica es fácil de transmitir por conductores a grandes distancias, de distribuir entre los consumidores y, lo que es lo principal, de transformar, por medio de dispositivos relativamente sencillos, en otras formas cualesquiera de la energía: mecánica, interna, luminosa, etc.

La energía eléctrica se produce en centrales térmicas, hidráulicas y atómicas. Después, por líneas de transporte de centenares y millares de kilómetros llega a las empresas industriales, a los medios de transporte (de tracción eléctrica) y a las casas, donde sirve para el alumbrado y para accionar los aparatos electrodomésticos: refrigeradores, lavadoras, maquinillas de afeitarse, receptores de radio, tocadiscos, magnetófonos, televisores, etc. Los enchufes eléctricos en las paredes de los apartamentos son hoy un elemento tan habitual del hombre moderno que ya no reparamos en sus extraordinarias posibilidades.

La creación de las potentes centrales eléctricas, que producen energía barata, y del gran número de aparatos que la consumen, fue posible en virtud de nuestros conocimientos de las leyes de la electrodinámica. El descubrimiento de la ley de la inducción electromagnética y de otras leyes de la electrodinámica relacionó inesperadamente la teoría con una enorme cantidad de aplicaciones prácticas.

El funcionamiento de todos los generadores de las centrales eléctricas se basa en la ley de la inducción electromagnética. Al principio descubrió Faraday una corriente, apenas perceptible, en una bobina, cuando ésta se movía cerca de un imán. "¿Para qué sirve esto?" -le preguntaron a Faraday. "¿Para qué puede servir un recién nacido?" -respondió éste. Pero transcurrió poco más de medio siglo y, como dijo el físico norteamericano R. Feynman, "el inútil recién nacido se ha convertido en hércules asombroso que ha transformado la faz de la Tierra de tal modo, que su eminente progenitor ni podía haberse imaginado".

En vez de la simple bobina y el imán, el generador moderno es una imponente construcción de cables de cobre, hierro, materiales aislantes y estructuras de acero. Aunque miden varios metros, las piezas más importantes de los generadores se fabrican con la exactitud de hasta un milímetro. En la naturaleza no existe otro conjunto de partes móviles que pueda generar energía eléctrica tan continua y económicamente.

La energía eléctrica procedente de las centrales se transforma y divide en partes por medio de dispositivos basados también en la inducción electromagnética. Estos dispositivos son los llamados transformadores, constituidos por dos bobinas montadas sobre un núcleo de hierro¹¹. Gran parte de esta energía va a parar a los motores eléctricos, que pueden ser desde los enormes motores que mueven los trenes de laminación, hasta los diminutos que accionan las maquinillas de afeitar. Los motores eléctricos, lo mismo que los generadores, son máquinas técnicamente perfectas, que funcionan durante mucho tiempo sin fallos y muy económicamente. El funcionamiento de los motores eléctricos se basa en la ley de Ampère, sin cuyo conocimiento es imposible diseñarlos y construirlos.

Una parte considerable de la energía se gasta en calentar conductores. Esta acción de la corriente se utiliza mucho en la metalurgia, para tratar los metales, en la soldadura eléctrica y en otros menesteres. En las lámparas de incandescencia la corriente eléctrica calienta hasta altas temperaturas los finos filamentos de volframio. De base para el cálculo de los aparatos de caldeo sirve la ley de Joule-Lenz, descubierta cuando nadie soñaba aún con emplear la corriente eléctrica en fines prácticos.

Desconociendo la ley de Ohm, que define la intensidad de la corriente, es imposible calcular un circuito eléctrico o construir bien cualquier aparato eléctrico, ya que precisamente de la intensidad de la corriente dependen las acciones mecánicas, térmicas y químicas de la corriente.

Los generadores, que producen la energía eléctrica, y los aparatos que consumen esta energía deben hacerlo muy económicamente. Toda pérdida superflua es intolerable. La pérdida de un solo tanto por ciento de energía eléctrica en la URSS no es una minucia, sino una enorme pérdida.

Las manifestaciones más complejas y delicadas de las leyes de la electrodinámica se aplican en radiotecnica para transmitir la palabra, la

¹¹ La corriente eléctrica que producen las centrales y que llega a los consumidores no es continua, sino alterna. La corriente alterna se estudiará detalladamente en el curso de "Física 4".

música y las imágenes a distancia, así como en las máquinas calculadoras ultrarrápidas y en los dispositivos automáticos de extraordinaria exactitud y fiabilidad. De esto se tratará en el curso de "Física 4".

Ejemplos de resolución de problemas

Para resolver los problemas concernientes al material de este capítulo hay que saber determinar el sentido de la corriente de inducción por medio de la ley de Lenz. La f.e.m. inducida se calcula valiéndose de la ley de la inducción electromagnética (12.2) o (en el caso de un conductor que se mueva en un campo magnético) de la fórmula (12.4). La f.c.m. de autoinducción se calcula por la fórmula (12.6), y la energía de la corriente, por la (12.7). Para resolver algunos problemas hay que utilizar la fuerza de Ampère (11.4).

1. Un circuito rectangular $ABCD$ (fig. 255) se traslada en el campo magnético de la corriente que pasa por un conductor rectilíneo largo. Determinar el sentido de la corriente inducida en el circuito si éste se aleja del conductor. ¿Qué fuerzas actúan sobre el cuadro?

Solución. Cuando el circuito se mueve en el sentido indicado, el flujo magnético a través del área $ABCD$ disminuye. Por consiguiente, en dicho circuito se establece una corriente que, de acuerdo con la ley de Lenz, estará dirigida en el sentido de las agujas del reloj. Precisamente cuando la corriente tiene este sentido su flujo magnético se suma al flujo creado por la corriente que pasa por el conductor rectilíneo.

La interacción de la corriente en el circuito con la corriente rectilínea hace que se produzcan fuerzas que actúan sobre los conductores del circuito. Aplicando la regla de la mano izquierda puede hallarse que estas fuerzas, primero, estiran el cuadro, tendiendo a aumentar su área, y, segundo, crean una fuerza resultante dirigida hacia el conductor rectilíneo. Ambas acciones "tenden" a impedir que disminuya el flujo magnético a través del circuito.

2. Una bobina de N espiras, de área S cada una, está conectada a un galvanómetro balístico. (El galvanómetro balístico mide la carga eléctrica que pasa por él.) La resistencia de todo el circuito es R . Al principio la bobina se encontraba entre los polos de un imán en la región en que el campo magnético es homogéneo

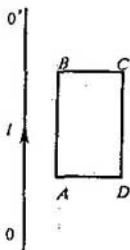


Fig. 255

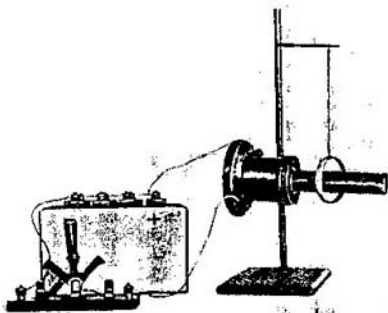


Fig. 256

y la inducción del campo \vec{B} es perpendicular a las espiras de la bobina. Después se desplazó la bobina hacia el espacio en que el campo magnético está ausente. ¿A qué es igual la carga que pasó por el galvanómetro?

Solución. De acuerdo con la ley de la inducción magnética y con la ley de Ohm, la carga que pasó por el galvanómetro es:

$$\Delta q = I \Delta t = \frac{\mathcal{E}}{R} \Delta t = -\frac{1}{R} \Delta \Phi = -\frac{\Phi - \Phi_0}{R}.$$

Aquí $\Phi_0 = BSN$ es el flujo magnético inicial, y $\Phi = 0$, el flujo magnético final. Por lo tanto,

$$\Delta q = \frac{BSN}{R}.$$

Ejercicio
15

1. El conmutador (en el esquema de la fig. 238) acaba de cerrarse. La corriente en la bobina inferior tiene sentido contrario al de las agujas del reloj, si se mira desde arriba. ¿Qué sentido tendrá la corriente en la bobina superior si permanece en reposo?
2. El imán (fig. 240, b) se saca de la bobina. Determinar el sentido de la corriente inducida en ella.
3. Determinar el sentido de la corriente inducida en el anillo cerrado (fig. 242) cuando el imán se aproxima a él.
4. En el conductor OO' (fig. 255) la intensidad de la corriente disminuye. Hallar el sentido de la corriente inducida en el circuito $ABCD$ y el de las fuerzas que actúan sobre cada uno de sus lados.
5. Un anillo metálico (fig. 256) puede moverse libremente por el núcleo de una bobina conectada a un circuito de corriente continua. ¿Qué ocurrirá en los instantes en que el circuito se abra y se cierre?
6. La intensidad de la corriente en una bobina aumenta de un modo directamente proporcional al tiempo. ¿Qué carácter tendrá la dependencia de la intensidad de la corriente respecto del tiempo en otra bobina ligada por inducción con la primera?
7. ¿En qué caso las oscilaciones de la aguja de un aparato magnetoeléctrico se amortiguan más pronto: cuando sus bornes están cortocircuitados o cuando están abiertos?
8. El flujo magnético a través de un circuito conductor, de resistencia

igual a $3 \cdot 10^{-2} \Omega$, en 2 s varía $1,2 \cdot 10^{-2}$ Wb. ¿Cuál es la intensidad de la corriente que pasa por el conductor si la variación del flujo es uniforme?

9. Un avión vuela horizontalmente con la velocidad de 900 km/h. Hallar la diferencia de potencial que se produce entre los extremos de sus alas si el módulo de la componente vertical de la inducción del campo magnético de la Tierra es igual a $5 \cdot 10^{-5}$ T y la envergadura de las alas es de 12 m.
10. En una bobina de 0,15 H de inductancia y resistencia r muy pequeña se establece una corriente de 4 A de intensidad. A esta bobina se conecta en paralelo una resistencia $R \gg r$. ¿Qué cantidad de calor se desprenderá en la bobina y en la resistencia R cuando la fuente de corriente se desconecte rápidamente?

Breve resumen del capítulo XII

El fenómeno de la inducción electromagnética, descubierto por Faraday, consiste en que cuando el flujo magnético a través del área limitada por un circuito cerrado varía, en dicho circuito se produce una f.e.m. inducida. Este fenómeno sirve de base para el funcionamiento de los generadores de todas las centrales eléctricas del mundo. De acuerdo con la ley de la inducción electromagnética, la f.e.m. inducida en un circuito cerrado es igual a la velocidad con que varía el flujo magnético, tomado con signo menos:

$$\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

Aquí $\Phi = B_n S$ es el flujo de inducción magnética a través del área S del circuito; B_n , la proyección del vector inducción magnética sobre la normal al circuito. El signo menos está condicionado por la ley de Lenz, que determina el sentido de la corriente inducida: el sentido de la corriente inducida en un circuito cerrado es tal, que el flujo magnético creado por ella a través del área limitada por el circuito, tiende a compensar la variación del flujo magnético que origina dicha corriente.

En un conductor en reposo la fuerza exterior, que actúa sobre las cargas, es el campo rotacional eléctrico que genera el campo magnético variable. En un circuito en movimiento la fuerza exterior es la fuerza magnética de Lorentz, que actúa sobre las partículas cargadas que se mueven junto con el conductor.

Un caso particular importante de inducción electromagnética es la autoinducción. En la autoinducción el campo magnético variable induce f.e.m. en el mismo conductor por el cual pasa la corriente que crea dicho campo.

La f.e.m. de autoinducción es directamente proporcional a la velocidad con que varía la intensidad de la corriente en el conductor:

$$\mathcal{E}_{ai} = - L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

El coeficiente de proporcionalidad L recibe el nombre de inductancia. La inductancia depende de las dimensiones y de la forma del conductor

y también de las propiedades del medio en que éste se encuentra. La inductancia se mide en H: $1 \text{ H} = 1 \text{ V} \cdot \text{s}/\text{A}$.

La energía del campo magnético $W_m = LI^2/2$ es igual al trabajo que debe realizar la fuente para crear la corriente dada.

Conclusión

El estudio de la electrodinámica no termina con el del fenómeno de la inducción electromagnética. Hasta ahora sólo hemos considerado los fenómenos electromagnéticos en el caso de las cargas eléctricas en reposo (campo eléctrico constante) y de las cargas que se mueven con velocidad constante (campo magnético constante). Únicamente en el capítulo "Inducción electromagnética" hemos empezado a conocer el campo electromagnético variable con el tiempo. Nos queda por estudiar la rama más amplia, interesante y de mayor importancia práctica de los fenómenos electromagnéticos variables y rápidamente variables.

En "Física 4", apoyándonos en el conocimiento de las leyes fundamentales de la electrodinámica que ya se han estudiado, se darán a conocer, primero, las propiedades, la obtención y la utilización de la corriente eléctrica alterna. Luego se estudiará otra propiedad fundamental del campo eléctrico, la generación del campo magnético por un campo eléctrico alterno (fenómeno inverso al de la inducción electromagnética). Después se pasará a conocer los campos electromagnéticos rápidamente variables y las ondas electromagnéticas. Sólo entonces se podrá dar por terminado el estudio elemental de la electrodinámica y será posible formarse, en rasgos generales, una idea completa de los procesos electromagnéticos que se desarrollan en la naturaleza.

Trabajos de laboratorio

1. Confirmación experimental de la ley de Boyle-Mariotte

Aparatos y materiales: un tubo de vidrio de 300 a 350 mm de longitud y 8 ó 10 mm de diámetro, soldado por uno de sus extremos; un recipiente cilíndrico (de 40 a 50 mm de diámetro y 350 ó 400 de longitud o un tubo de vidrio cerrado por abajo con un tapón); una regla graduada en milímetros; un soporte y un barómetro (uno para toda la clase).

INDICACIONES SOBRE CÓMO HACER EL TRABAJO. 1. Sujetar el recipiente cilíndrico en el soporte y llenarlo de agua.

2. Medir con el barómetro la presión atmosférica.

3. Medir el volumen del aire que hay en el tubo de vidrio (en unidades convencionales, por las divisiones de la regla).

4. Hallar el producto de la presión del aire por su volumen.

5. Introducir el tubo de vidrio en el agua, con el extremo soldado hacia arriba.

6. Medir de nuevo el volumen de aire que hay en el tubo.

7. Medir la diferencia de los niveles del agua en el recipiente y en el tubo.

8. Calcular la nueva presión del aire en el tubo.

9. Calcular el producto de esta presión del aire por su volumen.

10. Repetir el experimento varias veces.

11. Anotar los resultados de las mediciones en la tabla.

Nº del experimento	Presión p	Volumen V	Producto pV

Comparar los resultados obtenidos y cerciorarse de que la ley de Boyle-Mariotte es correcta.

2. Determinación del coeficiente de tensión superficial de los líquidos

Aparatos y materiales: una balanza con pesas, un vaso, un soporte, una probeta con arena, un pie de rey o una regla graduada en milímetros, una hoja de papel y un alambre o un cuadro de alambre suspendido por hilos (fig. 257).

INDICACIONES SOBRE CÓMO HACER EL TRABAJO. 1. Sujetar la balanza en la pinza del soporte.

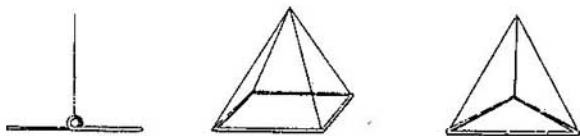


Fig. 257

2. Atar a uno de los platillos de la balanza el hilo del que pendió el alambre o el cuadro y equilibrarlo con arena (la arena echarla sobre la hoja de papel colocada en el otro platillo).

3. Hacer que el alambre o el cuadro se halle en posición horizontal.

4. Debajo del platillo colocar el vaso con agua destilada, de tal modo que la superficie del agua se encuentre a 1 ó 2 cm de distancia del alambre.

5. Bajar con precaución el alambre o el cuadro, de manera que una vez que toque la superficie del agua se "pegue" a ella.

6. Añadir, con mucho cuidado, arena al platillo hasta que el alambre o el cuadro se "despegue" de la superficie del agua.

7. Secar el alambre o el cuadro con papel de filtro y volver a equilibrar la balanza, pero ahora con pesas.

8. Medir con el pie de rey o con la regla graduada la longitud del alambre (o el perímetro del cuadro).

9. Calcular el coeficiente de tensión superficial del agua por la fórmula

$$\sigma = \frac{mg}{2l},$$

en la que m es la masa de las pesas; g , la aceleración de caída libre; l , la longitud del alambre o el perímetro del cuadro.

10. Repetir la medición varias veces y hallar el valor medio del coeficiente de tensión superficial. Comparar el resultado con el valor que dan las tablas.

3. Determinación del módulo de elasticidad de la goma

Aparatos y materiales: un soporte, un platillo de tribómetro de laboratorio, pesas, un pie de rey o un micrómetro, una regla graduada en milímetros y dos cordones de goma de secciones distintas y de aproximadamente 40 cm de longitud.

INDICACIONES SOBRE CÓMO HACER EL TRABAJO. 1. Colgar uno de los cordones de goma del extremo del soporte.

2. Sujetar en el extremo inferior del cordón el platillo para las pesas.

3. Trazar en la parte media del cordón, con lápiz o con tinta, dos rayas a 20 cm de distancia, aproximadamente, una de otra.

4. Medir la distancia inicial l_0 entre dichas rayas.

5. Medir el diámetro del cordón entre las rayas (sin apretar la goma) y calcular el área S de su sección transversal.

6. Cargar el platillo con pesas, escribir su peso F y, después de esperar hasta que termine de estirarse el cordón, medir la distancia l entre las rayas.

7. Hacer lo mismo aumentando paulatinamente la carga hasta el máximo y disminuyéndola después. Para cada carga determinar el alargamiento absoluto $\Delta l = l - l_0$ de la goma.

8. Anotar los resultados de las mediciones en la tabla:

Área de la sección transversal del cordón, S , m ²	Fuerza deformadora (carga) F , N	Longitud del cordón (entre las rayas), m		Alargamiento absoluto Δl de la parte del cordón (entre las rayas), m		
		incrementando la carga	disminuyendo la carga	incrementando la carga	disminuyendo la carga	medio

9. Con los datos obtenidos construir la gráfica tensión-deformación de la goma, trazando el módulo F de la fuerza sobre el eje vertical y el alargamiento absoluto Δl , sobre el horizontal. Sacar la conclusión acerca de la dependencia entre estas magnitudes.

10. Calcular el módulo de elasticidad E de la goma por la fórmula

$$E = \frac{l_0 F}{\Delta l \cdot S}$$

para dos valores del módulo de la fuerza (dentro de los límites del tramo rectilíneo de la gráfica) y hallar el valor medio de E .

11. Repetir el experimento con el otro cordón, de distinta sección, y determinar otra vez el módulo de elasticidad de la goma para los mismos valores de la fuerza.

4. Determinación de la f.e.m. y la resistencia interna de una fuente de corriente

Aparatos y materiales: una fuente de corriente (acumulador o pila de linterna de bolsillo), un reóstato, un amperímetro, un voltímetro, un interruptor y cables de conexión.

INDICACIONES SOBRE CÓMO HACER EL TRABAJO. 1. Montar el circuito conectando en serie la pila, el reóstato, el amperímetro y el interruptor.

2. Conectar el voltímetro a los bornes de la pila.

3. Medir la intensidad de la corriente en el circuito y la tensión en su parte exterior.

4. Por medio del reóstato variar la resistencia del circuito y medir de nuevo la intensidad de la corriente y la tensión.

5. Anotar los resultados de las mediciones en la tabla:

Intensidad de la corriente I , A	Tensión U , V	F.e.m. \mathcal{E} , V	Resistencia interna de la fuente r , Ω

6. Aplicando dos veces la ley de Ohm para un circuito cerrado $I = \mathcal{E}/(R + r)$, determinar la resistencia interna y la f.e.m. de la fuente de corriente por los datos de las mediciones de la intensidad de la corriente y de la tensión. Hallar la resistencia del reóstato en cada una de las mediciones.

7. Abrir el circuito y medir la f.e.m. de la pila. Comparar el valor calculado de la f.e.m. con el medido.

5. Determinación de la resistividad de un conductor

Aparatos y materiales: un amperímetro, un voltímetro, una cinta métrica, un pie de rey, una batería de acumuladores, un alambre de fechal de 65 a 70 cm de longitud y 0,5 mm de diámetro con terminales metálicos, un interruptor y cables de conexión.

INDICACIONES SOBRE CÓMO HACER EL TRABAJO. 1. Medir con la cinta la longitud del alambre, es decir, la distancia entre los terminales metálicos.

2. Medir el diámetro del alambre y calcular el área de su sección transversal.

3. Montar el circuito conectando en serie la batería de acumuladores, el alambre de fechal, el amperímetro y el interruptor.

4. Conectar el voltímetro en paralelo al alambre.

5. Cerrar el interruptor, medir la intensidad de la corriente en el circuito y la tensión en los extremos del alambre.

6. Aplicando la ley de Ohm, calcular la resistencia del alambre.

7. Calcular la resistividad del fechal por la fórmula

$$\rho = \frac{RS}{l},$$

en la que R es la resistencia del alambre; S , el área de su sección transversal, y l , su longitud.

6. Determinación del equivalente electroquímico del cobre

Aparatos y materiales: una balanza con pesas, un amperímetro, un reloj, un hornillo eléctrico, una batería de acumuladores, un reóstato, un conmutador, electrodos de cobre, un recipiente cilíndrico, una solución de sulfato cúprico (vitriolo azul) y cables de conexión.

INDICACIONES SOBRE CÓMO HACER EL TRABAJO. 1. Pesar cuidadosamente el electrodo de cobre que va a servir de cátodo.

2. Montar el circuito conectando en serie la batería, el amperímetro, el reóstato, el recipiente con la solución de sulfato cúprico, en la cual están sumergidos los electrodos, y el conmutador.

3. Cerrar el conmutador y anotar la hora a que empieza el experimento.

4. Conservando invariable, con ayuda del reóstato, la intensidad de la corriente, efectuar durante 15 ó 20 min la electrólisis de la solución.

5. Desconectar la corriente, sacar el electrodo (cátodo), lavarlo con agua.

(preferiblemente destilada) y luego secarlo sobre el hornillo eléctrico. Volver a pesar cuidadosamente la placa catódica.

6. Aplicando la ley de Faraday para la electrólisis, determinar el equivalente electroquímico del cobre.

7. Observación de cómo actúa el campo magnético sobre la corriente

Aparatos y materiales: una batería de acumuladores, un imán en herradura, un soporte, un conmutador, una madeja de alambre y cables de conexión.

INDICACIONES SOBRE CÓMO HACER EL TRABAJO. 1. Colgar del soporte la madeja de alambre y, a través del conmutador, conectarla con la batería.

2. Acercar a la madeja colgante el imán y, cerrando el circuito, observar cómo se mueve aquélla.

3. Elegir unas cuantas variantes características de la disposición relativa de la madeja y el imán y dibujarlas, indicando el sentido del campo magnético, el sentido de la corriente y el movimiento que se supone ha de tener la madeja.

4. Comprobar experimentalmente la exactitud de las suposiciones acerca del carácter y del sentido del movimiento de la madeja.

8. Estudio del fenómeno de la inducción electromagnética

Aparatos y materiales: un miliamperímetro, una batería de acumuladores, unas bobinas con núcleos, un imán en herradura, un conmutador y cables de conexión.

INDICACIONES SOBRE CÓMO HACER EL TRABAJO. 1. Conectar los bornes del miliamperímetro a los de una de las bobinas.

2. Acercar el núcleo a uno de los polos del imán en herradura e introducirlo en la bobina, observando al mismo tiempo la aguja del miliamperímetro.

3. Repetir la observación sacando el núcleo de la bobina, y también cambiando los polos del imán.

4. Dibujar el esquema del experimento y cerciorarse de que se cumple la ley de Lenz en cada caso.

5. Colocar la segunda bobina junto a la primera de modo que sus ejes coincidan.

6. Introducir en ambas bobinas núcleos de hierro y conectar la segunda bobina, a través del conmutador, con la batería.

7. Cerrando y abriendo el conmutador, observar cómo se desvía la aguja del miliamperímetro.

8. Dibujar el esquema del experimento y cerciorarse de que se cumple la ley de Lenz.

Respuestas a los ejercicios

Ejercicio 1. 1. No más de 12 m^2 . 2. $\approx 5 \cdot 10^5$. 3. $0,002 \text{ kg/mol}$; $0,004 \text{ kg/mol}$. 4. Dos veces. 5. $\approx 0,056 \text{ mol}$. 6. $\approx 1,88 \cdot 10^{23}$. 7. $\approx 47,65 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$. 8. $\approx 8,5 \cdot 10^{28}$. 9. $\approx 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3$. 10. Disminuye tres veces. 11. $5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. 12. $6 \cdot 10^{-21} \text{ J}$. 13. $4,9 \cdot 10^5 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

Ejercicio 2. 1. $2,76 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}_{\text{nuevo}}$. 2. $\approx 6 \cdot 10^{-21} \text{ J}$. 3. $\approx 3,14 \cdot 10^4$. 4. Más moléculas hay en el aire. 5. $5,3 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$. 6. $\approx 0,5\%$.

Ejercicio 3. 1. 12 kPa . 2. 20. 4. 250 K . 6. $\approx 0,0224 \text{ m}^3/\text{mol}$. 8. $\approx 5,8 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$. 9. $\approx 0,15 \text{ m}^3$. 10. $\approx 0,49 \text{ kg/m}^3$. 13. 1,7 veces.

Ejercicio 4. 1. Aumenta 1,5 veces. 2. $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$. 3. Disminuirá. 4. $\approx 34,4 \text{ J}$. 8. $2 \cdot 10^5 \text{ J}$. 9. $1,25 \cdot 10^6 \text{ J}$. 10. 20 J. 12. $\approx 10 \text{ K}$. 13. $\approx 37,3^\circ\text{C}$. 14. $\approx 0,033 \text{ kg}$. 15. 0°C . 16. 1500 K . 17. 20% ; $\approx 42\%$.

Ejercicio 5. 4. $\approx 0,59 \text{ kg/m}^3$. 7. $\approx 58\%$. 8. $\approx 0,92 \text{ kg}$. 9. $\approx 0,21 \text{ kg}$.

Ejercicio 6. 4. $\approx 2,3 \cdot 10^{-5} \text{ N}$. 6. 800 kg/m^3 .

Ejercicio 7. 3. 8 mm^2 . 4. $\approx 1,9 \cdot 10^3 \text{ N}$. 5. $\approx 3,53 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. 6. $\approx 4200 \text{ m}$. 7. $4 \cdot 10^7 \text{ Pa}$; $2 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$. 8. $2/3$.

Ejercicio 8.3. $\approx 9,2 \cdot 10^{-8} \text{ N}$. 4. $\approx 2,3 \cdot 10^{39}$. 5. $\approx 2,3 \cdot 10^6$. 6. $\approx 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ N}$, la fuerza de atracción, y $\approx 6,9 \cdot 10^{-7} \text{ N}$, la fuerza de repulsión. 7. $\approx 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ N}$, dirigida hacia la segunda carga.

Ejercicio 9. 1. $\approx 1,5 \cdot 10^{-16} \text{ C}$; ≈ 950 electrones superfluos. 5. $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$; $-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. 6. $E = \sqrt{q_1^2 + q_1 q_2 + q_2^2 / 4\pi\epsilon_0 r^2}$; $\phi = (q_1 + q_2) / 4\pi\epsilon_0 r$. 8. 4000 V/m . 10. $-2,3 \cdot 10^3 \text{ V}$.

Ejercicio 10. 1. $\approx 0,1 \mu\text{F}$. 2. $\approx 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ C}$. 3. $\approx 1,7 \cdot 10^7 \text{ V/m}$. 4. $\approx 5,5 \text{ mm}$. 5. $U_1 = 180 \text{ V}$; $U_2 = 120 \text{ V}$. 6. $3 \cdot 10^{-7} \text{ C}$. 8. Disminuye 3 veces. 9. $\approx 4,4 \cdot 10^{-4} \text{ J/m}^3$.

Ejercicio 11. 3. $\approx 1,4 \text{ mm}^2$; $\approx 15,8 \text{ m}$. 4. Aumenta 25 veces. 5. 5000Ω . 6. $\approx 4,9 \times 10^{-4} \text{ m/s}$. 10. Dos veces menos; dos veces más. 11. $\approx 4,1 \text{ kW}$; $\approx 6,1 \text{ kW}$. 12. $\approx 97\%$; $\approx 1670 \text{ A}$.

Ejercicio 12. 2. 1200 A . 3. $3,7 \text{ V}$; $0,2 \Omega$. 4. $\approx 0,33 \text{ W}$. 6. $4,1 \text{ V}$; $2,4 \Omega$.

Ejercicio 13. 1. $\approx 2,9 \cdot 10^4 \text{ C}$. 2. $\approx 3,3 \cdot 10^{-7} \text{ kg/C}$. 4. $\approx 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$. 6. $\approx 1,33 \cdot 10^7 \text{ m/s}$; $\approx 4,19 \cdot 10^7 \text{ m/s}$.

Ejercicio 14. 3. $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}$. 4. $1,2 \cdot 10^{-2} \text{ J}$. 6. $R = mv \sin \alpha / |q| \cdot B$.

Ejercicio 15. 6. En la otra bobina, al cabo de cierto tiempo, se establece corriente continua. 8. $0,2 \text{ A}$. 9. $0,15 \text{ V}$. 10. $1,2 \text{ J}$.

Índice alfabético de nombres y materias

- Ampère, A. M.* 246
Amperímetro 177
Amperio 129
Anisotropía 103
Arco eléctrico 214
Autoinducción 270
Avogadro, A. 17
- Base (de un transistor) 230
Betatrón 268
Boltzmann, L. E. 42
Boyle, R. 53
Brown, R. 19
- Calor de fusión 68
-- vaporización 67
- específico de una sustancia 67
Campo eléctrico 135, 136
- electrostático 137
- magnético 236
- rotacional 241, 266
Cantidad de calor 66
-- sustancia 16
Capacidad eléctrica 162
-- de un condensador plano 164
Característica de un diodo 220
- tensión-intensidad 179
Carga del electrón 205
Carga eléctrica 121
- elemental 122
Cargas libres 141
Carnot, N. S. 78
Célula fotorresistente 233
Cero absoluto de temperatura 41
Coeficiente de temperatura de resistencia 182
-- tensión superficial 98
Colector (de un transistor) 231
Condensación 86
Condensador (eléctrico) 163
Conducción por electrones 199, 225
-- huecos 225
-- iones 202
- Conductibilidad de los gases 207
- eléctrica 199
- extrínseca (por impurezas) 226
Conductores 132
Constante de Avogadro 17
-- Boltzmann 41
-- Faraday 205
- universal de los gases 50
Corriente continua 176
- eléctrica 174
- inducida 260
Coulomb, Ch. A. 127
Cuadro (circuito) con corriente 237
Cuerpo amorfo 107
Cuerpo cristalino 103
- macroscópico 9
Culombio 129
- Charles, J. A.* 55
- Defectos de los cristales 106
Deformación por cizallamiento (o esfuerzo cortante) 109
-- compresión 109
-- flexión 111
-- torsión 111
-- tracción 109
Descarga en gas 206-208
- luminiscente 214
- por chispas 216
Diagrama de tensión-deformación 113
Dielectrico 145, 146
Diodo semiconductor 229
Dipolo 146
Disociación electrolítica 202
- Ecuación de balance térmico 73
-- estado 49
-- Mendeléiev-Clapeyron 51
- fundamental de la teoría cinético-molecular 32, 39
Efecto corona 216
Electrización de los cuerpos 122

- Electrodinámica 119
 Electrólisis 202
 Electrómetro 157
 Electrostática 121
 Emisión termoelectrónica 214
 Emisor (de un transistor) 230
 Energía cinética media 43
 - de campo eléctrico 168
 -- un gas perfecto 62
 - interna 61
 - potencial de un cuerpo cargado 150, 152
 Equilibrio térmico 36, 37
 Equivalente electroquímico 204
 Escala centígrada (de Celsius) 38, 41, 42
 - de Kelvin (absoluta) 41
 Espectrógrafo de masas 251
 Estado de equilibrio térmico 37

 Faradio 163
Faraday, M. 135, 136
 Fenómenos capilares 99
 - térmicos 10
 Ferromagnéticos, materiales 253
 Flujo magnético 244
 Fragilidad 115
Fränkel, J. I. 24
 Fuerza de Ampère 245
 -- interacción de las moléculas 20
 -- Lorentz 248
 -- tensión superficial 97
 - electromotriz (f.e.m.) 194
 Fuerzas exteriores 192
 Fusión 68

 Gas perfecto 26
Gay-Lussac, J. L. 54
 Generador magnetohidrodinámico (GMHD) 183

Helmholtz, H. 69
 Henrio 272
 Higrómetro 92
 Hipótesis de Ampère 252
 Huevo 225
 Humedad relativa 91

 Impurezasceptoras 227
 - donadoras 226, 227
 Inducción electromagnética 257, 258
 Inductancia 271
 Intensidad 137
 - de corriente 175

 Ionización de los gases 206
 Isobara 54
 Isócora 55
 Isoterma 53

Joule, J. P. 69, 188

 Kelvin 41
Kelvin, W. T. 41

Lenz, E. Ch. 88, 263
 Ley de Ampère 245-247
 -- Boyle-Mariotte 53
 Ley de conservación de la carga eléctrica 125
 ---- energía 68
 -- Coulomb 126, 128
 -- Charles 55
 -- Faraday 204
 -- Gay-Lussac 54
 -- Hooke 22, 113
 -- inducción electromagnética 263
 -- Joule-Lenz 188
 - (principio) de la termodinámica, primera 69
 ----, segunda 75
 -- Lenz 263
 -- Ohm para un circuito cerrado 194
 ---- trozo de circuito 179
 Líneas de fuerza de un campo eléctrico 139
 -- inducción magnética 240
Lomonósov, M. V. 11
Lorentz, H. A. 248

Mandelstam, L. I. 200
Mariotte, E. 53
 Masa de la molécula 16
 - molar 18
 - molecular relativa 16
Maxwell, J. C. 120, 135
Mayer, J. R. 69
Mendeléiev, D. I. 50, 51
 Módulo de Young 113
 Mol 17
 Molécula, dimensiones 13.
 -, velocidad media 44
 Monocristales 105
 Motor térmico 75
 Movimiento browniano 19
 - térmico 9, 28
Ohm, G. S. 180
Ohmio 181
 Oscilógrafo 222

- Parámetros macroscópicos 36
- Partículas elementales 122
 - ligadas 145
- Permeabilidad magnética 252
- Permitividad 148
- Plasma 216
- Plasmatrón 218
- Plasticidad 114
- Polarización 147
- Policristales 105
- Potencia de la corriente 189
- Potencial 152
- Presión de un gas 27
 - parcial 91
- Principio de superposición 138
- Proceso (transformación) adiabático 71
 - irreversible 73
 - isobárico 53, 71
- Proceso (transformación) isócoro 54, 70
 - isotérmico 52, 71
- Psicrómetro 93
- Punto de rocío 91

- Recombinación 207
- Regla de la mano izquierda 247, 249
- Rendimiento de los motores térmicos 78
- Resistencia 114
 - (eléctrica) 181
- Resistividad 181

- Semiconductores 199, 224
 - con unión p-n 228
- Shunt amperimétrico 186

- Stoliétov, A. G.* 254
- Superconductibilidad 183
- Superficies equipotenciales 156

- Temperatura 37
 - absoluta 41
 - crítica 90
- Tensión de un campo eléctrico 153
- Tensión mecánica (esfuerzo) 112
- Teoría cinético-molecular 11
- Termistores 232
- Termodinámica 12
- Termómetro 38
 - de resistencia 183
- Tesla 244

- Testa, N.* 244

- Trabajo de la corriente eléctrica 187
 - en termodinámica 63
- Transistor 230
- Tubo de rayos catódicos 222

- Unión directa (transistor) 228
 - inversa (transistor) 229

- Vacío 219
- Válvula diodo 219
- Vapor saturado 86
 - , presión (tensión) 87
- Vector inducción magnética 238

- Weberio 266