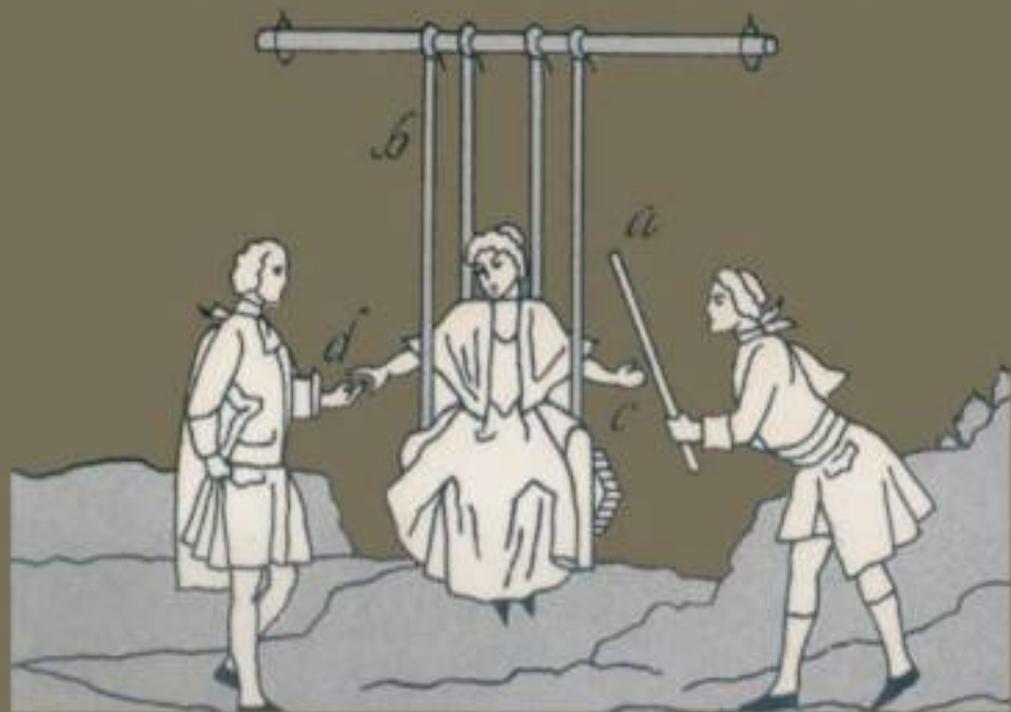


Física para Todos Libro 3

A. I. Kitaigorodski

ELECTRONES



Editorial MIR

Prefacio

El primer libro de la serie «Física para todos» dio a conocer al lector las leyes generales del movimiento de los macrocuerpos y las fuerzas de gravedad. El segundo libro estaba dedicado a la estructura molecular de la materia y al movimiento de las moléculas.

En el presente libro, en el tercero, centramos nuestra atención en examinar la estructura eléctrica de la materia, las fuerzas eléctricas y el campo electromagnético.

El siguiente libro, el cuarto, tratará de los fotones, la estructura del núcleo atómico y las fuerzas nucleares.

Los cuatro libros incluirán datos acerca de todos los conceptos y leyes fundamentales de la física. Los hechos concretos que estos libros exponen se han elegido de una forma tal que prevea la ilustración máximamente patente del contenido de las leyes físicas, la delineación de los métodos característicos para la física de analizar los fenómenos, el conocimiento de los caminos que seguía la física en el curso de su evolución y, finalmente, la demostración, a rasgos más generales, del hecho de que la física es el fundamento de todas las ciencias naturales y de la técnica.

La fisonomía de la física ha cambiado a ojos de una sola generación. Muchos de sus apartados se amplificaron transformándose en ramas independientes de enorme valor aplicado. Me permito sugerir que hoy en día uno no puede considerarse ingeniero erudito conociendo tan sólo los fundamentos de la física. Y la serie de libros con cuya ayuda los representantes de las más distintas profesiones podrán

formarse idea sobre los principios de la física y ponerse al tanto de las nuevas que tuvieron lugar en las ciencias físicas durante los últimos decenios, semejante serie, precisamente, debe convertirse en física para todos.

Una vez más hago recordar al lector que el libro que tiene entre las manos no es un manual sino un libro de divulgación científica. Cuando se trata de un manual el volumen concedido a tal o cual material viene condicionado por el grado de dificultad que representa su asimilación. Un libro de divulgación científica no se rige por esta regla y, por lo tanto sus diferentes páginas no se leen con la misma facilidad. Otra diferencia esencial radica en que en nuestros libros podemos permitirnos el lujo de exponer esquemáticamente una serie de apartados tradicionales, haciendo replegarse el viejo material para dar cabida al nuevo.

Ahora quiero referirme al libro «Electrones». La necesidad de hacer recordar las definiciones de los conceptos elementales mediante los cuales se describen los fenómenos eléctricos, esta necesidad me la he aprovechado en una forma algo peculiar, a saber: procurando dar a conocer al lector el enfoque fenomenológico de la física.

Dos capítulos de los seis están dedicados a la física aplicada. La electrotecnia se presenta en forma compendiada, ya que una descripción detallada de esta disciplina requiere recurrir a dibujos y esquemas. Esta es la razón de que estimamos posible limitarnos a la exposición solamente de los principios básicos de electrotecnia y de los importantes datos que cada uno es susceptible de saber.

Lo mismo atañe al capítulo consagrado a la radio. El pequeño volumen del libro dio la posibilidad de abordar tan

sólo la historia del problema y ofrecer una exposición somera de los fundamentos de radiotecnica.

Octubre de 1981

A. I. Kitaigorodski

Capítulo 1

Electricidad

Contenido:

- *Corriente eléctrica*
- *Electricidad inmóvil*
- *Campo eléctrico*
- *Que se debe tomar por base*
- *La evolución de una teoría de la electricidad*

Corriente eléctrica

Basándose en el ejemplo de la teoría de la electricidad es posible (y, también, se debe) dar a conocer al lector que muestra interés por la física el llamado enfoque fenomenológico del estudio de la naturaleza. La palabra «fenómeno» procede del griego «*phainomenon*» que significa «lo que aparece». En cuanto al enfoque de que se trata, éste consiste en lo siguiente. El investigador no se interesa por la «naturaleza de las cosas». Se vale de las palabras únicamente para contar sobre los hechos. La finalidad del investigador no es «explicar», sino tan sólo describir el fenómeno. Casi todos los términos que introduce tienen para él un sentido solamente en el caso de que sea posible indicar el método de evaluar mediante un número de tales o cuales conceptos. Recurre a algunas denominaciones auxiliares con el único fin de facilitar la exposición verbal de los hechos. Pero el papel que desempeñan estas denominaciones es absolutamente secundario: en lugar de las mismas hubiera sido posible proponer otros nombres o emplear «algo», o bien, «alguna cosa».

El método fenomenológico es de enorme importancia para las ciencias naturales. Y los fenómenos eléctricos, a las mil maravillas, pueden servir de ejemplo para que el lector comprenda la esencia de dicho método.

Al final de este capítulo relataré sucintamente cuál fue la secuencia en el desarrollo de los acontecimientos, mientras tanto, ahora, voy a esbozar cierto esquema ideal de la creación de la teoría fenomenológica de los fenómenos eléctricos.

Reunamos en un personaje fantástico a Carlos Augusto de Coulomb (1730 - 1806), Alejandro Volta (1745-1827), Jorge Simón Ohm (1789 - 1854), Andrés María Ampère (1775 - 1836), Juan Cristian Oersted (1777 - 1851), Emil Jristiánovich Lenz (1804 - 1805) y a algunos otros admirables hombres de ciencia. Figurémonos que a este investigador le es inherente el modo de pensar científico actual y le pongamos en la boca la terminología moderna. Precisamente en nombre de este investigador presentemos nuestro relato.

Empieza su trabajo de formación de la teoría fenomenológica de la electricidad por un examen atento del acumulador. Ante todo, presta su atención al hecho de que el acumulador tiene dos «polos». Al tocarlos simultáneamente con las manos le queda claro, de una vez, que es mejor no hacer tal cosa (porque el golpe es bastante desagradable). Sin embargo, después de esta primera experiencia se le ocurre lo siguiente: por lo visto, algo ha corrido a través de mi cuerpo. Llamemos este «algo» electricidad.

Obrando con máximo cuidado el investigador comienza a conectar los polos mediante diferentes trocitos de alambre, barritas y cordoncitos. Se convence del siguiente hecho: los

objetos puestos en contacto con los polos a veces se calientan fuertemente, a veces se calientan poco y en algunos casos no se calientan, en general.

Cuando procede a la elección de palabras idóneas para caracterizar el descubrimiento hecho el investigador se decide a hablar de éste de la siguiente manera. Cuando conecto los polos mediante un alambre por este último fluye la electricidad. Voy a llamar este fenómeno corriente eléctrica. La experiencia ha demostrado que diferentes objetos se calientan de una forma disímil. Aquellos que se calientan bien evidentemente «conducen» bien la electricidad y se denominan conductores.

Muchos cuerpos se calientan mal, por lo visto, «conducen» mal la electricidad o bien crean una gran resistencia a la corriente que fluye. Y aquellos que no se calientan en absoluto se denominan aisladores o dieléctricos.

El investigador comienza a trabajar con los líquidos. Se pone de manifiesto que también en esto caso diferentes sustancias se comportan de distinta manera. Y, finalmente, se llega a un interesante descubrimiento: si se toma como líquido la solución de vitriolo azul y se sumergen en el baño los electrodos de carbón (este nombre se da a los objetos fijados a los polos), el científico halla en uno de los electrodos el precipitado rojizo de cobre.

Ahora el investigador ya está completamente convencido de que el fenómeno que estudia tiene una relación con la circulación de cierto fluido. Queda claro que vale la pena hablar sobre la dirección de la corriente. Convenimos en marcar con el signo «menos» el electrodo en que se deposita el cobre, considerando que el segundo electrodo es positivo. Por

cuanto las expresiones «electrodo negativo» y «electrodo positivo» son largas se proponen los términos «cátodo» y «ánodo», respectivamente. La corriente fluye del «más» al «menos», es decir, del ánodo al cátodo.

Pero el valor del descubrimiento está lejos de agotarse sólo con hacer constancia de este hecho. Se establece que cada segundo en el cátodo se deposita una misma masa de cobre. Seguramente que los átomos de cobre llevan en su seno el fluido eléctrico. Esta es la razón de que el investigador introduce en uso dos nuevos términos. En primer lugar, supone que la masa M del cobre es proporcional a la cantidad q de electricidad que pasó por el circuito, o sea, introduce la definición

$$q = kM$$

donde k es el coeficiente de proporcionalidad. Y, en segundo lugar, propone denominar intensidad de la corriente la cantidad de electricidad que pasa por el circuito en unidad de tiempo:

$$I = q/T$$

El investigador se ha enriquecido sustancialmente. Puede caracterizar la corriente por medio de dos magnitudes susceptibles de medirse: por la cantidad de calor que se libera en un tramo determinado del circuito en unidad de tiempo y por la intensidad de la corriente.

Ahora se le ofrece otra posibilidad: comparar las corrientes engendradas por diferentes fuentes. Se mide la intensidad de la corriente f , también se mide la energía Q que se libera

en forma de calor por un mismo trocito de alambre. Repitiendo los experimentos con distintos conductores el investigador averigua que la relación entre la cantidad de calor y la cantidad de electricidad que fluye a través del alambre es diferente para distintas fuentes de corriente. Sólo se requiere proponer un término apropiado para esta relación. Se ha elegido la palabra «tensión». Cuanto más alta es la tensión, tanta mayor cantidad de calor se libera.

El siguiente razonamiento puede tomarse como argumento a favor de la elección de esta palabra. Cuanto mayor es la tensión con que el hombre arrastra una carretilla con carga, tanto más calor siente. De este modo, al designar la tensión con la letra U, obtendremos

$$U = Q/q \text{ o bien } Q = U/t$$

Resumamos, hemos hecho los primeros pasos. Se han descubierto dos fenómenos. La corriente, al pasar a través de algunos líquidos, hace precipitar una sustancia, además, la corriente libera calor. El calor sabemos medirlo. El método para medir la cantidad de electricidad se ha dado, es decir, se ha dado la definición de este concepto. Además, se han dado las definiciones de los conceptos derivados: de la intensidad de la corriente y de la tensión.

Se ha escrito una serie de fórmulas elementales. Pero debe prestarse atención a la siguiente circunstancia: estas fórmulas no pueden llamarse leyes de naturaleza. En particular, el investigador dio el nombre de tensión a la relación Q/q pero no halló que Q/q es igual a la tensión.

Y he aquí que ha llegado la hora para buscar la ley de la naturaleza. Para un mismo conductor pueden medirse inde-

pendientemente dos magnitudes: la intensidad de la corriente y el calor o la intensidad de la corriente y la tensión (que, de principio, es lo mismo).

El estudio de la dependencia entre la intensidad de la corriente y la tensión lleva al descubrimiento de una importante ley. La absoluta mayoría de los conductores está sujeta a la ley:

$$U = IR.$$

La magnitud R puede llamarse resistencia en plena correspondencia con las observaciones cualitativas iniciales. El lector conoce la notación: es la ley de Ohm. Al sustituir en la fórmula anterior el valor de la intensidad de la corriente de la expresión de la ley de Ohm, hallamos:

Es evidente que se puede escribir la expresión de la energía liberada por el conductor en forma de calor también de otra manera:

$$Q = I^2 R \tau$$

De la primera fórmula se infiere que la cantidad de calor es inversamente proporcional a la resistencia. Cuando se dice esta frase hay que añadir: *a tensión invariable*. Precisamente este caso se tenía en cuenta cuando por primera vez se hizo uso del término «resistencia». Mientras tanto, la segunda fórmula que afirma que el calor es directamente proporcional a la resistencia requiere que se agregue: *a una intensidad constante de la corriente*.

En las expresiones presentadas el lector reconocerá la ley que lleva los nombres de Joule y Lenz.

Después de haber establecido que la tensión y la intensidad de la corriente son proporcionales obteniendo de este modo la posibilidad de determinar la resistencia del conductor, el investigador, como es natural, se plantea la pregunta: ¿de qué manera esta importante magnitud está relacionada con la forma y las dimensiones del conductor y con la sustancia de la cual esto se ha fabricado?

Los experimentos conducen al siguiente descubrimiento. Resulta que

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

donde l es la longitud del conductor, y S , su sección transversal. Esta expresión elemental es válida cuando se trata de un conductor lineal de sección invariable por toda su longitud. Si se quiere, recurriendo a unas operaciones matemáticas más complicadas, podemos escribir la fórmula de resistencia para el conductor de cualquier forma. Bueno, ¿y el coeficiente ρ ? ¿Qué significa esto? Dicho coeficiente caracteriza el material del cual está hecho el conductor. El valor de esta magnitud, que recibió el nombre de resistencia específica, o resistividad, oscila dentro de unos límites muy amplios. Por el valor de ρ las sustancias pueden diferenciarse miles de millones de veces.

Realicemos varias transformaciones formales más que nos serán útiles en lo adelante. La ley de Ohm puede anotarse en la forma siguiente:

$$I = \frac{US}{\rho l}$$

A menudo tenemos que ver con la relación entre la Intensidad de la corriente y el área de la sección del conductor. Esta magnitud se denomina densidad de la corriente y se suele designar con la letra j . Ahora la misma ley se escribirá así:

$$j = \frac{1U}{\rho l}$$

Al investigador le parece que en lo que concierne a la ley de Ohm todo está claro. Disponiendo de una cantidad ilimitada de conductores cuya resistencia se conoce es posible renunciar a engorrosas determinaciones de la tensión por medio del calorímetro, pues la tensión es igual al producto de la intensidad de la corriente por la resistencia.

Sin embargo, pronto, el científico llega a la conclusión de que esta afirmación necesita ser precisada. Valiéndose de una misma fuente de corriente él cierra sus polos mediante diferentes resistencias. En cada experimento la intensidad de la corriente será, naturalmente, distinta. Pero resulta que también el producto de la intensidad de la corriente por la resistencia, o sea, IR , tampoco queda el mismo. Al dedicarse al estudio de este fenómeno, por ahora todavía incomprendible para él, el investigador averigua que a medida que aumenta la resistencia el producto IR tiende a cierto valor constante.

Al designar con ξ este límite, hallamos la fórmula que no coincide con la establecida mediante mediciones directas de la intensidad de la corriente y la tensión. La nueva expresión tiene la siguiente forma:

$$\xi = I (R + r)$$

¿Por qué tan extraña contradicción?

Es necesario recapacitar. Ah, claro está, la contradicción es aparente. Es que la medición directa de la tensión empleando el método calorimétrico se refería tan sólo al conductor que cerraba el acumulador. Mientras tanto se ve claramente que el calor se desprende también en el propio acumulador (para cerciorarse de ello es suficiente tocar el acumulador con la mano). El acumulador posee su propia resistencia. El sentido de la magnitud r que aparece en la nueva fórmula es evidente: es la resistencia interna de la fuente de la corriente. En cuanto a ξ esta magnitud requiere una denominación especial. No se puede decir que la misma resultó ser muy acertada: la magnitud ξ se llama fuerza electromotriz (f.e.m.) aunque no tiene significado ni tampoco dimensión de la fuerza.

Las dos fórmulas conservaron (cabe señalar que en este caso se ha observado la justicia histórica) el nombre de leyes de Ohm. Únicamente, la primera fórmula recibió el nombre de ley de Ohm para una porción del circuito, mientras que la segunda se llama ley de Ohm para el circuito total.

Vaya que ahora, al parecer, no quedan ya dudas. Las leyes de la corriente continua están establecidas.

No obstante, el investigador no se ve satisfecho. El empleo del calorímetro resulta engorroso. Por si esto fuera poco, ¡hace falta pesar el cátodo con el precipitado de cobre! No puedo negar que es un método muy incómodo de medir la tensión.

Un buen día, ¡de veras que lo fue! el investigador, por pura casualidad, ubicó junto al conductor por el cual circulaba la corriente una aguja magnética. Él hizo un gran descubri-

miento: la aguja gira cuando pasa la corriente, con la particularidad de que lo hace en distintas direcciones, según sea la dirección de la corriente.

No es difícil determinar el momento de la fuerza que actúa sobre la aguja magnética. Basándose en el fenómeno descubierto es posible crear un instrumento de medida. Únicamente se necesita establecer el carácter de la dependencia del momento de la fuerza respecto a la corriente. El investigador resuelve este problema y construye magníficos instrumentos de aguja que permiten medir la intensidad de la corriente y la tensión.

Sin embargo, nuestro relato sobre aquello que el investigador realizó en la primera mitad del siglo diecinueve al estudiar las leyes de la corriente continua sería incompleto, si no señalásemos que descubrió la interacción de las corrientes: las corrientes que se dirigían en un mismo sentido se atraían, mientras las de dirección diferente se repelían. Se sobreentiende que este fenómeno también se puede utilizar para medir la intensidad de la corriente.

Desde luego, no me limitaré a los últimos párrafos al hablar sobre las leyes del electromagnetismo; a este fenómeno se dedica un capítulo aparte. Pero he considerado indispensable recordar estos importantes datos con el fin de contar cómo se introducen los conceptos cuantitativos fundamentales y las unidades de medida que caracterizan los fenómenos eléctricos: la corriente, la carga y el campo.

Electricidad inmóvil

Demos por sentado que nuestro investigador ideal está enterado de los variados fenómenos que, en los tiempos re-

mentos, habían obtenido el nombre de eléctricos. Las propiedades peculiares del ámbar, de una varilla de vidrio frotada con piel, la aparición de una chispa que saltaba entre dos cuerpos llevados a estado «electrizado» se estudiaban (o, mejor dicho, se aprovechaban para crear efectos) ya hacía mucho. Por esta razón era lógico que el investigador, al abordar el estudio de la corriente eléctrica, se planteara la pregunta: ¿el fluido que circula por el conductor y el fluido que puede permanecer en estado inmóvil sobre cierto cuerpo hasta que no lo «descarguen», es que ambos constituyen el mismo «algo»? Por lo demás, incluso abstrayéndose de la información acumulada anteriormente, ¿acaso uno no debe poner a sí mismo la siguiente pregunta: si la electricidad es «algo» que fluye a semejanza de un líquido no sería posible «verterlo en un vaso»?

Si el investigador quisiera obtener una respuesta directa a esta pregunta, tendría que proceder de la siguiente manera. Se toma una fuente de corriente con una tensión bastante alta (por ahora no hablamos sobre las unidades de medida, por lo tanto el lector, sin impacientarse, debe esperar la respuesta a la pregunta qué se suele considerar alta tensión, qué es una gran intensidad de la corriente, etc.). Uno de los polos se pone a tierra y sobre el segundo se coloca una pequeña bolita, abalorio hecho de hoja de aluminio muy fina. La bolita se suspende de un hilo de seda, de la misma manera se procede con otra bolita.

Ahora arrimamos estas dos minúsculas bolitas muy cerca una a otra (digamos, a una distancia de 2 mm entre sus centros). El investigador con entusiasmo, con admiración (puede proponer cualquier otro epíteto) observa que las bolitas