

## Introducción

(Desarrollo de las ideas acerca de la luz)

Las primeras opiniones de los sabios de la antigüedad acerca de lo que es la luz eran muy ingenuas. Suponían que del ojo salen unos tentáculos sumamente delgados y que las sensaciones visuales se producen al ser tentados por ellos los objetos. Detenerse a tratar ahora detalladamente semejantes interpretaciones es inútil. Nos limitaremos a seguir sucintamente el desarrollo de las ideas científicas sobre lo que es la luz.

**DOS PROCEDIMIENTOS DE TRANSMISIÓN DE LAS ACCIONES.** De un foco de luz, por ejemplo, de una lámpara, la luz se propaga en todas las direcciones e incide sobre los objetos que hay alrededor provocando en particular, su calentamiento. Cuando llega al ojo, la luz produce la sensación visual, es decir, vemos. Puede decirse que al propagarse la luz tiene lugar la transmisión de la acción de un cuerpo (foco) a otro (receptor).

Pero, en general, la acción de un cuerpo sobre otro se puede efectuar de dos modos distintos: por medio de un **TRANSPORTE DE SUSTANCIA** del foco al receptor, o mediante la **VARIACIÓN DEL ESTADO DEL MEDIO** que hay entre los cuerpos (sin transporte de sustancia).

Por ejemplo, se puede hacer sonar una campanilla que se encuentre a cierta distancia tirándole una bolita (fig. 122, *a*). En este caso tenemos un transporte de sustancia. También se puede proceder de otra manera: se ata una cuerda al badajo de la campanilla y se la hace sonar enviando por dicha cuerda ondas que muevan el badajo (fig. 122, *b*). Aquí no existe transporte de sustancia. Por la cuerda se propaga una onda, es decir, se produce una variación del estado (forma) de la cuerda.

Por lo tanto, la transmisión de la acción de un cuerpo a otro se puede efectuar por medio de ondas.

**TEORÍAS CORPUSCULAR Y ONDULATORIA DE LA LUZ.** De acuerdo con las dos formas posibles de transmisión de la acción del foco al receptor surgieron y comenzaron a desarrollarse dos teorías totalmente distintas acerca de lo que es la luz y de cuál es su naturaleza. Ambas teorías aparecieron casi al mismo tiempo en el siglo XVII.

La primera de estas teorías va ligada al nombre de Newton y la segunda al de Huygens.

Newton mantenía la denominada *teoría corpuscular*<sup>1)</sup> de la luz, según la cual ésta es un flujo de partículas que salen del foco en todas las direcciones (transporte de sustancia).

Huygens consideraba que la luz son ondas que se propagan en un medio

<sup>1)</sup> Del latín "corpusculum", cuerpecillo, partícula.

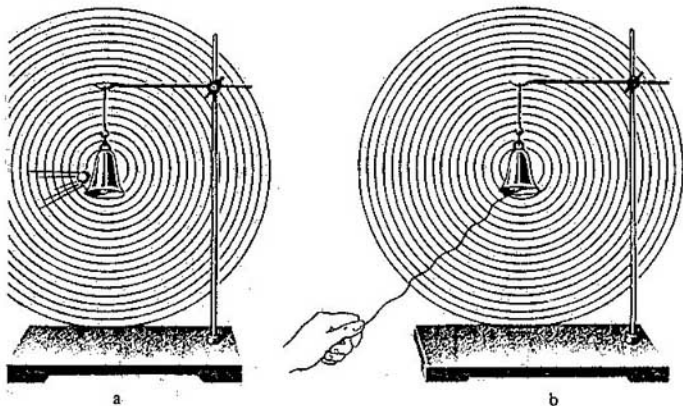


Fig. 122

hipotético, el éter, el cual ocupa todo el espacio y penetra dentro de todos los cuerpos.

Las dos teorías existieron paralelamente durante mucho tiempo. Ninguna de ellas podía lograr la victoria definitiva. La autoridad de Newton hacía, sin embargo, que la mayoría de los científicos dieran preferencia a la teoría corpuscular. Las leyes de la propagación conocidas hasta entonces podían ser explicadas más o menos satisfactoriamente por ambas teorías.

Basándose en la teoría corpuscular era difícil explicar por qué los haces luminosos al cruzarse en el espacio no influyen uno en otro, ya que las partículas luminosas deben chocar y dispersarse.

La teoría ondulatoria, en cambio, explicaba esto fácilmente. Las ondas de la superficie del agua, por ejemplo, pasan libremente una a través de otra sin ejercer influencia mutua.

Pero la propagación rectilínea de la luz, que hace que detrás de los objetos se formen sombras bien marcadas, es difícil de explicar partiendo de la teoría ondulatoria. Por la teoría corpuscular, en cambio, la propagación rectilínea de la luz es simplemente consecuencia de la ley de la inercia.

Esta situación indeterminada concerniente a la naturaleza de la luz duró hasta principios del siglo XIX, cuando fueron descubiertos los fenómenos de la difracción (rodeo de los objetos por la luz) y de la interferencia de la luz (reforzamiento o debilitamiento de la iluminación cuando se superponen entre sí haces luminosos). Estos fenómenos son propios exclusivamente del movimiento ondulatorio. Explicarlos por medio de la teoría corpuscular es imposible. Al parecer, la teoría ondulatoria había logrado vencer total y definitivamente.

Semejante seguridad se reforzó particularmente cuando Maxwell, en la segunda mitad del siglo XIX, demostró que la luz es un caso particular de las

ondas electromagnéticas. Los trabajos de Maxwell sentaron los cimientos de la *teoría electromagnética de la luz*.

Una vez que Hertz descubrió experimentalmente las ondas electromagnéticas no quedó duda alguna de que la luz, al propagarse, se comporta como una onda. De esto tampoco duda nadie ahora.

Sin embargo, a principios del siglo XX las ideas acerca de la naturaleza de la luz empezaron a cambiar radicalmente. Se reconoció que la desechada teoría corpuscular tiene, a pesar de todo, ligazón con la realidad.

La luz, al ser irradiada y absorbida, se comporta como un flujo de partículas.

Se descubrió que la luz tiene propiedades discontinuas o, como suele decirse, cuánticas. Se creó una situación insólita: los fenómenos de interferencia y difracción se podían explicar como antes, considerando la luz como una onda, y los fenómenos de emisión y absorción, estimándola como un flujo de partículas. Estos dos criterios sobre la naturaleza de la luz, que parecían incompatibles, en los años 30 del siglo XX se consiguieron aunar de forma no contradictoria en una nueva teoría física, la *electrodinámica cuántica*.

Más tarde se ha podido establecer que la dualidad de propiedades es característica no sólo de la luz, sino de cualquier otra forma de la materia.

Las propiedades ondulatorias y corpusculares de la luz se darán a conocer más adelante. Pero previamente vamos a estudiar las leyes de la propagación de la luz que constituyen el contenido de la llamada óptica *geométrica* o *de los rayos luminosos*.

## 6.1. Propagación rectilínea de la luz

**RAYOS LUMINOSOS.** La dirección en que se propaga cualquier onda, incluida la luminosa, se determina por medio de los rayos o líneas perpendiculares a las superficies de onda (véase el § 4.4) que indican la dirección en que se propaga la energía de la onda. La dirección de un haz de rayos luminosos se puede hallar experimentalmente si en el camino de la luz se interpone una pantalla opaca con un orificio (fig. 123). Entonces, si en la habitación hay algo de humo, se ve el camino que sigue la luz en forma de un estrecho canal rectilíneo, es decir, de *haz luminoso*.

Podría pensarse que disminuyendo el orificio se puede estrechar el haz hasta convertirlo en una línea y, de este modo, establecer con tanta exactitud como se quiera la dirección en que se propaga la luz. Pero en realidad, al achicar el orificio el haz sólo se comprime mientras el diámetro de aquél sigue siendo mucho mayor que la longitud de la onda luminosa. Cuando el diámetro del orificio en orden de magnitud se vuelve comparable con la longitud de onda, comenzará a apreciarse el ensanchamiento del haz debido a la difracción. La luz rodea el borde de la pantalla de un modo semejante a como lo hacen las ondas de la superficie del agua (véase la fig. 88). Por eso es imposible obtener un haz de luz tan delgado como se desee, que pudiera llamarse rayo luminoso.

*Se entiende por rayo de luz no un haz luminoso estrecho, sino la línea que indica la dirección en que se propaga la energía luminosa.* Para determinar esta dirección se aíslan haces luminosos estrechos cuyo diámetro en todo caso debe ser mayor que la longitud de onda. Luego se sustituyen estos haces por líneas que son algo así como los ejes de dichos haces. Estas líneas representan los rayos de luz. Por consiguiente, cuando se habla de reflexión o refracción de los rayos luminosos se sobrentiende que se trata del cambio de la dirección en que se propaga la luz.

La ventaja fundamental que se obtiene de la introducción del concepto de rayo luminoso consiste en que el comportamiento de los rayos en el espacio está determinado por leyes simples, conocidas con el nombre de *leyes de la óptica geométrica*.

*Se llama óptica geométrica la parte de la óptica que estudia las leyes de la propagación de la energía luminosa en los medios transparentes, basándose en el concepto de rayo luminoso.*

Estas leyes fueron establecidas empíricamente mucho antes de que se aclarara la naturaleza de la luz. Pero se infieren de la teoría ondulatoria de la luz como aproximación válida, si la longitud de onda es mucho menor que las dimensiones de los obstáculos y éstos se encuentran no muy lejos del punto de observación.

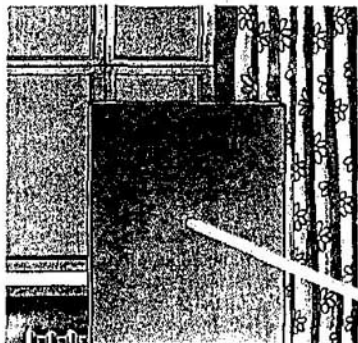


Fig. 123

En este capítulo se darán a conocer las leyes de la óptica geométrica y sus múltiples aplicaciones para el cálculo de aparatos ópticos: lentes, cámaras fotográficas, microscopios, etc.

**LEY DE LA PROPAGACIÓN RECTILÍNEA DE LA LUZ.** Como demuestran las observaciones, en un medio homogéneo la luz se propaga en línea recta. En otras palabras, en un medio homogéneo los rayos luminosos son líneas rectas<sup>1)</sup>.

Para demostrar esto tracemos, valiéndonos de una regla, un segmento de recta en una hoja de papel, de cartón o en una tabla. Hincamos un alfiler en cada extremo del segmento y otro en su centro y miremos a lo largo de la línea trazada. Si la línea es realmente recta, el alfiler más próximo tapaná a los otros. Esto significa que los rayos luminosos, que van a lo largo de la recta desde el alfiler más lejano como de una fuente de luz, no llegan a nuestro ojo porque en su camino encuentran un obstáculo opaco. Por lo tanto, mirando a lo largo de una línea trazada se puede comprobar de este modo si es recta o no.

Por la propagación rectilínea de la luz se explica la formación de la *sombra*, es decir, de la región en que no penetra la energía luminosa. Si las dimensiones del foco son pequeñas (punto luminoso) se obtiene una sombra nítida (fig. 124). Pero si las dimensiones del foco son grandes las sombras que se crean no están bien definidas (fig. 125). Esto se debe a que desde cada punto del foco la luz se propaga rectilíneamente y el objeto, iluminado ya por dos puntos, da dos sombras no coincidentes que superpuestas forman una sombra cuya densidad no es uniforme. La sombra total, cuando el foco es extenso, sólo se forma en aquellas partes de la pantalla a las cuales la luz no llega en absoluto. Rodeando la sombra total se encuentra una región más clara, la penumbra. A medida que se aleja de la zona de sombra total, la penumbra se va haciendo cada vez más clara. Desde la zona de sombra total el ojo no ve el foco luminoso, y desde la región de penumbra sólo se divisa una parte de su superficie (fig. 126).

<sup>1)</sup> En geometría el término *rayo*, lo mismo que el concepto de *línea recta*, apareció basándose en la idea de los rayos de luz.

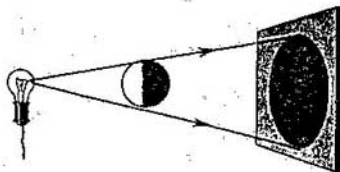


Fig. 124

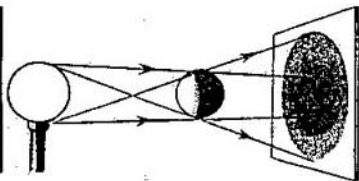


Fig. 125

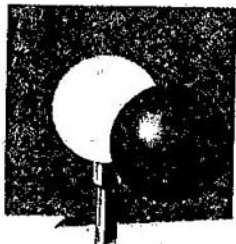


Fig. 126

En muchos casos la sombra no se crea en absoluto. Así, un día nublado no se ve la sombra de los postes, casas y demás objetos. Durante las operaciones quirúrgicas el campo operatorio se ilumina con lámparas especiales que no dan sombra.

## 6.2. Fotometría . Flujo luminoso. Intensidad de la luz

La luz ejerce influencia sobre los cuerpos porque transporta energía. Según la teoría de Maxwell la energía luminosa es la energía de las ondas electromagnéticas. Los métodos de medición de la energía luminosa constituyen la parte de la óptica denominada *fotometría*.

Una serie de magnitudes caracterizan la luz desde el punto de vista de la energía que transporta. La más importante de estas magnitudes es el *flujo luminoso*. Para percibir la energía luminosa tiene especial importancia, como es natural, el ojo humano. Por eso en primer lugar nos interesa no la energía total transportada por las ondas electromagnéticas, sino únicamente la parte de ella a la que reacciona el ojo. Las ondas electromagnéticas muy largas (hertzianas) y las muy cortas (como los rayos  $\gamma$ , de los que ya se habló en "Física I") no son percibidas por el ojo.

**FLUJO LUMINOSO.** El ojo humano tiene la máxima sensibilidad a los rayos verdes. Por eso en la práctica lo más importante es conocer no simplemente la cantidad de energía luminosa que registran los instrumentos de medida, sino la magnitud que caracteriza la acción de la luz sobre el ojo. Esta magnitud es el *flujo luminoso* (que se simboliza con la letra  $\Phi$ ).

Se llama *flujo luminoso* la energía de la luz que pasa a través de cierta superficie en la unidad de tiempo, valorada por la sensación visual.

En otras palabras, el flujo luminoso es la potencia de radiación luminosa apreciada directamente por el ojo humano.

El flujo luminoso lo crea el foco de luz y actúa sobre los objetos circundantes. Respectivamente se introducen otras dos magnitudes energéticas: una para caracterizar la fuente o foco de luz, que recibe el nombre de *intensidad de la luz del foco*, y otra para caracterizar la acción de la luz sobre la superficie de los cuerpos, llamada *iluminación* (o *iluminancia*).

El concepto de intensidad de la luz es más fácil de introducir refiriéndolo a la denominada *fente o foco puntual de luz*.

**FUENTE PUNTUAL.** Un foco de luz se considera *puntual* si sus dimensiones son mucho menores que las distancias desde las cuales se aprecia su acción. Se supone además que esta fuente emite la luz uniformemente en todas las direcciones. Así, por ejemplo, las distancias hasta las estrellas superan tanto las dimensiones de éstas que precisamente las estrellas son el mejor modelo de fuente puntual, a pesar de que sus dimensiones son enormes. Introduciendo el concepto de fuente o foco puntual de luz, sólo destacamos aquellas propiedades de las fuentes reales que son esenciales para la fotometría, prescindiendo de las propiedades secundarias. La fuente puntual es una idealización como otros modelos adoptados por la física, por ejemplo, el punto material, el cuerpo rígido o indeformable, el gas perfecto, etc.

**ÁNGULO SÓLIDO.** Para definir la distribución del flujo luminoso emitido por un foco de luz en distintas direcciones se utiliza el concepto de *ángulo sólido*.

Consideremos una esfera de radio  $R$ . Imaginemos dentro de esa esfera un cono cuyo vértice se encuentre en el centro de aquélla (fig. 127). Este cono cortará en la esfera cierta parte de superficie de área  $S$ .

La región del espacio limitada por la superficie del cono se llama *ángulo sólido*. El ángulo sólido  $\Omega$  se mide por la razón del área  $S$ , antes indicada, al cuadrado del radio  $R$  de la esfera:

$$\Omega = \frac{S}{R^2}. \quad (6.1)$$

Es fácil comprender que el valor del ángulo sólido no depende del radio de la esfera, ya que la parte  $S$  de superficie que aquél corta es proporcional al cuadrado del radio. La unidad de ángulo sólido es el estereorradián (1 sr). La superficie cónica que limita el ángulo sólido de 1 sr corta en la esfera una parte de su superficie cuya área es igual al cuadrado del radio de la esfera. El ángulo sólido

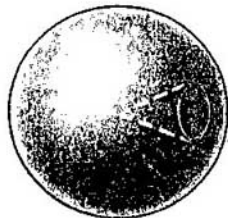


Fig. 127

total, que abarca todo el espacio alrededor de un punto, es

$$\Omega = \frac{S}{R^2} = \frac{4\pi R^2}{R^2} = 4\pi \text{ sr.} \quad (6.2)$$

**INTENSIDAD DE LA LUZ.** Se da el nombre de intensidad  $I$  de la luz de un foco o fuente a la razón del flujo luminoso  $\Phi$  al valor  $\Omega$  del ángulo sólido en el cual este flujo ha sido creado por la fuente:

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} \quad (6.3)$$

Como el ángulo sólido total es igual a  $4\pi$  sr, la intensidad de la luz de un foco puntual se expresa así:

$$I = \frac{\Phi}{4\pi}, \quad (6.4)$$

donde  $\Phi$  es el flujo luminoso total de la fuente, es decir, la potencia de la radiación luminosa que se propaga en todas las direcciones desde el foco, apreciada por la sensación visual que produce.

En el sistema internacional de unidades (SI) se toma como unidad fundamental de las magnitudes fotométricas la unidad de intensidad de la luz, llamada candela (cd). Esto se explica porque el patrón más fácil de crear es precisamente el de la intensidad de la luz. De patrón de unidad de intensidad de la luz (1 cd) sirve una fuente especial. Todas las demás unidades fotométricas, incluso la de flujo luminoso, son derivadas.

**UNIDAD DE FLUJO LUMINOSO.** Como unidad de flujo luminoso se toma el lumen (lm); 1 lm es el flujo luminoso que emite una fuente puntual de 1 cd de intensidad en un ángulo sólido igual a 1 sr.

### 6.3. Iluminación

Una fuente de luz casi siempre ilumina la superficie de los objetos desigualmente. Así, una lámpara suspendida sobre una mesa ilumina mejor el centro de ésta. Los bordes de la mesa están mucho menos iluminados. Esto no sólo se debe a que la intensidad de la luz de la lámpara eléctrica sea distinta en diferentes direcciones. Incluso en el caso de un foco puntual corresponderá a la superficie del centro de la mesa más potencia luminosa (flujo luminoso) que a una superficie igual en el borde.

Se llama *iluminación* (o *iluminancia*)  $E$ , la razón del flujo luminoso  $\Phi$ , que incide sobre una superficie determinada, al área  $S$  de dicha superficie:

$$E = \frac{\Phi}{S} \quad (6.5)$$

Como unidad de iluminación se toma el lux (lx); 1 lx es la iluminación con la cual sobre  $1 \text{ m}^2$  de superficie se distribuye uniformemente un flujo luminoso de 1 lm.



Para los cálculos fotométricos tiene importancia conocer cómo depende la iluminación  $E$  de una superficie cualquiera de su posición respecto de los rayos incidentes, de la distancia  $R$  hasta la fuente de luz y de la intensidad  $I$  de la luz de dicha fuente.

Es evidente que, en igualdad de las demás condiciones, la iluminación es directamente proporcional a la intensidad de la luz de la fuente. En efecto, dos focos iguales juntos emitirán en una dirección dada doble energía luminosa en la unidad de tiempo que un solo foco. Pero estos dos focos se pueden sustituir por uno cuya intensidad de luz sea dos veces mayor.

La dependencia de la iluminación respecto de la distancia a la fuente se puede determinar colocando mentalmente una fuente puntual en el centro de una esfera. El área de la esfera  $S = 4\pi R^2$ , y el flujo luminoso total  $\Phi = 4\pi I$  (véase la fórmula 6.4). Por lo tanto, la iluminación se expresa así:

$$E = \frac{\Phi}{S} = \frac{4\pi I}{4\pi R^2} = \frac{I}{R^2}.$$

Es decir, la iluminación de una superficie es inversamente proporcional al cuadrado de su distancia a la fuente.

En el caso que hemos considerado los rayos incidirán sobre la superficie de la esfera perpendicularmente. Pero no siempre ocurre así. La dirección de los rayos que inciden sobre una superficie se caracteriza por el *ángulo de incidencia*.

Se llama *ángulo de incidencia* el ángulo  $\alpha$  entre el rayo incidente y la perpendicular levantada a la superficie en el punto de incidencia del rayo (fig. 128).

El ángulo de incidencia de los rayos de un foco situado en el centro de una esfera, sobre la superficie de ésta, es nulo.

Veamos ahora cómo varía la iluminación de una superficie cualquiera si, siendo igual la distancia de ella a la fuente, el ángulo de incidencia de los rayos es distinto de cero. Para esto consideremos una porción muy pequeña de la superficie interna de la misma esfera que antes. Si las dimensiones de esta porción de superficie son mucho menores que el radio de la esfera, se podrá considerar plana, y los rayos que sobre ella inciden, como si fueran, aproximadamente, paralelos. Supongamos que el área de esta porción es  $\Delta S_0$  (fig. 129). Consideremos otra superficie sobre la cual incida desde el mismo foco un flujo luminoso igual al primero. Si esta segunda superficie forma con la primera el ángulo  $\alpha$ , el ángulo de incidencia sobre ella de los rayos del foco

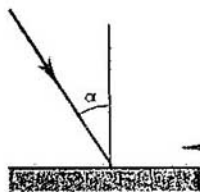


Fig. 128

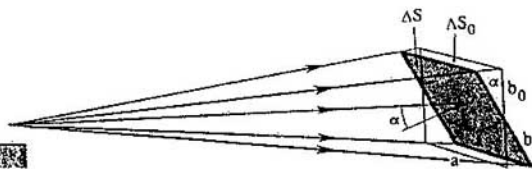


Fig. 129

central también será igual a  $\alpha$ . El área de la segunda superficie es  $\Delta S$ . Como puede verse fácilmente por la figura, ambas superficies tienen la misma anchura  $a$ , pero distintas longitudes  $b$  y  $b_0$ , siendo

$$\frac{b_0}{b} = \cos \alpha.$$

Por eso

$$\frac{\Delta S_0}{\Delta S} = \frac{ab_0}{ab} = \cos \alpha.$$

Siendo igual el flujo luminoso  $\Delta\Phi$ , la iluminación de ambas superficies no será la misma:

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S}, \quad E_0 = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S_0}.$$

Por consiguiente,

$$\frac{E}{E_0} = \frac{\Delta S_0}{\Delta S} = \cos \alpha.$$

Así, pues, entre la iluminación  $E$  de la superficie inclinada y la iluminación  $E_0$  de la superficie perpendicular a los rayos existe la relación

$$E = E_0 \cos \alpha. \quad (6.6)$$

Esto significa que la iluminación de una superficie es proporcional al coseno del ángulo de incidencia de los rayos.

Uniendo los resultados obtenidos se puede enunciar la ley general de la iluminación.

La iluminación de una superficie, creada por un foco puntual de luz, es directamente proporcional a la intensidad de la luz del foco y al coseno del ángulo de incidencia de los rayos e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia del foco a la superficie:

$$E = \frac{I}{R^2} \cos \alpha. \quad (6.7)$$

Si los focos son varios, la iluminación total será igual a la suma de las iluminaciones creadas por cada uno de ellos separadamente.

Para medir la iluminación se utilizan aparatos especiales, los *luminímetros* o *luxímetros*. La acción del instrumento que emplean los fotógrafos para determinar el tiempo de exposición — *exposímetro fotoeléctrico* — también se basa en medir la iluminación.

Con el fin de conservar la vista normal de todos los ciudadanos, en la URSS existen normas higiénicas de iluminación de los domicilios y locales de trabajo que garantizan las condiciones óptimas de trabajo y de vida. Así, la iluminación del encerado de una clase debe ser igual a 150 lx, y el de las escaleras de una escuela, de 30 lx.

¿ ?

1. ¿A qué se llama rayo luminoso?
2. ¿A qué se da el nombre de flujo luminoso?
3. ¿Qué es un ángulo sólido?
4. ¿A qué se llama intensidad de la luz?
5. ¿De qué depende la iluminación de una superficie, creada por una fuente puntual de luz?

### Ejemplos de resolución de problemas

**PROBLEMA 1.** La sombra de un edificio iluminado por rayos solares tiene la longitud  $L = 36$  m. Una pértiga vertical, cuya altura  $h = 2,5$  m, proyecta una sombra de longitud  $l = 3$  m. Hallar la altura  $H$  del edificio.

*Solución.* Los rayos solares inciden sobre la superficie horizontal de la Tierra formando un ángulo  $\alpha$  (fig. 130). Por el dibujo se ve que

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{L}{H} \quad \text{y} \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{l}{h}.$$

Por consiguiente,

$$\frac{L}{H} = \frac{l}{h}.$$

De donde

$$H = \frac{L}{l} h = 30 \text{ m.}$$

**PROBLEMA 2.** Una mesa redonda se ilumina con una lámpara (sin pantalla) suspendida sobre el centro de aquella a la altura  $h = 1,2$  m (fig. 131). El diámetro de la mesa  $D = 1,2$  m. ¿A qué será igual la iluminación en el punto  $A$  del borde de la mesa, si el flujo luminoso total de la lámpara  $\Phi_0 = 750$  lm?

*Solución.* La iluminación en el punto  $A$  se calcula por la fórmula

$$E = \frac{I}{R^2} \cos \alpha.$$

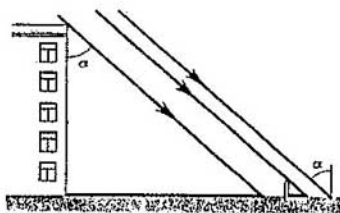


Fig. 130

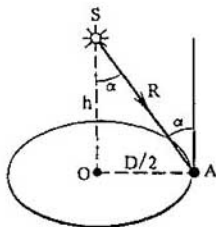


Fig. 131

La intensidad de la luz  $I$  se puede hallar por la fórmula

$$I = \frac{\Phi_0}{4\pi}$$

En el triángulo rectángulo  $SOA$

$$R^2 = h^2 + \frac{D^2}{4}, \quad \cos \alpha = \frac{h}{R} = \frac{h}{\sqrt{h^2 + \frac{D^2}{4}}}$$

Por lo tanto,

$$E = \frac{\Phi_0 h}{4\pi \left(h^2 + \frac{D^2}{4}\right)^{3/2}} \approx 30 \text{ lx.}$$

Ejercicio

6

1. Un haz de luz penetra en una caja por un orificio practicado en una de sus paredes laterales y sale por el orificio que hay en la pared opuesta. Si dentro de la caja el aire está limpio, ¿se verá el haz luminoso al mirar el interior de la caja por un orificio de su pared frontal?
2. ¿Cómo ve el observador un eclipse de Sol cuando la Tierra se encuentra en la región de penumbra de la Luna?
3. "En la habitación a que entró Iván Ivánovich reinaba la más completa oscuridad, porque los postigos de las ventanas estaban cerrados, y un rayo de luz, que pasaba por el agujero que había en uno de ellos, se irisaba y, al chocar con la pared opuesta, proyectaba en ella un panorama variopinto de tejados, árboles y ropa tendida en la calle, aunque todo patas arriba" (*N. V. Gógol*, "Historia de la querrela de Iván Ivánovich con Iván Nikiforovich"). Explique el origen de este fenómeno.
4. ¿Por qué la sombra de los pies, proyectada sobre el suelo por la luz de un farol, es más nítida que la sombra de la cabeza?
5. La lámpara suspendida sobre una máquina herramienta a 1,1 m de altura crea en el lugar de trabajo una iluminación de 50 lx. Según las normas vigentes la iluminación no debe diferir de 50 lx en más de 10 lx en uno u otro sentido. ¿A qué altura sobre la máquina se puede encontrar la lámpara?
6. Dos focos puntuales de luz, cuyas intensidades son  $I_1 = 80 \text{ cd}$  e  $I_2 = 125 \text{ cd}$ , se encuentran a la distancia  $l = 3,6 \text{ m}$  uno de otro. ¿En qué punto de la recta que une dichos focos hay que colocar una pequeña pantalla plana para que su iluminación sea igual por ambos lados? ¿Variará esta respuesta si la pantalla no es perpendicular a la recta que une los focos?
7. Una habitación se alumbrá con dos lámparas colgadas a la altura  $h = 3 \text{ m}$  del suelo y a la distancia  $l = 4 \text{ m}$  una de otra. Considerando las lámparas como focos puntuales de intensidad de luz  $I = 200 \text{ cd}$  cada uno, determinar la iluminación del suelo debajo de cada lámpara y a media distancia entre ellas. La influencia que sobre la iluminación ejerce la luz reflejada en el techo y en las paredes no tomarla en consideración.

## 6.4.

### Ley de la reflexión de la luz. Construcción de la imagen en un espejo plano

Un rayo de luz en un medio homogéneo es rectilíneo hasta que llegue al límite de este medio con otro. En el límite entre dos medios el rayo cambia de dirección. Una parte de la luz (en una serie de casos toda ella) retorna al primer medio. Este fenómeno se conoce con el nombre de *reflexión de la luz*. Al mismo tiempo la luz pasa parcialmente al segundo medio, cambiando al hacerlo la dirección de su propagación, es decir, *se refracta*.

**REFLEXIÓN ESPECULAR Y REFLEXIÓN DIFUSA.** En dependencia de las propiedades del límite de separación entre los dos medios, la reflexión puede tener distinto carácter. Si este límite tiene la forma de superficie cuyas rugosidades son de dimensiones menores que la longitud de la onda luminosa, se dice que es *especular*.

De ejemplos de superficies que por sus propiedades se aproximan a los espejos pueden servir la superficie de una gota de mercurio, la superficie de un vidrio liso o una superficie metálica bien pulimentada. Los rayos de luz que inciden sobre una de estas superficies formando un estrecho haz paralelo, después de reflejarse siguen también direcciones próximas. Esta reflexión dirigida se llama *especular*.

Si, en cambio, las dimensiones de las rugosidades son mayores que la longitud de onda de la luz, el haz estrecho se dispersa en el límite. Una vez reflejados, los rayos de luz siguen todas las direcciones posibles. Esta reflexión recibe el nombre de *difusa* o *irregular*. Precisamente en virtud de la reflexión difusa de la luz podemos ver los objetos que de por sí no emiten luz. En pequeño grado la difusión de la luz tiene lugar incluso cuando la reflexión se produce en la superficie más lisa, por ejemplo, en un espejo ordinario. De lo contrario no podríamos ver la superficie del espejo.

**LEY DE LA REFLEXIÓN DE LA LUZ.** Esta ley define las posiciones mutuas del rayo incidente  $AB$  (fig. 132, *a*), el rayo reflejado  $BD$  y la perpendicular  $BC$  levantada a la superficie en el punto de incidencia.

En el § 4.10 se estudió la reflexión de las ondas mecánicas. Vimos entonces que, al reflejarse las ondas, el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. Esta ley es válida para todas las ondas, cualquiera que sea su naturaleza, y se enuncia así: el rayo incidente, el rayo reflejado y la perpendicular al límite de separación de los dos medios, levantada en el punto de incidencia, se encuentran en un mismo plano, y el ángulo de reflexión  $\gamma$  es igual al ángulo de incidencia  $\alpha$ .

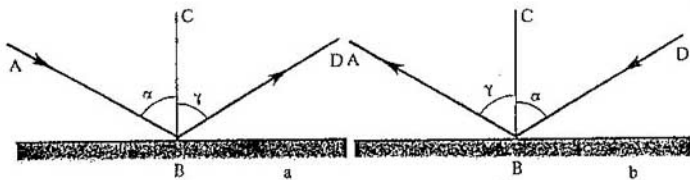


Fig. 132

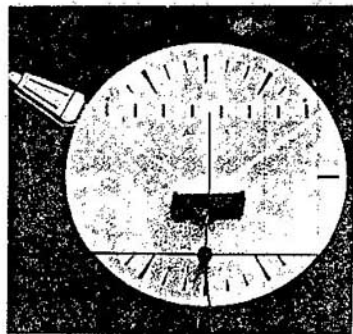


Fig. 133

Es evidente que esta ley se cumple también si la luz se propaga en sentido contrario (fig. 132, *b*). La *reversibilidad* de la marcha de los rayos luminosos es una de sus propiedades importantes.

De que la ley de la reflexión de la luz es justa podemos cerciorarnos por medio de un experimento. Para eso, en el centro de un disco (fig. 133) se sujeta un espejo plano, o un trozo de vidrio de cara plana, de manera que la superficie reflectora coincida con el diámetro horizontal del disco. Una lámpara especial, que puede desplazarse siguiendo la circunferencia, emite un estrecho haz de luz que incide sobre la superficie reflectora. Los rayos incidente y reflejado dejan sobre la superficie blanca del disco sendas pistas luminosas. Cambiando el ángulo de incidencia desde 0 hasta 90° pueden observarse las variaciones del ángulo de reflexión. De perpendicular levantada al plano del espejo en el punto de incidencia del rayo sirve en este caso el diámetro vertical del disco. Las observaciones confirman la ley de la reflexión de la luz y la reversibilidad de la marcha de los rayos.

**FORMACIÓN DE LA IMAGEN EN UN ESPEJO PLANO.** Supongamos que un punto luminoso se encuentra delante de una superficie plana reflectora de la luz, es decir, de un espejo plano. Se nos plantea el problema: ¿dónde veremos la imagen de este punto si miramos el espejo? Para responder a esta pregunta consideremos varios rayos que partiendo del punto *S* llegan, una vez reflejados (fig. 134), al ojo del observador. A éste le parece que los rayos parten del punto *S*<sub>1</sub>, que puede hallarse prolongando los rayos en sentido contrario hasta su intersección. El punto *S*<sub>1</sub> será por esto la imagen del punto *S* en el espejo plano. Esta imagen se llama *virtual*, ya que en el punto *S*<sub>1</sub> se intersecan no los rayos reflejados, sino sus prolongaciones. A este punto no llega la energía luminosa.

Consideremos dos rayos cualesquiera de un haz divergente, por ejemplo, los rayos extremos del haz que llega al ojo (rayos *AB* y *CD*). En los triángulos *SAC* y *S*<sub>1</sub>*AC* el lado *AC* es común. Aplicando la ley de la reflexión se puede decir que los ángulos de los triángulos adyacentes a este lado común son respectivamente congruentes. Por lo tanto, los triángulos son congruentes y coinciden uno con

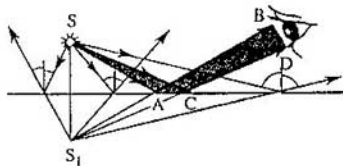


Fig. 134

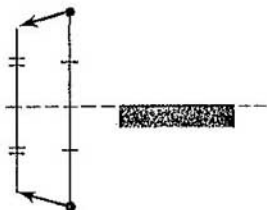


Fig. 135

otro si la figura se dobla por la línea del espejo. Esto significa que el punto  $S_1$  es *simétrico* al  $S$  respecto del espejo. Por eso, para hallar la imagen del punto basta bajar desde él una perpendicular al espejo o a su prolongación y continuarla una distancia igual por detrás del espejo.

La imagen de un objeto en un espejo plano tiene las mismas dimensiones que el propio objeto (fig. 135).

Existen los llamados *espejos esféricos*, cuya superficie reflectora tiene la forma de segmento esférico.

¿ ?

1. Enuncie la ley de reflexión de la luz.
2. ¿A qué se llama imagen virtual?
3. ¿Dónde se encuentra la imagen de un foco puntual de luz en un espejo plano?

## Ejemplos de resolución de problemas

**PROBLEMA 1.** A orillas de un pequeño estanque hay un poste con un farol en lo alto. En la orilla opuesta se encuentra un observador. Un rayo de luz del farol, después de reflejarse en el agua, llega al ojo del observador. Hallar, por construcción, la posición del punto sobre la superficie del agua en el cual se refleja el rayo que incide sobre el ojo. Calcular la distancia desde este punto hasta el poste, si la altura del último es  $H$ , la del observador  $h$  y la distancia entre el poste y el observador es  $l$ .

*Solución.* Se construye la imagen  $S_1$  del farol  $S$  que da la superficie  $CD$  del agua (fig. 136). Para eso se baja desde el punto  $S$  la perpendicular a la superficie

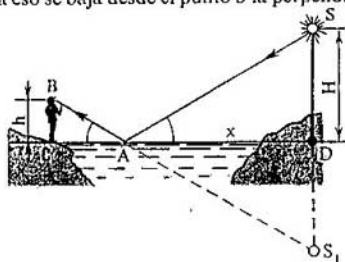


Fig. 136

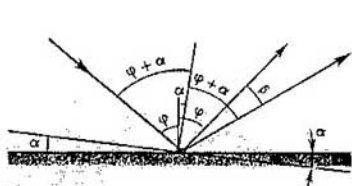


Fig. 137

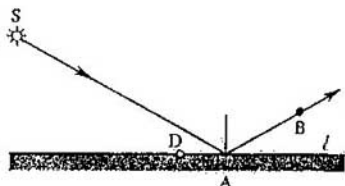


Fig. 138

$CD$ . La imagen  $S_1$  se encuentra en la prolongación de esta perpendicular y es simétrica al punto  $S$  respecto de la superficie  $CD$ , es decir,  $|S_1D| = |SD|$ . El rayo reflejado en la superficie del agua tiene la misma dirección que su prolongación en sentido contrario y pasa por el punto  $S_1$ . Por eso, para determinar la dirección del rayo reflejado se traza una recta desde el punto  $S_1$  hasta el punto  $B$ , que coincide con el ojo del observador. Esta recta corta la superficie del agua en el punto  $A$  buscado.

Los triángulos  $ADS$  y  $ACB$  son semejantes (por ser rectángulos y tener igual un ángulo agudo). Por consiguiente,

$$\frac{|DA|}{|AC|} = \frac{|SD|}{|BC|},$$

o bien

$$\frac{x}{l-x} = \frac{H}{h}.$$

De donde

$$x = \frac{lH}{H+h}.$$

**PROBLEMA 2.** Un espejo plano se gira un ángulo  $\alpha = 17^\circ$  alrededor de un eje que se halla en el plano del espejo. ¿Qué ángulo girará el rayo reflejado, si la dirección del rayo incidente permanece invariable?

**Solución.** Sea  $\varphi$  el ángulo inicial de incidencia del rayo (fig. 137). Según la ley de la reflexión, el ángulo reflejado también será igual a  $\varphi$  y, por lo tanto, el ángulo entre el rayo incidente y el reflejado debe ser igual a  $2\varphi$ . Cuando el espejo gira el ángulo  $\alpha$ , la perpendicular a él levantada en el punto de incidencia también gira un ángulo  $\alpha$ . Por consiguiente, el nuevo ángulo de incidencia será igual a  $\varphi + \alpha$ . El nuevo ángulo de reflexión será igual a éste. De aquí que el ángulo entre el rayo incidente y el rayo reflejado se hará igual a  $2(\varphi + \alpha)$ , es decir, sufrirá una variación de  $2\alpha$  en comparación con el inicial. Por lo tanto, el ángulo reflejado girará un ángulo  $\beta = 2\alpha = 34^\circ$ .

Ejercicio

7

1. Un haz de rayos paralelos sale de una linterna de proyección en dirección horizontal. ¿Bajo qué ángulo, respecto del plano horizontal, debe colocarse un espejo plano para que, después de reflejarse en él, marche el haz verticalmente? ¿Seguirá siendo paralelo el haz?



- Un objeto pequeño se encuentra entre dos espejos planos que forman entre sí un ángulo  $\alpha = 30^\circ$ . El objeto está a la distancia  $l = 10$  cm de la línea de intersección de los espejos y a igual distancia de ambos. ¿Qué distancia  $x$  hay entre las imágenes virtuales de este objeto en los espejos?
- Un rayo, procedente del foco puntual  $S$  (fig. 138), incide sobre un espejo plano en el punto  $A$  y, una vez reflejado, pasa por el punto  $B$ . Demostrar que si otro rayo del mismo foco pasara por el punto  $B$  después de reflejarse en el punto  $D$ , contiguo al  $A$ , del espejo, resultaría: 1) que no se cumple la ley de la reflexión, y 2) que el camino  $SDB$  sería recorrido por la luz en más tiempo que el camino  $SAB$ .
- ¿Qué altura debe tener un espejo plano, colgado verticalmente, para que una persona, cuya altura sea  $H$ , se vea en él de cuerpo entero? ¿A qué alturas deben estar los bordes inferior y superior del espejo?
- ¿Por qué no se puede emplear un espejo plano como pantalla de cine?

## 6.5. Ley de la refracción de la luz

En el límite entre dos medios la luz cambia su dirección de propagación. Una parte de la energía luminosa retorna al primer medio, es decir, *se refleja*. Si el segundo medio es transparente, otra parte de la luz, en determinadas condiciones, puede pasar a través del límite entre los dos medios, cambiando también, por lo general, la dirección en que se propaga. Este fenómeno se llama *refracción de la luz*.

A causa de la refracción se observa la variación aparente de las dimensiones, la forma y la disposición de los objetos. De esto pueden convencernos unas observaciones fáciles de hacer. Pongamos en el fondo de un vaso vacío una moneda o cualquier otro objeto pequeño. Situemos el vaso de tal forma que el centro de la moneda, el borde del vaso y nuestro ojo se encuentren en una recta. Sin cambiar la posición de la cabeza, echemos agua en el vaso. A medida que el nivel del agua sube, parece que sube también el fondo del vaso con la moneda. Ésta, que antes sólo se veía parcialmente, se ve ahora entera.

En este mismo vaso metamos oblicuamente un lápiz. Si miramos desde arriba, parecerá que el lápiz se ha quebrado junto a la superficie del agua. El extremo del lápiz sumergido en el agua parece que está levantado (fig. 139). Si miramos el vaso desde un costado, vemos que la parte del lápiz sumergida



Fig. 139



Fig. 140

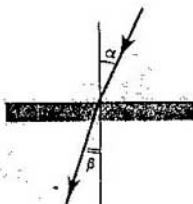


Fig. 141



Fig. 142

parece que se ha desviado hacia un lado y que su diámetro es mayor (fig. 140).

**LEY DE LA REFRACCIÓN DE LA LUZ.** Estos fenómenos se explican por la variación que experimenta la dirección de los rayos en el límite entre dos medios. El rayo que se propaga en el primer medio y llega al límite se llama *rayo incidente*. Este rayo forma con la perpendicular al límite, levantada en el punto de incidencia, el ángulo  $\alpha$ , que como ya sabemos recibe el nombre de *ángulo de incidencia*. El rayo que pasa al segundo medio se llama *rayo refractado*. El ángulo  $\beta$  que este rayo forma con la misma perpendicular, se denomina *ángulo de refracción* (fig. 141).

La posición mutua del rayo incidente, del reflejado y del refractado es fácil de determinar haciendo visible un estrecho haz luminoso. La marcha de este haz en el aire se puede ver si éste contiene un poco de humo o poniendo una pantalla que forme con el rayo un ángulo pequeño. El haz refractado se ve en el agua de un acuario teñida con fluorescencia (fig. 142).

Las observaciones muestran que al aumentar el ángulo de incidencia crece también el ángulo de refracción. Pero esta dependencia no es directamente proporcional.

La ley de la refracción de la luz fue establecida empíricamente en el siglo XVII y se enuncia como sigue: el rayo incidente, el rayo refractado y la perpendicular al límite de separación de dos medios levantada en el punto de incidencia del rayo, se encuentran en un mismo plano, y la razón del seno del ángulo de incidencia al seno del ángulo de refracción es una magnitud constante para los dos medios dados.

Si  $\alpha$  es el ángulo de incidencia y  $\beta$ , el ángulo de refracción,

$$\frac{\text{sen } \alpha}{\text{sen } \beta} = n. \quad (6.8)$$

¿Qué importancia tiene esta ley? La fórmula (6.8) define una cantidad innumerable de casos de refracción. Valiéndose de ella no es necesario hacer un experimento en cada caso. Tampoco hay que recordar o hacer tablas especiales del ángulo de incidencia y de su correspondiente de refracción para cada caso concreto. Conociendo la ley de la refracción se puede resolver cualquier problema relacionado con la refracción de la luz.

Está claro que lo mismo se puede decir de toda ley simple de la naturaleza establecida por vía experimental.

**ÍNDICE DE REFRACCIÓN.** La magnitud constante que figura en la ley

de la refracción de la luz se llama *índice de refracción relativo* o *índice de refracción del segundo medio respecto del primero*.

El índice de refracción de un medio respecto del vacío recibe el nombre de *índice de refracción absoluto* de dicho medio. Este índice es igual a la razón del seno del ángulo de incidencia al seno del ángulo de refracción cuando el rayo luminoso pasa del vacío al medio dado. Entre el índice de refracción relativo  $n$  y los índices de refracción absolutos  $n_2$  del segundo medio y  $n_1$  del primer medio existe la relación

$$n = \frac{n_2}{n_1}, \quad (6.9)$$

que se demostrará en el capítulo 7. Por esta razón la ley de la refracción se puede escribir en la forma siguiente:

$$\frac{\operatorname{sen} \alpha}{\operatorname{sen} \beta} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (6.10)$$

El medio cuyo índice de refracción absoluto es menor suele llamarse *medio ópticamente menos denso*.

El índice de refracción absoluto de un medio tiene un profundo sentido físico. Está relacionado con la velocidad de propagación de la luz en el medio dado y depende del estado físico del medio en el cual se propaga la luz, es decir, de la temperatura de la sustancia, de su densidad y de la existencia en ella de tensiones elásticas. El índice de refracción depende también del carácter de la propia luz. Para la luz roja es menor que para la verde, y para la verde, menor que para la violeta.

Por eso en las tablas de valores del índice de refracción de distintas sustancias suele indicarse para qué luz se da el valor de  $n$  y en qué estado se encuentra el medio. Si estas indicaciones se omiten, quiere decir que la dependencia de dichos factores es despreciable.

En la mayoría de los casos se considera el paso de la luz a través del límite *aire-sólido* o *aire-líquido*, y no a través del límite *vacío-medio*. No obstante, el índice de refracción absoluto  $n_2$  de una sustancia sólida o líquida se diferencia muy poco del índice de refracción de este mismo medio con relación al aire. Así, el índice de refracción absoluto del aire en condiciones normales para la luz amarilla es, aproximadamente,  $n_1 \approx 1,000292$ . Por lo tanto,

$$n = \frac{n_2}{n_1} \approx n_2. \quad (6.11)$$

El valor del límite de refracción para algunas sustancias, con relación al aire, se da en la tabla 2 (los datos se refieren a los rayos amarillos).

**OBSERVACIÓN DE LA REFRACCIÓN DE LOS RAYOS LUMINOSOS.** Para comprobar que la ley de la refracción es justa se puede utilizar un semicilindro transparente con la superficie de una de sus bases mateada. Este semicilindro se sujeta a un disco graduado de tal manera, que su eje coincida con el centro del disco (fig. 143). La luz sigue el radio del disco y se refracta en la superficie plana del semicilindro. La marcha del rayo en el vidrio se ve en la base mateada. Trasladando la lámpara se cambia el ángulo de

| Sustancia                     | Índice de refracción con relación al aire |
|-------------------------------|---|
| Agua (a 20°C)                 | 1,33                                      |
| Accite de cedro (a 20°C)      | 1,52                                      |
| Bisulfuro de carbono (a 20°C) | 1,63                                      |
| Hielo                         | 1,31                                      |
| Sal gema                      | 1,54                                      |
| Cuarzo                        | 1,54                                      |
| Rubi                          | 1,76                                      |
| Diamante                      | 2,42                                      |
| Vidrio de diversas clases     | desde 1,47 hasta 2,04                     |

incidencia. Los ángulos de incidencia se miden por la escala del disco. Del mismo modo se miden los ángulos de refracción. Utilizando las tablas trigonométricas, es fácil cerciorarse de que la razón del seno del ángulo de incidencia al seno del ángulo de refracción permanece invariable cuando varía el ángulo de incidencia. Es fácil advertir también que el ángulo de refracción es menor que el de incidencia. Esto significa que cuando el rayo entra en un medio ópticamente más denso, se desvía hacia el lado de la perpendicular al límite de separación de los dos medios. Y únicamente en el caso en que el rayo sigue la perpendicular al límite de separación ( $\alpha = 0$ ), pasa al segundo medio sin refractarse ( $\beta = 0$ ).

En estos experimentos se puede apreciar que el haz refractado no lleva consigo toda la energía luminosa que transporta el haz incidente. Una parte de la luz se refleja en la superficie y retorna al primer medio (es decir, al aire). Vamos a variar el ángulo de incidencia desde 0 (incidencia normal) hasta 90° (rayo rasante). De acuerdo con la ley de la reflexión, el ángulo de reflexión también varía desde 0 hasta 90°. Observando atentamente se puede notar que

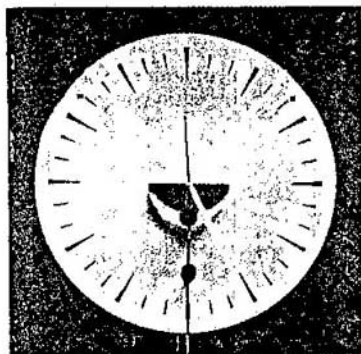


Fig. 143

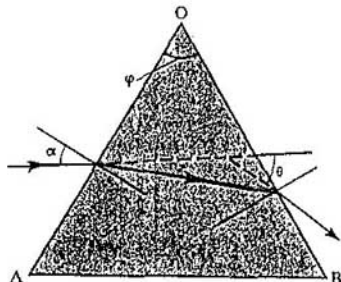


Fig. 144

a medida que aumenta el ángulo de incidencia, la intensidad de la luz reflejada crece. Un haz próximo al rasante se reflejará en el agua o en el vidrio casi totalmente.

**MARCA DE LOS RAYOS EN UN PRISMA TRIANGULAR.** En los instrumentos ópticos se emplea frecuentemente el prisma triangular, de vidrio o de otros materiales transparentes. Este prisma se utiliza para analizar la composición de la luz. También se emplea en los gemelos (prismáticos), en los periscopios y en otros muchos aparatos.

En la fig. 144 se representa la sección de un prisma de vidrio por un plano perpendicular a sus aristas laterales. El rayo se refracta dos veces: una en la cara  $OA$  y otra en la cara  $OB$ . El ángulo  $\varphi$  entre estas caras se llama *ángulo refringente del prisma*. El ángulo  $\theta$  de desviación del rayo depende del ángulo refringente  $\varphi$  del prisma, del índice de refracción  $n$  del material y del ángulo de incidencia  $\alpha$ .

## 6.6. Reflexión total

Volvamos otra vez a los experimentos en los cuales observamos la refracción de la luz en el límite *aire-agua* o *aire-vidrio*. Sólo que ahora vamos a estudiar los fenómenos que se observan cuando la luz pasa del medio ópticamente más denso al ópticamente menos denso. Para eso en los experimentos con el semicilindro de vidrio pondremos la lámpara en la parte inferior del disco. Si el rayo incidente se hace pasar a lo largo del radio que antes seguía el rayo refractado, se puede ver que, cuando sale del vidrio, el rayo sigue la línea que antes correspondía al rayo incidente. Los rayos incidente y refractado son reversibles.

Además del rayo incidente, en el vidrio existe el rayo reflejado. Su huella puede notarse sobre la superficie mateada del semicilindro (fig. 145). La reflexión se produce de acuerdo con la ley de ésta: el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia.

Si  $n$  es el índice de refracción del vidrio respecto del aire ( $n > 1$ ), el índice de refracción del aire respecto del vidrio será igual a  $1/n$ . En este caso el vidrio es el primer medio y el aire, el segundo. La ley de la refracción de la luz se

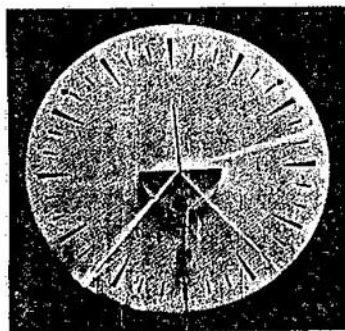


Fig. 145

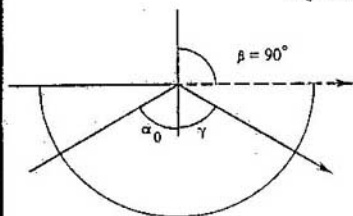


Fig. 146

escribe así:

$$\frac{\operatorname{sen} \alpha}{\operatorname{sen} \beta} = \frac{1}{n}. \quad (6.12)$$

Desplazando la lámpara vamos a aumentar el ángulo de incidencia. Al mismo tiempo irán aumentando el ángulo de reflexión, igual al de incidencia, y el de refracción. El ángulo de refracción será mayor que el de incidencia. Efectivamente, por la fórmula (6.12) tenemos:  $\operatorname{sen} \beta = n \operatorname{sen} \alpha$ . Como en este caso  $n > 1$ ,  $\operatorname{sen} \beta > \operatorname{sen} \alpha$  y, por consiguiente, el ángulo de refracción es mayor que el de incidencia ( $\beta > \alpha$ ). Esto quiere decir que al pasar a un medio ópticamente menos denso, el rayo se desvía alejándose de la perpendicular al límite entre los dos medios.

Observando atentamente se puede notar que a medida que aumenta el ángulo de incidencia, el brillo (y, por lo tanto, la energía) del haz reflejado crece, al mismo tiempo que el brillo (energía) del haz refractado decrece. Con especial rapidez decrece la energía del haz refractado cuando el ángulo de refracción se aproxima a  $90^\circ$ . Finalmente, cuando el ángulo de incidencia se hace tal que el haz refractado marcha casi a lo largo del límite de separación (fig. 146), la parte de energía reflejada se aproxima al 100%. Al ángulo de refracción máximo  $\beta = 90^\circ$  corresponde el ángulo de incidencia  $\alpha_0$ . Si la lámpara se coloca de manera que el ángulo de incidencia  $\alpha$  sea mayor que  $\alpha_0$ , veremos que el haz refractado desaparece y que toda la luz se refleja en el límite de separación, es decir, se produce la *reflexión total de la luz*.

La reflexión total de la luz se produce en el límite de un medio ópticamente más denso con un medio ópticamente menos denso, cuando el ángulo de incidencia  $\alpha$  es mayor o igual que  $\alpha_0$ . El ángulo de incidencia  $\alpha_0$  correspondiente al ángulo de refracción de  $90^\circ$  se llama, por esta razón, *ángulo límite de reflexión total*. Cuando  $\operatorname{sen} \beta = 1$ , la fórmula (6.12) toma la forma:

$$\operatorname{sen} \alpha_0 = \frac{1}{n}. \quad (6.13)$$

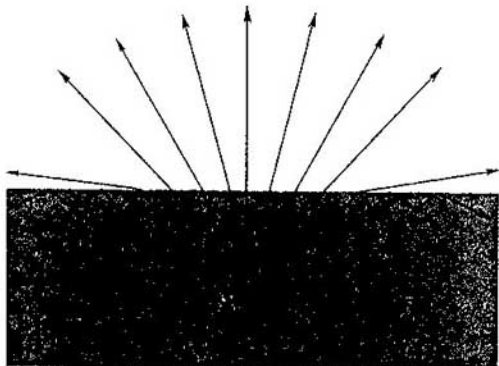


Fig. 147

Por esta igualdad se puede hallar el valor del ángulo límite de reflexión total  $\alpha_0$ . Para el agua ( $n = 1,33$ ) dicho valor resulta ser igual a  $48^\circ 35'$ , para el vidrio ( $n = 1,5$ ) toma el valor de  $41^\circ 50'$ , y para el diamante ( $n = 2,4$ ), el de  $24^\circ 40'$ . En todos los casos el segundo medio es el aire.

En la fig. 147 se representa el haz de rayos de un foco situado dentro del agua a poca distancia de la superficie. La mayor intensidad de la luz se indica con un mayor grosor de la línea que representa al rayo correspondiente.

El fenómeno de la reflexión total es fácil de observar en un experimento muy sencillo. Se echa agua en un vaso y se levanta éste hasta que queda algo más alto que el nivel del ojo. La superficie del agua mirada desde abajo a través de la pared del vaso parece brillante, como si estuviese plateada, a causa de la reflexión total de la luz.

La reflexión total se utiliza en la llamada *óptica de fibras* para la transmisión de la luz y de las imágenes por haces de fibras transparentes flexibles, los denominados *conductos* o *guías de luz*. Un guía de luz es una fibra de vidrio de forma cilíndrica recubierta con una capa de material transparente cuyo índice de refracción es menor que el de la fibra. En virtud de la reflexión total múltiple, la luz se puede dirigir por cualquier camino (rectilíneo o curvado). Las fibras se juntan en haces ("multifibras"). Por cada una de las fibras se transmite un elemento determinado de la imagen (fig. 148). Las "multifibras" se utilizan, por ejemplo, en medicina para reconocer los órganos internos (donde la introducción de una lamparita ordinaria provoca un calentamiento indeseable).

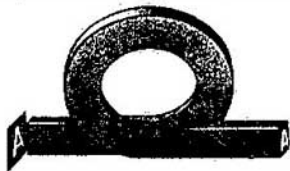


Fig. 148

Es de esperar que con el desarrollo de la tecnología de fabricación de haces de fibras largas (guías de luz) se hará posible realizar la comunicación (incluso televisiva) por medio de rayos luminosos.

- ¿ ?
1. Enuncie la ley de la refracción de la luz.
  2. ¿En qué se diferencia el índice de refracción absoluto de la luz del relativo?
  3. ¿A qué es igual el ángulo límite de reflexión total?

### Ejemplos de resolución de problemas

**PROBLEMA 1.** Determinar qué ángulo  $\theta$  se desvía de su dirección inicial un rayo de luz al pasar del aire al agua, si el ángulo de incidencia  $\alpha = 75^\circ$ .

*Solución.* En la fig. 149 se ve que

$$\theta = \alpha - \beta.$$

Según la ley de la refracción

$$\frac{\text{sen } \alpha}{\text{sen } \beta} = n,$$

donde  $n$  es el índice de refracción del agua.

De aquí

$$\text{sen } \beta = \frac{\text{sen } \alpha}{n} \approx 0,727.$$

En la tabla de senos hallamos que

$$\beta \approx 46^\circ 33'.$$

Por consiguiente,

$$\theta \approx 75^\circ - 46^\circ 33' \approx 28^\circ 27'.$$

**PROBLEMA 2.** Dibujar la marcha de los rayos a través de un prisma

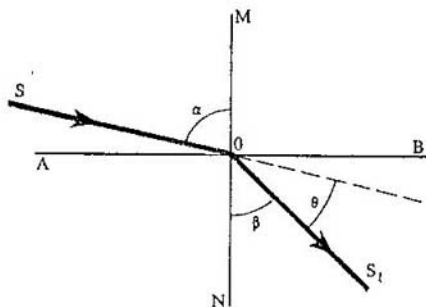


Fig. 149

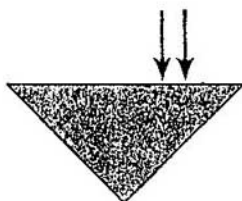


Fig. 150



triangular de vidrio cuya base es un triángulo rectángulo isósceles. Los rayos inciden perpendicularmente sobre la cara más ancha del prisma (fig. 150).

*Solución.* Al pasar por la cara ancha los rayos no cambian de dirección, porque el ángulo de incidencia es nulo. Sobre la cara derecha estrecha los rayos sufren la reflexión total, porque el ángulo de incidencia es igual a  $45^\circ$  y, por lo tanto, mayor que el de reflexión total para el vidrio. Después de su reflexión total en la cara derecha, los rayos inciden sobre la cara izquierda, sufren por segunda vez la reflexión total y salen del prisma en dirección perpendicular a la cara ancha. De este modo, la dirección del haz de luz, en este caso, cambia en  $180^\circ$ . Esta marcha de los rayos se utiliza, por ejemplo, en los gemelos prismáticos.

**PROBLEMA 3.** Determinar cuántas veces mayor es la profundidad real de una alberca que la aparente, si se mira verticalmente hacia abajo.

*Solución.* Se dibuja la marcha de los rayos que salen del punto  $S$  de la alberca y llegan al ojo del observador (fig. 151). Como la observación se hace verticalmente, uno de los rayos,  $SA$ , se dirige perpendicularmente a la superficie del agua, y el otro,  $SB$ , formando un pequeño ángulo  $\alpha$  con la perpendicular. (Los rayos que forman ángulos  $\alpha$  grandes no irán a parar al ojo.) Después de refractarse en la superficie del agua los rayos forman un haz divergente. El vértice de éste haz es la imagen virtual  $S_1$  del punto  $S$ .

El ángulo  $ASB$  es igual al ángulo de incidencia  $\alpha$  (por ser alterno interno), y el ángulo  $AS_1B$  es igual al de refracción  $\beta$  (por ser correspondiente con rectas paralelas). Los triángulos rectángulos  $ASB$  y  $AS_1B$  tienen común el cateto  $AB$ , que puede expresarse por medio de la profundidad real de la alberca  $|SA| = H$  o por medio de la profundidad aparente  $|S_1A| = h$ :

$$|AB| = H \operatorname{tg} \alpha = h \operatorname{tg} \beta.$$

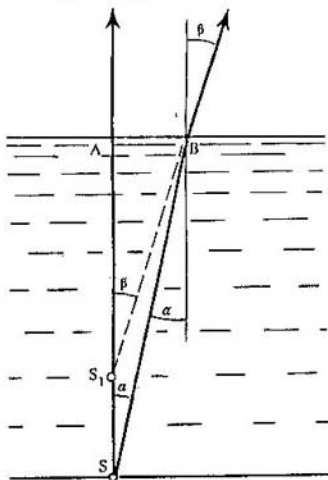
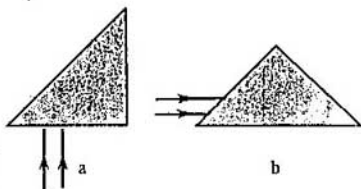


Fig. 151

Fig. 152



De aquí

$$\frac{H}{h} = \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha}$$

Como los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$  son pequeños,

$$\frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha} \approx \frac{\operatorname{sen} \beta}{\operatorname{sen} \alpha} = n.$$

Por consiguiente,

$$\frac{H}{h} = n.$$

La profundidad real de la alberca es  $n = 1,3$  veces mayor que la aparente.

Ejercicio  
g

1. Calcular el índice de refracción del agua respecto del diamante y del bisulfuro de carbono respecto del hielo.
2. El ángulo de incidencia de unos rayos paralelos sobre un lámina de vidrio de caras paralelas es igual a  $60^\circ$ . Hallar la distancia entre los puntos por los cuales emergen de la lámina los rayos paralelos, si la distancia entre los rayos que pasan a través de la lámina es igual a 0,7 cm.
3. Si un objeto cualquiera se mira a través de un prisma triangular, la imagen parece desviada. ¿Hacia qué lado?
4. Un rayo de luz que viene de dentro del agua sufre la reflexión total en la superficie de ésta. ¿Saldrá el rayo al aire si sobre la superficie del agua se deposita una capa de aceite de cedro?
5. La sección de un prisma es un triángulo equilátero. Un rayo pasa a través del prisma refractándose en puntos equidistantes del vértice. ¿Cuál es el valor máximo permisible del índice de refracción  $n$  de la sustancia del prisma?
6. Represente la marcha de los rayos a través de un prisma triangular de vidrio cuya base es un triángulo rectángulo isósceles. Los rayos inciden sobre el prisma como se indica en las figs. 152, *a* y *b*. ¿Seguirá siendo la misma la marcha de los rayos si el prisma se sumerge en agua?

## 6.7. Lente

Hasta ahora hemos considerado la reflexión de la luz en el límite de separación plano de dos medios. Pero en la práctica se utiliza mucho la refracción en superficies esféricas.

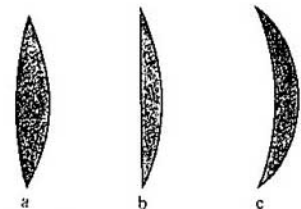


Fig. 153

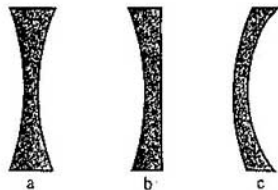


Fig. 154

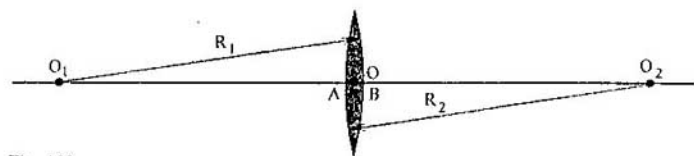


Fig. 155

Un cuerpo transparente limitado por dos superficies esféricas se llama lente.

**TIPOS DE LENTES.** Una lente puede estar limitada por dos superficies esféricas convexas (lente biconvexa, fig. 153, a), por una superficie esférica convexa y otra plana (lente plano-convexa, fig. 153, b) o por una superficie esférica convexa y otra cóncava (lente cóncavo-convexa, fig. 153, c). Todas estas lentes son más gruesas en el centro que en los bordes y reciben el nombre de lentes *convexas*.

Las lentes que en el centro son más delgadas que en los bordes se llaman *cóncavas*. En la fig. 154 se ven tres tipos de lentes cóncavas: bicóncava, a; plano-cóncava, b y convexo-cóncava, c.

**LENTE DELGADA.** Vamos a estudiar el caso más simple, en el cual el espesor de la lente  $l = |AB|$  es despreciable por su pequeñez en comparación con los radios  $R_1$  y  $R_2$  de las superficies de la lente (fig. 155) y con la distancia del objeto a la lente. Esta lente se llama *delgada*. En adelante, siempre que se hable de lentes, se sobreentiende que se trata de lentes delgadas.

Los puntos A y B, vértices de los segmentos esféricos, están tan próximos entre sí en la lente delgada que pueden tomarse por uno solo, al que se da el nombre de *centro óptico de la lente* y se designa por medio de la letra O. El rayo de luz que pasa a través del centro óptico de la lente prácticamente no se refracta.

La recta  $O_1O_2$  que pasa por los centros de curvatura de las superficies esféricas que limitan la lente se llama *eje óptico principal*. Este eje en una lente delgada pasa por el centro óptico. Cualquiera otra recta que pase por el centro óptico de ella recibe el nombre de *eje óptico secundario* (fig. 156).

**IMAGEN CREADA POR UNA LENTE.** De un modo semejante al espejo plano, la lente crea imágenes de las fuentes luminosas. Esto significa que la luz de un punto cualquiera de un objeto (fuente), una vez refractada en la lente,

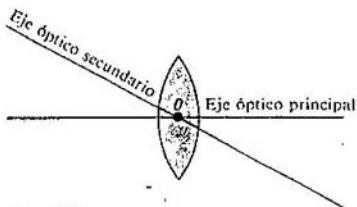


Fig. 156

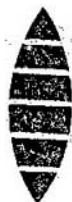


Fig. 157

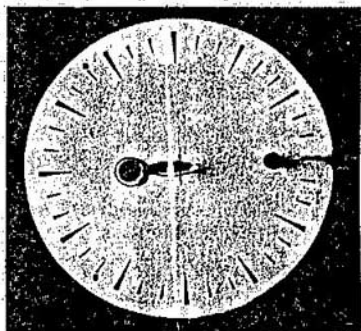


Fig. 158

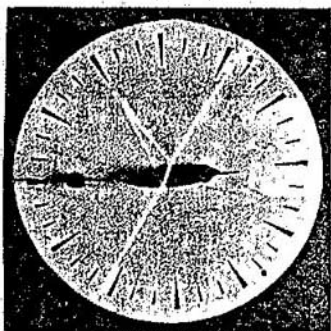


Fig. 159

vuelve a convergir en un punto (imagen), con independencia de la parte de la lente a través de la cual pasaron los rayos. Si al emerger de la lente los rayos convergen, forman una imagen real. En el caso en que los rayos después de pasar por la lente divergen, se intersecan en un punto no los propios rayos, sino sus prolongaciones. La imagen es entonces virtual. Esta imagen se puede observar a simple vista o valiéndose de aparatos ópticos<sup>1)</sup>.

**LENTE CONVERGENTE.** Por lo general, las lentes se hacen de vidrio. Las lentes convexas son convergentes. Cualquiera de ellas se puede representar esquemáticamente como un conjunto de prismas de vidrio (fig. 157). En el aire cada prisma desvía los rayos hacia su base. Todos los rayos que pasan a través de la lente se desvían hacia el eje óptico principal de ésta.

La refracción de los rayos en una lente convergente se puede observar experimentalmente. La lente se sujeta en el disco (véanse los §§ 6.4, 6.5, 6.6). Primero se dirige el rayo a lo largo del eje óptico principal y se comprueba que pasa a través de la lente sin refractarse (fig. 158). Luego se hace pasar el rayo a lo largo de un eje secundario (es decir, también a través del centro óptico) y sólo se observa un pequeño corrimiento paralelo del rayo refractado (fig. 159).

<sup>1)</sup> Los rayos o sus prolongaciones se cortan prácticamente en un punto si forman ángulos pequeños con el eje óptico principal.



Fig. 160

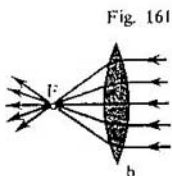
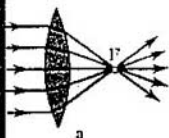


Fig. 161

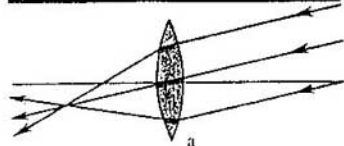


Fig. 162

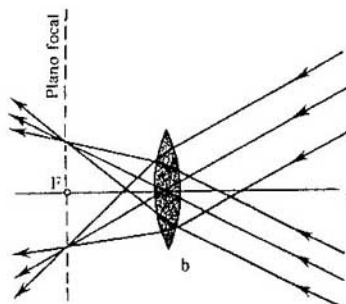
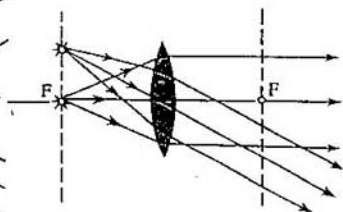


Fig. 163



Después de esto se dirigen verticalmente desde la lámpara a la lente tres rayos paralelos. Una vez refractados, salen de la lente y se cortan en un punto (fig. 160).

*El punto en que se cortan después de refractarse en una lente convergente los rayos que inciden sobre ella siendo paralelos al eje óptico principal se llama foco principal de la lente. Este punto se designa con la letra F (fig. 161, a).*

Los rayos paralelos al eje óptico principal se pueden dirigir sobre la lente por el lado opuesto. El punto en que se encuentran después de pasar por la lente será el segundo foco principal (fig. 161, b).

Así, pues, una lente tiene dos focos principales. En un medio homogéneo estos focos están situados a ambos lados de la lente y a una misma distancia de

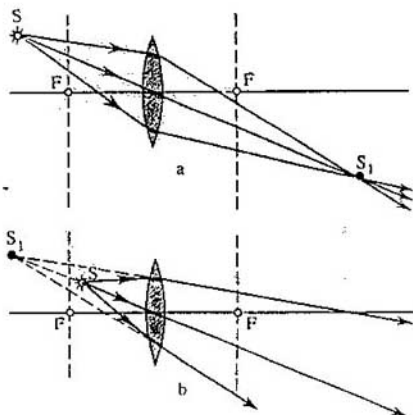


Fig. 164

ella. Esta distancia recibe el nombre de *distancia focal de la lente* y de ordinario se designa también con la letra  $F$  (lo mismo que los focos).

Ahora se lanzan tres rayos paralelos de la lámpara de manera que formen ángulo con el eje óptico principal. En este caso vemos que la intersección no se produce en el foco principal, sino en otro punto (fig. 162, a). Pero es interesante que los puntos de intersección de los rayos que inciden sobre la lente en haces paralelos, formando ángulos distintos con el eje óptico principal, se encuentran en un plano perpendicular a dicho eje que pasa por el foco principal (fig. 162, b). Este plano se denomina *plano focal*. Si un punto luminoso se coloca en el foco de la lente (o en cualquier punto del plano focal), después de la refracción se obtiene rayos paralelos (fig. 163). Si el punto luminoso se aleja de la lente, los rayos detrás de ésta se hacen convergentes y dan una imagen real (fig. 164, a). En cambio, cuando el punto luminoso se encuentra más cerca de la lente que el foco, los rayos refractados divergen y la imagen que se obtiene es virtual (fig. 164, b).

**LENTE DIVERGENTE.** Las lentes convexas son divergentes. Sujtemos una de estas lentes al disco de pruebas y dirijamos sobre ella rayos paralelos al eje óptico principal. Los rayos refractados divergen (fig. 165) y sus prolongaciones se cortan en el foco principal de la lente divergente. En este caso el foco principal es virtual (fig. 166, a) y se encuentra a la distancia  $F$  de la lente. El segundo foco principal se encuentra al otro lado de la lente y la misma distancia de ella, si el medio es el mismo a ambos lados de la lente (fig. 166, b).

**POTENCIA ÓPTICA DE UNA LENTE.** La magnitud recíproca de la distancia focal se llama *potencia óptica* (o *dióptrica*) de la lente. Se simboliza con la letra  $D$ :

$$D = \frac{1}{F} \quad (6.14)$$

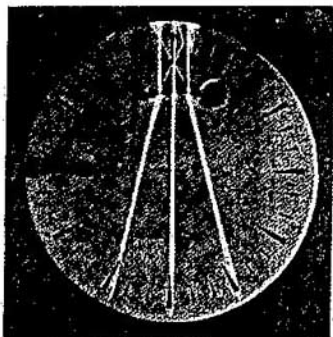


Fig. 165

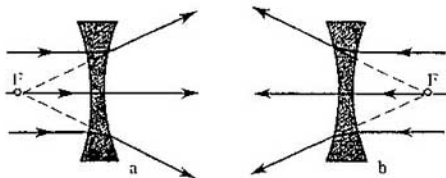


Fig. 166

Cuanto más cerca de la lente se encuentran sus focos, tanto mayor es la intensidad con que ésta refracta los rayos, haciéndolos converger o diverger, y tanto mayor en valor absoluto es la potencia óptica de la lente.

La potencia óptica  $D$  de una lente se expresa en DIOPTRÍAS (dptr). Tiene la potencia óptica de 1 dptr una lente de distancia focal igual a 1 m.

## 6.8. Construcción de la imagen producida por una lente

Las propiedades de una lente delgada quedan determinadas principalmente por la posición de sus focos. Esto significa que, conociendo la distancia desde el objeto hasta la lente y la distancia focal (o posición de los focos), se puede determinar la distancia hasta la imagen, sin recurrir al estudio de la marcha de los rayos dentro de la lente. En virtud de esto no es de rigor la necesidad de representar en el dibujo la forma exacta de las superficies esféricas de la lente. La lente convergente se representa convencionalmente como muestra la fig. 167, y la divergente, como se ve en la fig. 168.

Ya se sabe que todos los rayos que parten de cualquier punto del objeto, después de pasar por la lente se cortan también en un punto. Precisamente en virtud de esta propiedad la lente delgada da una imagen de cualquier punto del objeto y, por consiguiente, de todo el objeto en conjunto.

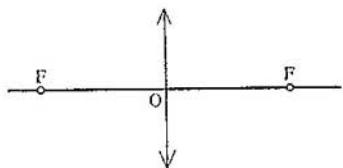


Fig. 167

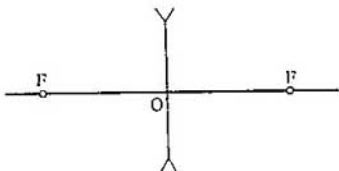


Fig. 168

Para construir las imágenes que se obtienen por medio de una lente convergente, cuyos focos y centro óptico se dan, vamos a utilizar con preferencia los tres tipos de rayos "más convenientes". Como se dijo en el párrafo anterior, los rayos paralelos al eje óptico principal, después de refractarse en la lente, pasan por el foco. De la reversibilidad de la marcha de los rayos se sigue que los rayos que van hacia la lente pasando por su foco, después de refractarse siguen la dirección paralela al eje óptico principal. Finalmente, los rayos que pasan por el eje óptico de la lente no cambian de dirección, sino que sólo sufren un desplazamiento paralelo que, en el caso de una lente delgada, es muy pequeño y se puede despreciar.

Construyamos la imagen del objeto  $AB$  (fig. 169). Para hallar la imagen del punto  $A$ , se dirige un rayo  $AC$  paralelo al eje óptico principal. Después de refractarse, este rayo pasa por el foco de la lente. Otro rayo, el  $AD$ , se puede dirigir de modo que pase por el foco. Una vez refractado, este rayo sigue una dirección paralela al eje óptico principal. En el punto de intersección de estos dos rayos se encontrará la imagen  $A_1$  del punto  $A$ . Así se pueden construir también todos los demás puntos de la imagen. Pero no debe pensarse que la imagen la crean dos o tres rayos; la crea todo el conjunto de innumerables rayos que parten del punto  $A$  y convergen en el punto  $A_1$ . En particular, al punto  $A_1$  llega el rayo  $AOA_1$ , que pasa por el centro óptico  $O$  de la lente. Así, pues, para construir la imagen de un punto se pueden utilizar dos cualesquiera de los tres rayos "más convenientes", cuyas marchas a través de la lente se conocen: 1) el rayo que pasa por el centro óptico, 2) el rayo que incide sobre la lente siendo paralelo al eje óptico principal, y 3) el rayo que pasa por el foco.

Consideremos también el caso en que es necesario construir la imagen de un punto situado en el eje óptico principal. La dificultad consiste en este caso en

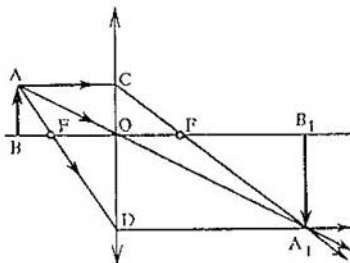


Fig. 169



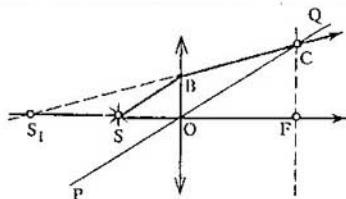


Fig. 170

que los tres rayos "más convenientes" se confunden en el rayo  $SF$ , que coincide con el eje óptico principal. Por eso se plantea la necesidad de determinar la marcha de un rayo arbitrario  $SB$  (fig. 170) que incide sobre la lente en el punto  $B$ . Para construir el rayo refractado se traza un eje óptico secundario  $PQ$ , paralelo al rayo  $SB$ . Luego se construye el plano focal y se halla el punto  $C$  de intersección de éste con el eje óptico secundario. Por este punto pasa el rayo refractado  $BC$ . Así se ha construido la marcha de dos rayos que parten del punto  $S$ . Después de la refracción en la lente estos rayos divergen. La imagen  $S_1$  del punto  $S$  será virtual, ya que el objeto se encuentra entre el foco y la lente.

## 6.9. Fórmula de la lente delgada. Aumento de la lente

Vamos a deducir una fórmula que relaciona tres magnitudes: la distancia  $d$  del objeto a la lente, la distancia  $f$  de la imagen a la lente y la distancia focal  $F$ .

De la semejanza de los triángulos  $AOB$  y  $A_1B_1O$  (véase la fig. 169) se sigue la relación

$$\frac{|BO|}{|OB_1|} = \frac{|AB|}{|A_1B_1|}.$$

De la semejanza de los triángulos  $COF$  y  $FA_1B_1$  se tiene:

$$\frac{|CO|}{|A_1B_1|} = \frac{|OF|}{|FB_1|}.$$

Como  $|AB| = |CO|$ , resulta que

$$\frac{|AB|}{|A_1B_1|} = \frac{|OF|}{|FB_1|}.$$

De donde

$$\frac{|BO|}{|OB_1|} = \frac{|OF|}{|FB_1|},$$

o bien

$$\frac{d}{f} = \frac{F}{f - F}.$$

Después de unas simples transformaciones, se obtiene:

$$fF + Fd = fd.$$

Dividiendo por el producto  $Ffd$  todos los términos de esta igualdad, resulta:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}, \quad (6.15)$$

o bien

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = D. \quad (6.16)$$

La relación (6.15) ó (6.16) recibe el nombre de *fórmula de la lente delgada*. Las magnitudes  $d, f$  y  $F$  pueden ser tanto positivas como negativas. Diremos (sin entrar en demostraciones) que cuando se aplica la fórmula de la lente delgada los signos de los términos deben ponerse de acuerdo con la regla siguiente: si la lente es convergente, su foco es real y delante del miembro  $1/|F|$  se pone el signo "más". En el caso de una lente divergente,  $F < 0$  y en el segundo miembro de la fórmula (6.15) figurará la magnitud negativa  $-1/|F|$ . Delante del término  $1/|f|$  se pone el signo "más" si la imagen es real, y el signo "menos", si es virtual. Finalmente, delante del término  $1/|d|$  se pone el signo "más" en el caso de un punto luminoso real, y "menos" si dicho punto es virtual (es decir, si sobre la lente incide un haz de rayos cuyas prolongaciones se cortan en un punto).

Cuando  $F, f$  o  $d$  se desconocen, delante del término correspondiente  $1/F, 1/f$  ó  $1/d$  se pone el signo "más". Pero si como resultado del cálculo de la distancia focal o de la distancia de la lente a la imagen o al objeto se obtiene una magnitud negativa, esto significa que el foco, la imagen o el objeto son virtuales.

**AUMENTO DE UNALENTE.** Las dimensiones de la imagen que produce la lente difieren, por lo general, de las del objeto. La diferencia de dimensiones del objeto y la imagen se caracterizan por el *aumento*.

Se llama *aumento lineal* la razón de la dimensión lineal de la imagen a la dimensión lineal del objeto.

Para hallar el aumento lineal vamos a utilizar otra vez la fig. 169. Si la altura del objeto  $AB$  es  $h$  y la altura de la imagen  $A_1B_1$  es  $H$ ,

$$\Gamma = \frac{H}{h} \quad (6.17)$$

es el aumento lineal.

De la semejanza de los triángulos  $OAB$  y  $OA_1B_1$  se infiere que

$$\frac{H}{h} = \frac{|f|}{|d|}.$$

Por consiguiente, el aumento de la lente es igual a la razón de la distancia desde la imagen a la lente, a la distancia de la lente al objeto:

$$\Gamma = \frac{|f|}{|d|}. \quad (6.18)$$

¿ ?

1. ¿Qué lente se llama delgada?
2. ¿A qué se llama foco principal de una lente?
3. Escriba la fórmula de la lente.
4. ¿Qué rayos son más convenientes para construir la imagen que produce una lente?
5. ¿A qué se llama aumento de una lente?

## 6.10. Cámara fotográfica. Aparato de proyección

En las leyes de la óptica geométrica se basa la estructura y el funcionamiento de diversos aparatos ópticos. En primer lugar vamos a estudiar aquellos en que la imagen que se obtiene es real. Para fijar y conservar esta imagen se aprovecha la propiedad química de la luz.

La fotografía fue inventada en los años 30 del siglo XIX y ha recorrido un largo camino de perfeccionamiento. La fotografía moderna, de formato pequeño, instantánea, en color, estereoscópica, se emplea mucho en todas las esferas de la vida. Su papel en la investigación de la naturaleza es grande. La fotografía permite registrar objetos diferentes (desde microscópicos hasta cósmicos), radiaciones invisibles, etc. Para todos es conocida la importancia de la fotografía artística, de la que desciende el cinematógrafo.

**CÁMARA FOTOGRAFICA.** Las partes fundamentales de un aparato fotográfico son la cámara oscura y un sistema de lentes llamado objetivo. El objetivo más simple es una lente convergente. El objetivo crea cerca de la pared trasera de la cámara una imagen real invertida del objeto que se fotografía. En la mayoría de los casos el objeto se encuentra a una distancia mayor que el doble de la distancia focal. En estas condiciones la imagen que se obtiene resulta disminuida. En el plano en que se forma la imagen se coloca una placa o película recubierta de sustancia sensible a la acción de la luz, que recibe el nombre de emulsión fotográfica.

El objeto que se fotografía puede estar a distancias diferentes de la cámara. Por lo tanto, la distancia entre el objetivo y la película también debe variar. Esta variación se consigue, de ordinario, desplazando el objetivo por medio de una rosca helicoidal o alargando y acortando la cámara (para lo cual las paredes del aparato se hacen en forma de "fuelle").

La energía luminosa que incide sobre la capa sensible a la luz se dosifica por medio del *obturador*. Éste deja pasar la luz sólo durante un tiempo determinado (*tiempo de exposición*). El tiempo de exposición depende de la sensibilidad de la emulsión fotográfica y de la iluminación de la película. Se comprende fácilmente que la película estará tanto más iluminada cuanto mayores sean las



Cámara fotográfica moderna

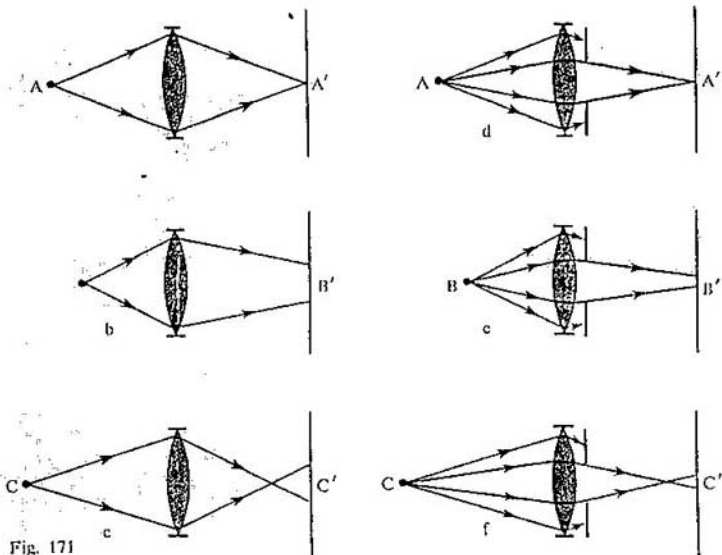


Fig. 171

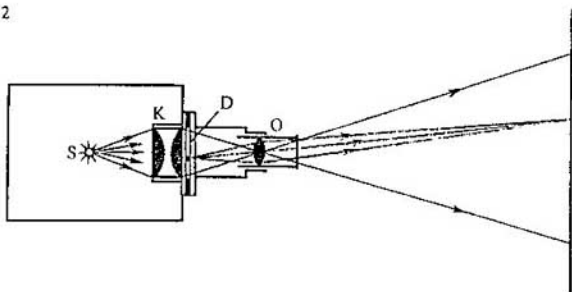
dimensiones de las lentes del objetivo y cuanto más cerca del objetivo se encuentre la capa sensible a la luz. El diámetro de la abertura útil del objetivo se puede variar valiéndose del *diafragma*, con lo que se regula la iluminación de la película fotográfica. Pero el diafragma desempeña además otra función.

Supongamos que se quiere fotografiar un punto luminoso  $A$ , situado a cierta distancia del aparato, y que la imagen de este punto que se obtiene sobre la película es también un punto (fig. 171, *a*). Entonces la imagen del punto  $B$  que está más cerca del objetivo (fig. 171, *b*), así como la imagen del punto  $C$  que se encuentra más lejos (fig. 171, *c*), se obtienen en forma de círculos pequeños. Si delante del objetivo se coloca un diafragma (figs. 171, *d, e, f*), el diámetro de estos círculos será tanto menor cuanto más pequeño sea el diámetro de la abertura útil del objetivo (compárense las figs. 171, *b y c* con las figs. 171 *e y f*). Disminuyendo la abertura del diafragma, se puede conseguir que las imágenes de los puntos que se encuentran a diferentes distancias del aparato sean suficientemente nítidas.

Con esto, como suele decirse, aumenta la *profundidad de campo*.

**APARATO DE PROYECCIÓN.** Sirve para obtener sobre una pantalla la imagen real, aumentada, de un objeto. Éste puede ser un dibujo o una fotografía hecha sobre base transparente (*diapositiva*) que se ilumina por detrás. El esquema de la estructura de un aparato de proyección se da en la fig. 172. La imagen de la diapositiva  $D$  se crea sobre la pantalla por medio del *objetivo*  $O$ . El

Fig. 172



sistema de lentes *K*, llamado *condensador*, sirve para concentrar la luz de la fuente sobre la diapositiva. El objetivo proyecta la diapositiva iluminada sobre la pantalla. La marcha de los rayos desde la diapositiva hasta la pantalla se representa en la figura.

El aumento del aparato de proyección se puede variar acercando el objetivo a la diapositiva o alejándolo de ella y cambiando al mismo tiempo la distancia desde el aparato hasta la pantalla.

También existen aparatos de proyección que permiten obtener sobre la pantalla las imágenes de objetos tanto transparentes como opacos. Estos aparatos combinados se conocen con el nombre de *epidiascopios*. Para obtener la imagen de un objeto opaco, como, por ejemplo, del dibujo de un libro, se ilumina éste intensamente y se proyecta sobre la pantalla.

## 6.11. Ojo. Lentes

**OJO.** El ojo humano tiene la forma de un globo casi esférico (fig. 173). Su diámetro es de cerca de 2,5 cm. Por fuera está revestido de una cubierta protectora *1*, de color blanco, denominada *esclerótica*. La parte delantera transparente *2* se llama *córnea transparente* o simplemente *córnea*. En el esquema de la estructura del ojo se ve que detrás de la córnea,

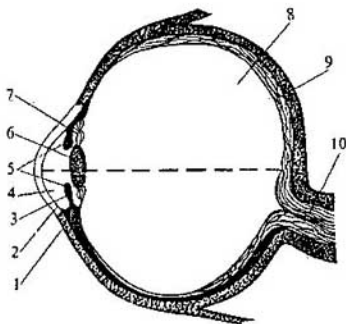


Fig. 173

a cierta distancia, se encuentra el *iris* 3, teñido de color por una sustancia especial. Entre la córnea y el iris se encuentra el *humor acuoso* 4. El iris tiene una abertura central 5 que recibe el nombre de *pupila*. En dependencia de la intensidad de la luz incidente, el diámetro de la pupila varía accionado por un mecanismo reflejo desde 2 hasta 8 mm. Este proceso es semejante a la variación del diafragma en la cámara fotográfica. Detrás de la pupila está el *crystalino* 6, que es un cuerpo laminar transparente parecido a una lente. Un músculo especial (músculo ciliar) 7 puede hacer que, entre ciertos límites, cambie la forma del cristalino, aumentando su convexidad cuando se miran objetos próximos. La parte restante del ojo, hasta la pared posterior (fondo del ojo), la llena una masa gelatinosa denominada *humor o cuerpo vítreo* 8. El fondo del ojo está cubierto de una membrana muy compleja llamada *retina* 9, formada por las ramificaciones del nervio óptico 10, cuyas extremidades tienen la forma de *bastoncitos* y de *conos*. Los bastoncitos y los conos son los elementos sensibles a la luz.

Los rayos de luz que inciden sobre el ojo experimentan la refracción máxima en la superficie de la córnea, una pequeña refracción adicional sufren en el cristalino. En conjunto, el sistema óptico del ojo puede considerarse como una lente convergente con distancia focal variable y "profundidad" (distancia desde la lente a la pantalla) constante. De "pantalla", sobre la cual se forma la imagen real invertida del objeto que se mira, sirve la retina. La irritación de las extremidades nerviosas (bastoncitos y conos) por la luz incidente provoca la sensación visual.

Si el objeto está muy lejos, la imagen se forma sobre la retina del ojo normal, sin que los músculos ciliares hagan ningún esfuerzo. Pero cuando el objeto se acerca se produce la compresión del cristalino y la distancia focal disminuye lo necesario para que el plano de la imagen vuelva a coincidir con la retina. Esto se logra en virtud de un esfuerzo reflejo del músculo, que hace que varíe la curvatura del cristalino. Esta adaptación del ojo a la variación de la distancia hasta el objeto que se mira recibe el nombre de *acomodación del ojo*. Al acercarse el objeto aumenta el ángulo visual  $\varphi$  (fig. 174), bajo el cual se ven dos puntos próximos del objeto. Cuando este ángulo se hace mayor que un minuto, las imágenes de los puntos inciden sobre distintas extremidades nerviosas y los vemos separados. No obstante, aproximar el objeto al ojo hasta una distancia muy pequeña para poder distinguir sus detalles mínimos, no tiene sentido, ya que la acomodación del ojo es limitada, es decir, tiene su *punto próximo límite de acomodación*.

La distancia mínima del objeto al ojo, con la cual se pueden distinguir los detalles de aquél sin esforzar mucho el ojo, se llama *distancia de visión óptima*. Para el ojo normal la distancia de visión óptima se estima igual a 25 cm. A distancias menores una persona con vista normal sólo con dificultad puede acomodar su ojo.

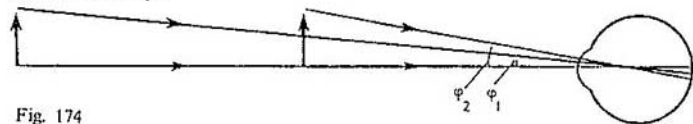


Fig. 174

Fig. 176

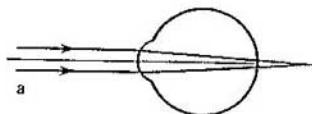
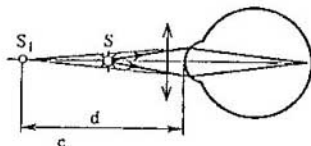
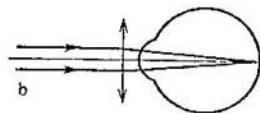
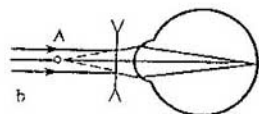
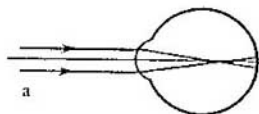


Fig. 175



El punto lejano de acomodación del ojo normal se encuentra infinitamente lejos. Este punto corresponde al estado relajado del ojo.

El ojo humano está provisto de músculos que lo hacen girar de modo que su eje se dirija al objeto que se mira. Los esfuerzos que hacen los músculos del ojo izquierdo se diferencian tanto más de los que hacen los del derecho cuanto más cerca está el objeto. Además, las imágenes de un objeto próximo sobre las retinas de los ojos derecho e izquierdo difieren algo entre sí. Esto ofrece a la persona la posibilidad de apreciar la distancia que hay hasta el objeto o hasta sus partes y crea la sensación de volumen del cuerpo que se observa.

**LENTEs.** Los ojos de muchas personas crean, en estado de relajación, la imagen de un objeto lejano no sobre la retina, sino delante de ella (fig. 175, a). Estas personas no pueden ver nitidamente los objetos que están lejos. Este defecto de la vista se llama *miopía*. Los miopes sólo ven los objetos nitidamente a partir de cierta distancia. Su punto lejano de acomodación del ojo se encuentra no en el infinito. Respectivamente también es menor la distancia de visión óptima. La miopía se corrige usando lentes o gafas con lentes divergentes. Los rayos paralelos, después de pasar por una de estas lentes, son percibidos como si procedieran del punto lejano de acomodación del ojo (punto A en la fig. 175, b). Por eso un miope con lentes (gafas) puede ver los objetos lejanos lo mismo que una persona con vista normal, es decir, sin hacer esfuerzo.

El defecto de la vista que hace que las imágenes de los objetos lejanos se formen detrás de la retina (fig. 176, a) recibe el nombre de *hipermetropía*. El hipermetrope tiene que esforzarse ya para ver objetos lejanos, y cuando observa objetos próximos su acomodación se agota a distancias mayores de 25 cm.

La hipermetropía se corrige usando lentes convergentes. Para observar los objetos lejanos la potencia óptica de la lente debe ser tal que los rayos paralelos

se enfoquen sobre la retina (fig. 176, *b*). Los rayos procedentes de un objeto que se encuentre a la distancia de 25 cm (fig. 176, *c*) al pasar a través de esta lente se hacen menos divergentes. El objeto parecerá que está a la distancia  $d > 25$  cm (punto  $S_1$ ) a la cual el hipermetrope puede observar los objetos sin hacer esfuerzo apreciable. Por consiguiente, su distancia de visión óptima será la misma que la de un ojo normal.

## 6.12. Lupa. Microscopio

Para que los detalles pequeños del objeto que se observa puedan distinguirse, el ángulo visual debe ser suficientemente grande. El ángulo visual se podría aumentar aproximando el objeto al ojo si la acomodación no tuviera límite.

LUPA. El aumento del ángulo visual sin esforzar el ojo se consigue por medio de instrumentos ópticos. Como se ve en la fig. 174, a un ángulo de visión mayor corresponde una imagen también mayor en la retina. Cuando los ángulos son pequeños, la razón de las dimensiones de las imágenes son aproximadamente iguales a la razón de los ángulos de visión.

La razón del ángulo de visión, cuando el objeto se observa a través de un instrumento óptico, al ángulo de visión cuando se observa a simple vista se toma como característica del instrumento óptico con el nombre de *aumento angular*.

El ángulo bajo el cual se ve el objeto a simple vista (fig. 177, *a*) es

$$\varphi = \frac{h}{d_0}$$

donde  $d_0 = 25$  cm es la distancia de visión óptima;  $h$ , la dimensión lineal del objeto.

El procedimiento más sencillo para aumentar el ángulo de visión, cuando se observan objetos pequeños, es utilizar una *lupa*. Se llama lupa una lente convergente, o un sistema de lentes, de distancia focal  $F$  pequeña (por lo general

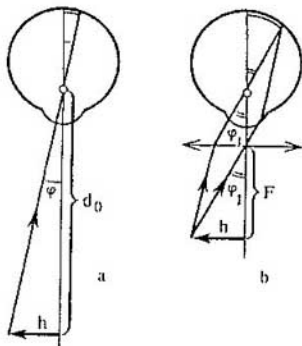


Fig. 177



no mayor de 10 cm). La lupa se sitúa generalmente cerca del ojo, y el objeto se coloca en el plano focal de la lente. En este caso los rayos de cualquier punto del objeto, después de emerger de la lupa, forman haces paralelos (fig. 177, b). Por consiguiente, la imagen nítida de los puntos sobre la retina se obtiene sin esforzar el ojo. En la lupa el objeto se ve bajo el ángulo

$$\varphi_1 = \frac{h}{F}.$$

Hallemos el aumento angular de la lupa

$$\Gamma = \frac{\varphi_1}{\varphi}. \quad (6.19)$$

Para esto sustituyamos aquí  $\varphi_1$  y  $\varphi$  por sus expresiones:

$$\Gamma = \frac{h/F}{h/d_o} = \frac{d_o}{F}. \quad (6.20)$$

Colocando el objeto más cerca que el plano focal, se puede obtener un aumento un poco mayor que cuando el objeto está en dicho plano. Pero esto requiere ya esfuerzo del ojo.

**MICROSCOPIO.** El aumento de la lupa es limitado, porque una distancia focal muy pequeña sólo puede tenerla una lente de diámetro pequeño, cuyo empleo es difícil. Un aumento mayor se puede conseguir utilizando otra lente más. Esta segunda lente se llama *objetivo*. El objetivo produce una imagen real, aumentada, del objeto, la cual se observa después con la lupa, que en este caso recibe el nombre de *ocular*. El instrumento óptico que funciona según este esquema se denomina *microscopio*.

Para obtener la imagen real, aumentada, el objeto se coloca entre el foco del objetivo y un punto que se halla a una distancia igual al doble de la focal. La observación por el ocular conviene hacerla sin forzar el ojo. Para esto el ocular se sitúa de tal modo que la imagen que produce el objetivo se encuentre en el plano focal del ocular. La marcha de los rayos en el microscopio se representa en la fig. 178. En ella se muestran dos rayos que parten del punto  $A$  del objeto y crean la imagen real intermedia  $A_1$ . Cuando estos rayos inciden sobre la lente ocular, se refractan en ella y llegan al ojo formando un haz paralelo, que crea sobre la retina la imagen  $A_2$ . El microscopio da la posibilidad de distinguir detalles pequeños de los objetos, que observados a simple vista se confunden.

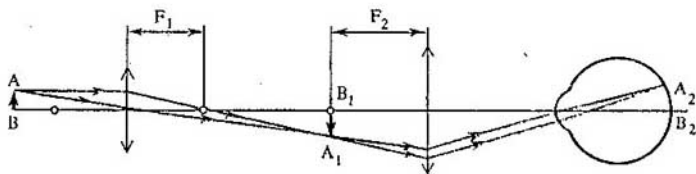


Fig. 178

## Ejemplos de resolución de problemas

**PROBLEMA 1.** En la fig. 179 se da la posición del eje óptico principal  $MN$  de una lente, la posición del punto luminoso  $S$  y de su imagen  $S_1$ . Hallar, por construcción, el centro óptico de la lente y sus focos. Determinar si la lente es convergente o divergente y si la imagen es real o virtual.

*Solución.* El rayo que pasa por el centro óptico de la lente no se desvía de su dirección. Por lo tanto, el centro óptico  $O$  coincide con el punto de intersección de las rectas  $SS_1$  y  $MN$  (fig. 180). Se traza el rayo  $SK$  paralelo al eje óptico principal. El rayo refractado  $KS_1$  pasa por el foco. Sabiendo que el rayo que incide sobre la lente pasando por el foco sale paralelo al eje óptico principal, hallamos el segundo foco. La lente es convergente y la imagen, real.

**PROBLEMA 2.** La imagen del objeto en la diapositiva tiene la altura  $h = 2$  cm. ¿Qué distancia focal  $F$  debe tener el objetivo del aparato de proyección, situado a la distancia  $f = 4$  m de la pantalla, para que la imagen del objeto indicado tenga en la pantalla la altura  $H = 1$  m?

*Solución.* Por la fórmula

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$$

hallamos la distancia focal:

$$F = \frac{df}{d+f}$$

El aumento de la lente se expresa así;

$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}$$

De donde

$$d = \frac{hf}{H}$$

Por lo tanto

$$F = \frac{hf}{H+h} \approx 8 \text{ cm.}$$

**PROBLEMA 3.** Determinar la potencia óptica de los lentes de un hipermetrope para el cual la distancia de visión óptima  $d = 1$  m. La distancia de visión óptima del ojo normal considérese que es  $d_0 = 0,25$  m.

✱ S

M  N

Fig. 179

o  $S_1$

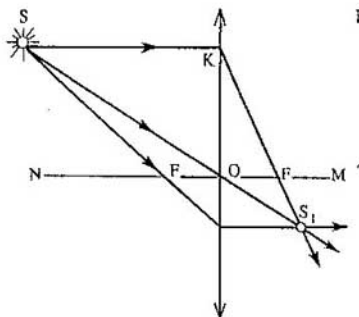


Fig. 180

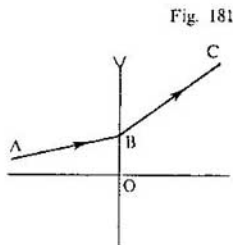


Fig. 181

*Solución.* Observando a través de los lentes un objeto situado a la distancia  $d_0$ , el hipermetrope ve su imagen virtual, que se encuentra a la distancia  $d$  del ojo (véase la fig. 176, c).

Aplicando la fórmula de la lente y despreciando la distancia de los lentes al ojo, hallamos:

$$D = \frac{1}{F} = \frac{1}{d_0} - \frac{1}{d} = \frac{d - d_0}{d_0 d} = 3 \text{ dptr.}$$

### Ejercicio 9

- La imagen de la división milimétrica de una escala, colocada delante de una lente a la distancia  $d = 12,5$  cm, tiene en la pantalla la longitud  $L = 2,4$  cm. ¿Cuál es la distancia focal de la lente?
- Por medio de una lente se obtiene en la pantalla la imagen real de una lámpara eléctrica. ¿Cómo variará la imagen si se tapa la mitad derecha de la lente?
- Una cámara fotográfica crea sobre la película la imagen del rostro de una persona. Explique, valiéndose de un dibujo, por qué la imagen del bosque que se divisa a lo lejos, detrás de la persona, no es nítida. ¿Hacia qué parte habría que desplazar el objetivo para que la imagen del bosque fuera nítida? ¿Sería nítida la imagen del rostro en este caso?
- ¿Por qué un buceador sin careta protectora ve mal los objetos debajo del agua?
- Construya la imagen de un objeto situado delante de una lente convergente en los casos siguientes: 1)  $d > 2F$ ; 2)  $d = 2F$ ; 3)  $F < d < 2F$  y 4)  $d < F$ .
- En la fig. 181 la línea ABC representa la marcha de un rayo a través de una lente divergente delgada. Determine, por construcción, la posición de los focos principales de la lente.
- Un objeto se encuentra a la distancia  $d = 1,8$  m de una lente convergente. Determine la distancia focal de la lente si la imagen es 5 veces menor que el objeto.
- En la fig. 182 se muestra el eje óptico principal de una lente, un punto luminoso y su imagen. Halle, por construcción, el centro y los focos de la lente. ¿Qué clase de lente es ésta, convergente o divergente? ¿Es real o virtual la imagen? Considere los casos: 1) A es el punto luminoso y B su imagen; 2) B es el punto luminoso y A su imagen.
- Construya la imagen de un punto luminoso, que produce una lente divergente, utilizando los tres rayos "más convenientes".

M N

oB

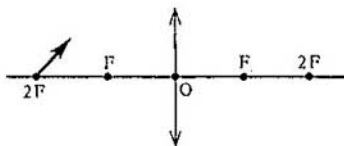


Fig. 182

Fig. 183

- 10.- La distancia focal del objetivo de una linterna de proyección es  $F = 0,25$  m. ¿Qué aumento  $\Gamma$  de la diapositiva proporciona la linterna si la pantalla se encuentra a la distancia  $f = 2$  m del objetivo?
11. Un punto luminoso se encuentra en el foco de una lente divergente. ¿A qué distancia de la lente estará la imagen? Construya la marcha de los rayos.
12. Construya la imagen que, de una flecha corta inclinada hacia el eje óptico, produce una lente convergente. El extremo inferior de la flecha está en el eje óptico principal a una distancia de la lente igual al doble de la distancia focal de ésta (fig. 183).
13. Un alumno se quita sus gafas y lee un libro manteniéndolo a la distancia  $d = 16$  cm de los ojos. ¿Qué potencia óptica tienen sus lentes?

### BREVE RESUMEN DEL CAPÍTULO 6

La luz es una onda electromagnética. Si la longitud de la onda luminosa es mucho menor que las dimensiones de los obstáculos, que encuentra en su camino de propagación, es, con suficiente exactitud, correcta la descripción de los fenómenos por los métodos de la óptica geométrica. El concepto fundamental de la óptica geométrica es el de rayo de luz como línea que indica la dirección en que se propaga la energía luminosa. En un medio homogéneo la luz se propaga rectilíneamente.

Los métodos de medición de la energía luminosa se estudian en la fotometría. Los conceptos fundamentales de la fotometría son: el de flujo luminoso, el de intensidad de la luz y el de iluminación (o iluminancia).

Se llama flujo luminoso  $\Phi$  la energía luminosa, apreciada por la sensación visual que produce, que en la unidad de tiempo pasa a través de una superficie dada.

Recibe el nombre de intensidad de la luz  $I$  de un foco o fuente la razón del flujo luminoso  $\Phi$ , que crea dicha fuente en un ángulo sólido  $\Omega$ , a este mismo ángulo sólido:

$$I = \frac{\Phi}{\Omega}.$$

La iluminación  $E$  es la razón del flujo luminoso  $\Phi$ , que incide sobre una porción determinada de superficie, al área  $S$  de dicha porción de superficie:

$$E = \frac{\Phi}{S}.$$

La iluminación se determina por la fórmula

$$E = \frac{I}{R^2} \cos \alpha,$$

en la que  $I$  es la intensidad de la luz del foco puntual;  $R$ , la distancia desde el foco de luz hasta la superficie iluminada;  $\alpha$ , el ángulo de incidencia de los rayos sobre la superficie. La intensidad de la luz se mide en candelas; el flujo luminoso, en lúmenes; la iluminación, en lux.

Las leyes fundamentales de la óptica geométrica son: la ley de la propagación rectilínea de la luz en un medio homogéneo, la ley de la reflexión y la ley de la refracción.

Según la ley de la reflexión, el rayo incidente, el rayo reflejado y la perpendicular al límite de separación de los dos medios, levantada en el punto de incidencia del rayo, están en un mismo plano y el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia. La ley de la reflexión permite comprender de qué modo se producen las imágenes de los objetos en un espejo.

La ley de la refracción se enuncia como sigue: el rayo incidente, el rayo refractado y la perpendicular al límite de separación de los dos medios, levantada en el punto de incidencia del rayo, están en un mismo plano y la razón del seno del ángulo de incidencia  $\alpha$  al seno del ángulo de refracción  $\beta$  es una magnitud constante para dos medios dados:

$$\frac{\operatorname{sen} \alpha}{\operatorname{sen} \beta} = n,$$

siendo  $n$  el índice de refracción.

Cuando la luz pasa de un medio ópticamente más denso a otro menos denso se observa la reflexión total. Esto ocurre cuando el ángulo de incidencia  $\alpha$  es mayor que el ángulo límite  $\alpha_0$  que se determina de la condición

$$\operatorname{sen} \alpha_0 = \frac{1}{n}.$$

Tienen gran importancia las lentes, que son cuerpos transparentes limitados por superficies esféricas. Las lentes pueden ser convergentes y divergentes.

Si un haz de rayos paralelos incide sobre una lente convergente, se concentra después en un punto llamado foco de la lente. Un haz de rayos paralelos que incida sobre una lente divergente, divergerá después de tal modo que las prolongaciones de los rayos, en sentido contrario al de su propagación, se reunirán en un punto. Este punto también se llama foco, pero en este caso es virtual. La fórmula fundamental de la lente relaciona su distancia focal  $F$  (distancia desde la lente hasta su foco) con la distancia  $d$  desde el objeto hasta la lente y con la distancia  $f$  desde la lente hasta la imagen:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}.$$

Las magnitudes  $F$ ,  $f$  y  $d$  que figuran en la fórmula pueden ser tanto positivas como negativas: son positivos los valores correspondientes a un foco, una imagen y un objeto reales, y negativos, los correspondientes a un foco, una imagen y objeto virtuales.

En las leyes de la óptica geométrica se basa la estructura y el funcionamiento de muchos instrumentos ópticos, como la lupa, la cámara fotográfica, el aparato de proyección, el microscopio y el telescopio. Estas leyes dan la posibilidad de comprender la acción del ojo como sistema óptico.

## 7.1. Velocidad de la luz

En la *óptica geométrica* sólo se estudia la dirección de los rayos luminosos. El problema de cómo transcurre la propagación de la luz con el tiempo rebasa los límites de dicha óptica. Las propiedades de la luz y su interacción con la sustancia se estudia con mayor profundidad en la *óptica física*. Damos comienzo a esta parte de la física explicando cómo se midió la velocidad de la luz.

Cuando pulsamos el interruptor de corriente, toda la habitación se llena de luz en el acto. Parece que la luz no necesita tiempo alguno para llegar hasta las paredes. Los intentos hechos para medir la velocidad de la luz han sido muchos. Primero se hizo la prueba de medir con relojes exactos la velocidad de propagación de una señal luminosa a gran distancia (de varios kilómetros). Pero estos experimentos no dieron resultado. Se empezó a pensar que la luz, para propagarse, no necesita tiempo en absoluto, que la luz recorre distancias cualesquiera instantáneamente. Sin embargo, resultó que la velocidad de la luz no es infinita y por fin pudo ser medida.

**MÉTODO ASTRONÓMICO DE MEDIR LA VELOCIDAD DE LA LUZ.** La velocidad de la luz consiguió medirla, por vez primera, el científico danés O. ROEMER en 1676. Roemer era astrónomo y su éxito se explica precisamente porque las distancias recorridas por la luz, que él utilizó para sus mediciones, eran muy grandes. Eran distancias entre planetas del sistema solar.

Roemer se dedicó a observar los eclipses de los satélites de Júpiter, el más grande de los planetas del sistema solar. Júpiter, a diferencia de la Tierra, tiene nada menos que trece satélites. El satélite más próximo a él, Io, constituyó el objeto de las observaciones de Roemer. Éste vio cómo el satélite pasaba por delante del planeta y luego se inmergía en su sombra, desapareciendo del campo visual. Después volvía a aparecer como si fuera una lámpara que se enciende instantáneamente. El intervalo de tiempo entre dos de estos destellos era igual a 42 h 28 min. Por lo tanto, esta "luna" era una especie de reloj celeste enorme que al cabo de intervalos de tiempo iguales enviaba sus señales a la Tierra.

Las primeras mediciones se hicieron cuando la Tierra, en su movimiento alrededor del Sol, estaba en su posición más próxima a Júpiter (fig. 184). Las mismas medidas hechas varios meses después, cuando la Tierra se había alejado de Júpiter, dieron por resultado que el satélite se había retrasado 22 min en emerger de la sombra, en comparación con el instante que se podía calcular basándose en el conocimiento del período de rotación de Io.

Roemer explicó esto así: "Si yo hubiera podido permanecer en la otra parte de la órbita de la Tierra, el satélite habría emergido de la sombra cada vez a la

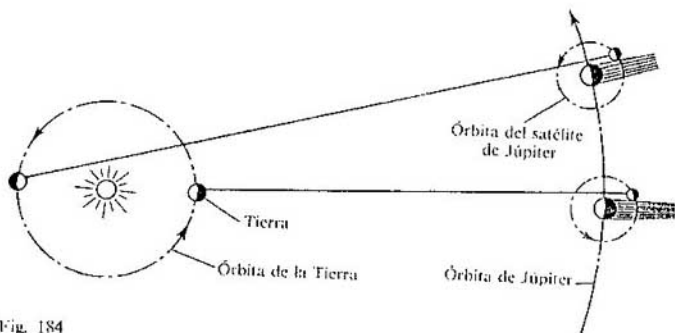


Fig. 184

hora fijada; un observador que se encontrara allí hubiera visto a Io 22 min antes. El atraso tiene lugar, en este caso, porque la luz tarda 22 min en recorrer la distancia desde el punto en que yo hice la primera observación hasta mi posición actual". Conociendo el retraso de Io en aparecer y la distancia a que esto se debe, se puede determinar la velocidad de la luz, dividiendo esta distancia por la duración del retraso. La velocidad de la luz resultó ser extraordinariamente grande: cerca de 300 000 km/s<sup>1)</sup>. Ésta es la causa por la que es tan difícil apreciar el tiempo que tarda la luz en propagarse entre dos puntos de la Tierra lejanos, ya que en un segundo recorre la luz una distancia 7,5 veces mayor que la longitud del ecuador de la Tierra.

**MÉTODOS DE LABORATORIO PARA MEDIR LA VELOCIDAD DE LA LUZ.** Utilizando un método de laboratorio, la velocidad de la luz por vez primera fue medida por el físico francés H.L. FIZEAU en el año 1849. El procedimiento utilizado consistía en hacer pasar la luz entre los dientes de una rueda en rotación (fig. 185). Luego la luz incidía sobre un espejo que estaba a varios kilómetros de la rueda. Una vez reflejada en el espejo la luz debía pasar otra vez por entre los dientes de la rueda. Cuando ésta giraba lentamente, la luz reflejada en el espejo se veía. Al ir aumentando la velocidad de rotación, la luz iba desapareciendo poco a poco. ¿A qué se debía esto? Mientras la luz, después de pasar por entre dos dientes iba hasta el espejo y volvía, la rueda tenía tiempo de girar de tal modo que el lugar del hueco lo ocupaba un diente y la luz dejaba de verse.

Si la velocidad de rotación seguía aumentando, la luz volvía a verse. Es evidente que durante el tiempo en que la luz se propagaba hasta el espejo y volvía, la rueda giraba lo suficiente para que el lugar del hueco anterior lo ocupara el hueco siguiente. Conociendo este tiempo y la distancia entre la rueda y el espejo se puede determinar la velocidad de la luz. En el experimento de

<sup>1)</sup> A causa de la inexactitud de las medidas y de que el radio de la órbita de la Tierra no se conocía aún con precisión, Rømer obtuvo para la velocidad de la luz el valor de 215 000 km/s.

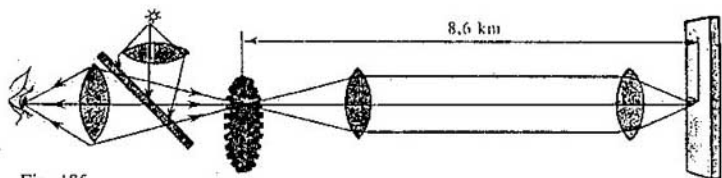


Fig. 185

Fizeau la distancia era de 8,6 km y para la velocidad de la luz se obtuvo el valor de 313 000 km/s.

Se estudiaron otros muchos métodos de laboratorio más exactos para medir la velocidad de la luz. En particular, el físico norteamericano A. A. Michelson elaboró un método perfeccionado para medir la velocidad de la luz utilizando, en vez de una rueda dentada, unos espejos giratorios.

También se midió la velocidad de la luz en diversas sustancias transparentes. En el agua fue medida en 1856. Resultó ser  $4/3$  veces menor que en el vacío. En las demás sustancias también es menor que en el vacío.

Según los datos más modernos, la velocidad de la luz en el vacío es igual a  $(299\,792\,456,2 \pm 0,8)$  m/s.

La determinación de la velocidad de la luz desempeñó un papel muy importante en la ciencia. Contribuyó en alto grado a establecer la naturaleza de la luz. La velocidad de la luz tiene especial importancia porque ningún cuerpo puede tener una velocidad superior a la de la luz en el vacío. Esto se puso de manifiesto después de haber sido creada la teoría de la relatividad, de la cual se tratará en el capítulo siguiente.

## 7.2

### Deducción de la ley de la refracción de la luz

El concepto fundamental de la óptica geométrica es el de rayo de luz. Las leyes que determinan la dirección de los rayos luminosos —la ley de la propagación rectilínea en un medio homogéneo y las leyes de la reflexión y de la refracción— fueron descubiertas por vía experimental.

Teóricamente las leyes de la reflexión y de la refracción de la luz se dedujeron, por primera vez, valiéndose de la teoría ondulatoria de la luz, propuesta por Huygens. Éste consideraba la luz como ondas elásticas que se propagan en un medio hipotético, el éter, que llena todo el espacio universal.

El principio de Huygens, del que se trató en el cuarto capítulo, dedicado a las ondas mecánicas, fue enunciado inicialmente para las ondas luminosas.

Este principio, como las demás leyes del movimiento ondulatorio, es correcto para todas las ondas, independientemente de cuál sea su naturaleza.

En el § 4.10 se introdujo la ley de la reflexión para las ondas mecánicas. Pero como todos aquellos razonamientos son aplicables con exactitud a las ondas luminosas, se puede considerar de inmediato que la ley de la reflexión de la luz está ya demostrada teóricamente.



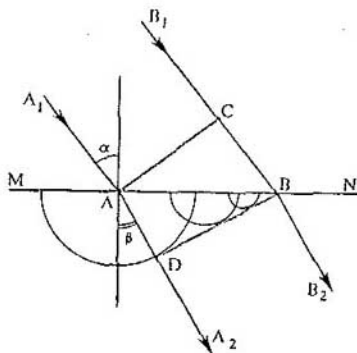


Fig. 186

Vamos ahora a considerar la refracción de la luz al pasar de un medio a otro. Supongamos que sobre el límite de separación de dos medios, por ejemplo, el aire y el agua, incide una onda luminosa plana (fig. 186). La superficie de onda  $AC$  es perpendicular a los rayos  $A_1A$  y  $B_1B$ . A la superficie  $MN$  llega primero el rayo  $A_1A$ . Si la velocidad de la luz en el primer medio es  $v_1$ , el rayo  $B_1B$  llegará a la superficie  $MN$  al cabo del tiempo

$$\Delta t = \frac{|CB|}{v_1}.$$

Por eso en el instante en que en el punto  $B$  la onda secundaria sólo empieza a excitarse, la onda procedente del punto  $A$  tiene ya la forma de una esfera de radio

$$|AD| = v_2 \cdot \Delta t,$$

donde  $v_2$  es la velocidad de la luz en el segundo medio. La superficie de la onda refractada puede obtenerse haciendo pasar una superficie tangencialmente a todas las ondas secundarias en el segundo medio, cuyos centros se encuentran en el límite de separación. En nuestro caso la superficie tangencial es el plano  $BD$ . Este plano es la envolvente de las ondas secundarias.

El ángulo de incidencia  $\alpha$  del rayo es, evidentemente, igual al ángulo  $CAB$  del triángulo  $ABC$  (por ser los lados de uno de estos ángulos perpendiculares a los lados del otro). Por consiguiente,

$$|CB| = v_1 \cdot \Delta t = |AB| \operatorname{sen} \alpha. \quad (7.1)$$

El ángulo de refracción  $\beta$  es igual al ángulo  $ABD$  del triángulo  $ABD$ . Por lo que

$$|AD| = v_2 \cdot \Delta t = |AB| \operatorname{sen} \beta. \quad (7.2)$$

Dividiendo (7.1) por (7.2) se obtiene la ley de la refracción:

$$\frac{\operatorname{sen} \alpha}{\operatorname{sen} \beta} = \frac{v_1}{v_2} = n, \quad (7.3)$$

en la que  $n$  es una magnitud constante que no depende del ángulo de incidencia. Esta magnitud, como ya se sabe, recibe el nombre de *índice de refracción relativo*. Así, pues, del principio de Huygens no sólo se sigue la ley de la refracción, sino que con su ayuda se pone de manifiesto el sentido físico del índice de refracción relativo. Este es igual a la razón de las velocidades de la luz en los medios en cuyo límite de separación se produce la refracción:

$$n = \frac{v_1}{v_2} \quad (7.4)$$

Si el ángulo de refracción  $\beta$  es menor que el de incidencia  $\alpha$ , de acuerdo con (7.3), la velocidad de la luz en el segundo medio es menor que en el primero. Ésto se confirmó plenamente en los experimentos de medición de la velocidad de la luz en el agua y en otros medios transparentes.

Aplicando la fórmula (7.4) puede expresarse el índice de refracción relativo  $n$  por medio de los índices de refracción absolutos  $n_1$  y  $n_2$  de los medios primero y segundo. En efecto, como

$$n_1 = \frac{c}{v_1} \text{ y } n_2 = \frac{c}{v_2},$$

resulta que

$$n = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (7.5)$$

### 7.3. Dispersión de la luz

El índice de refracción no depende del ángulo de incidencia del haz, pero sí depende de su color. Esto fue descubierto por el sabio inglés Newton.

Cuando se ocupaba del perfeccionamiento de los telescopios, Newton observó que la imagen que daba el objetivo tenía los bordes coloreados. Se interesó por este fenómeno y fue el primero que "investigó la diversidad de rayos luminosos y las peculiaridades de los colores que de esto se infieren y que hasta entonces nadie había ni siquiera sospechado" (del epitafio en el sepulcro de Newton). La coloración irisada de la imagen que da una lente había sido observada sin duda antes de Newton. También se había notado que tienen los bordes irisados los objetos que se miran a través de un prisma. El haz de rayos luminosos que pasa a través del prisma se colorea por los bordes.

El experimento fundamental de Newton fue genialmente sencillo. Acertó a dirigir sobre un prisma un haz luminoso de sección transversal *pequeña*. El haz de luz solar entraba en una sala oscura a través de un pequeño orificio practicado en el postigo de la ventana. Al incidir sobre el prisma de vidrio, el haz se refractaba y producía sobre la pared opuesta una imagen alargada en la que se sucedían los colores del iris (fig. 187). Siguiendo la tradición secular, según la cual el arco iris se consideraba formado por siete colores principales,

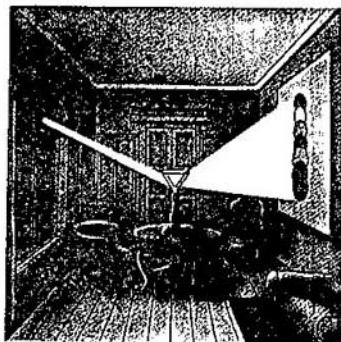
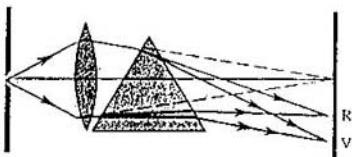


Fig. 187

Fig. 188



Newton también aisló siete colores: violado, añil, azul, verde, amarillo, anaranjado y rojo. A la franja coloreada Newton le dio el nombre de *espectro*.

Tapando el orificio con un vidrio rojo, Newton sólo veía en la pared una mancha roja; tapándolo con un vidrio azul, sólo una azul y así sucesivamente. De esto deducía que no era el prisma el que coloreaba la luz blanca, como se suponía antes. El prisma no cambia la luz, lo único que hace es descomponerla en sus partes integrantes (véase la fig. I de las láminas en color). La luz blanca tiene una estructura compleja. De ella se pueden separar haces de distintos colores y únicamente la acción conjunta de éstos nos produce la sensación de luz blanca. Efectivamente si con un segundo prisma, vuelto  $180^\circ$  con respecto al primero, se recogen todos los haces del espectro, otra vez se obtiene luz blanca (véase la fig. II de las láminas en color). Si se aísla una parte cualquiera del espectro, por ejemplo, la verde, y se hace pasar su luz otra vez por un prisma, ya no se obtienen más variaciones del color.

Otra conclusión importante a que llegó Newton fue enunciada por él en su tratado de "Óptica" como sigue: "Los rayos luminosos que se diferencian por su color, (también se diferencian por su grado de refracción" (para ellos el vidrio tiene distintos índices de refracción). Los rayos que más intensamente se refractan son los violetas, y los que menos, los rojos. *La dependencia del índice de refracción de la luz del color de ésta recibe el nombre de dispersión* (del latín "dispergere", esparcir).

Más tarde Newton perfeccionó sus observaciones del espectro para obtener colores más puros, ya que las manchas de colores redondas del haz que pasaba por el prisma se superponían unas a otras parcialmente (véase la fig. 187). En vez de un orificio redondo utilizó una rendija estrecha iluminada por una fuente muy brillante. Detrás de la rendija puso una lente que daba sobre la pantalla una imagen en forma de franja blanca estrecha. Si en el camino de los rayos se interponía un prisma (fig. 188), la imagen de la rendija se extendía formando el espectro.

Como el índice de refracción depende de la velocidad de la luz en la sustancia, es evidente que la luz roja, que es la que menos se refracta, tiene la

mayor velocidad, y la violeta, la menor. Precisamente por eso el prisma descompone la luz. En el vacío las velocidades de los rayos de distinto color son iguales. Si no fuera así ocurriría que, por ejemplo, el satélite de Júpiter, Io, que observó Roemer, parecería rojo en el instante en que emerge de la sombra y violeta antes de sumergirse en ella. Pero esto no se observa.

Sabiendo que la luz blanca tiene estructura compleja se puede explicar la extraordinaria variedad de colores que existe en la naturaleza. Si un objeto, por ejemplo, una hoja de papel, refleja todos los rayos de distintos colores que inciden sobre él, parecerá blanco. Si el papel se recubre con una capa de pintura roja, con ello no se crea luz de un color nuevo, pero la hoja retiene una parte de la luz existente. Ahora sólo se reflejarán los rayos rojos, los demás serán absorbidos por la capa de pintura. La hierba y las hojas de los árboles parecen verdes porque de todos los rayos solares que inciden sobre ellas sólo se reflejan los verdes, los demás son absorbidos. Si la hierba se mira a través de un vidrio rojo, que sólo deja pasar los rayos rojos, parecerá casi negra.

¿ ?

1. ¿Qué sentido físico tiene el índice de refracción de la luz?
2. En un cuaderno está escrita con lápiz rojo la palabra "sobresaliente" y con lápiz verde "notable". Se dispone de dos vidrios: uno verde y el otro rojo. ¿A través de cuál de ellos deberá mirarse para ver la calificación de "sobresaliente"?
3. ¿Por qué sólo un haz luminoso estrecho produce el espectro después de atravesar un prisma, mientras que si el haz es ancho resultan coloreados únicamente sus bordes?

## 7.4. Interferencia de la luz

Pasamos a estudiar los fenómenos que demuestran que la luz está constituida por ondas. Como ya se ha dicho, los fenómenos de la interferencia y la difracción son propios de todo movimiento ondulatorio. De que la luz al propagarse pone de manifiesto propiedades ondulatorias nos persuade la observación de la *interferencia* y *difracción* de la luz.

INTERFERENCIA EN PELÍCULAS DELGADAS. La interferencia de la luz fue observada hace ya mucho tiempo, pero no se le prestó atención. De niños todos hemos visto las figuras de interferencia cuando nos recreábamos en hacer pompas de jabón o mirábamos las manchas irisadas, de petróleo o gasolina, que flotan en la superficie del agua. "La pompa de jabón, suspendida en el aire...se ilumina con todos los matices de los colores peculiares de los objetos que la rodean. La pompa de jabón es, sin duda, la maravilla más delicada de la naturaleza" (Mark Twain). Precisamente la interferencia de la luz hace que la pompa de jabón sea tan digna de admiración.

El científico inglés Thomas Young fue el primero en concebir la idea de la posibilidad de explicar los colores de las películas delgadas por la composición de las ondas 1 y 2 (fig. 189), una de las cuales se refleja en la superficie exterior de la película y la otra, en la interior. Al ocurrir esto se produce la *interferencia de las ondas luminosas, es decir, la composición de las dos ondas, en virtud de la cual se observa una figura, estable con el tiempo, del reforzamiento o la atenuación de las oscilaciones luminosas resultantes en distintos puntos del espacio*. El resul-



Thomas Young (1773-1829), célebre científico inglés de talento multifacético, cuyo interés abarcó un margen extraordinario de problemas científicos. Fue al mismo tiempo médico famoso y físico de enorme intuición, astrónomo y mecánico, metalúrgico y egiptólogo, fisiólogo y poliglota, músico de talento y hasta gimnasta capaz. El mérito principal de Young es el haber descubierto la interferencia de la luz (a él se debe el término interferencia) y explicado el fenómeno de la difracción, basándose en la teoría ondulatoria. Fue el primero en medir la longitud de la onda luminosa. Young estudió la deformación por cizallamiento e introdujo la característica cuantitativa de las propiedades elásticas de las sustancias sometidas a compresión o a tracción, llamada módulo de Young.

tado de la interferencia (reforzamiento a atenuación de las oscilaciones resultantes) depende del ángulo de incidencia de la luz sobre la película, del espesor de ésta y de la longitud de onda. El **REFORZAMIENTO** de la luz ocurrirá si la onda 2 refractada se retrasa de la onda reflejada 1 un número entero de longitudes de onda. Pero si la segunda onda se retrasa de la primera en una semilongitud de onda o en un número impar de semilongitudes de onda, se originará la **ATENUACIÓN** de la luz.

Para que al componerse las ondas se forme una figura de interferencia estable, éstas deben ser *coherentes*, es decir, deben tener la misma longitud y una diferencia de fase constante. La coherencia de las ondas reflejadas en las superficies exterior e interior de la película se consigue porque ambas son partes de un mismo haz luminoso. Las ondas emitidas por dos focos luminosos, independientes ordinarios, no producen figura de interferencia porque la diferencia de fase de las dos ondas procedentes de dichos focos no es constante.

Young comprendió que la diferencia de color está relacionada con la diferencia de longitud de onda (o de frecuencia de las ondas luminosas). A los



Fig. 189

flujos luminosos de distinto color corresponden ondas de diferente longitud. Para que se refuercen mutuamente dos ondas que difieren entre sí por su longitud (suponiendo que los ángulos de incidencia son iguales) es necesario que el espesor de la película sea distinto. Por consiguiente, si la película tiene un espesor desigual, al iluminarla con luz blanca deben aparecer distintos colores.

Sabiendo de qué característica física de la onda luminosa depende el color, se puede dar una definición más profunda de la dispersión de la luz que la que se enunció en el párrafo precedente.

Se llama *dispersión* la dependencia del índice de refracción de la luz respecto de la frecuencia de las oscilaciones (o de la longitud de onda).

**ANILLOS DE NEWTON.** Una figura de interferencia se produce en la delgada capa de aire que queda entre una lámina de vidrio y la superficie esférica, de gran radio de curvatura, de una lente plano-convexa colocada sobre ella. Esta figura de interferencia tiene la forma de anillos concéntricos y se conoce con el nombre de anillos de Newton.

Si se pone una lente plano-convexa, cuya superficie esférica tenga poca curvatura, sobre una lámina de vidrio, como acabamos de indicar, y se mira con atención (preferiblemente con una lupa) la superficie plana de la lente, se verá que en el punto de contacto de la lente con la lámina hay una mancha oscura y alrededor de ella un conjunto de pequeños anillos concéntricos irisados. La distancia entre los anillos vecinos va disminuyendo rápidamente a medida que aumenta su radio (fig. III, 1 de las láminas en color). Esos son los anillos de Newton. Éste los observó y analizó no sólo utilizando luz blanca, sino también iluminando la lente con haces de un solo color (monocromáticos). Resultó que los radios de los anillos que tienen el mismo número de orden aumentan al pasar del extremo violeta del espectro al rojo; los anillos rojos tienen el radio máximo (figs. III, 2 y III, 3 de las láminas en color). Cerciórese de esto repitiendo el experimento por su cuenta.

Newton no pudo dar una explicación satisfactoria del origen de estos anillos. El primero que consiguió darla fue Young. Vamos a seguir la marcha de sus razonamientos. Se basaron éstos en suponer que la luz está constituida por ondas. Consideremos el caso de una onda de longitud determinada que incide perpendicularmente sobre la lente plano-convexa (fig. 190). La onda 1 aparece como resultado de la reflexión en la superficie convexa de la lente en límite *vidrio - aire*, y la onda 2, como resultado de la reflexión en la lámina en el límite *aire - vidrio*. Estas ondas son coherentes, porque tienen la misma longitud y una diferencia de fase constante, que se origina a causa de que la onda 2 recorre un camino más largo que la onda 1. Si la segunda onda se retrasa de la primera un número entero de longitudes de onda, al componerse, las ondas se refuerzan entre sí. Las oscilaciones que provocan están en la misma fase.

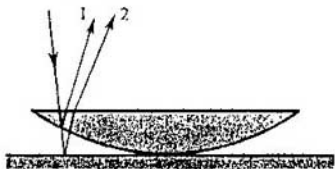


Fig. 190

Por el contrario, si la segunda onda retrasa de la primera un número impar de semilongitudes de onda, las oscilaciones que originan estarán en oposición de fase y las ondas se atenúan una a otra.

Conociendo el radio de curvatura  $R$  de la superficie de la lente, se puede calcular a qué distancias del punto de contacto de la lente con la lámina de vidrio las diferencias de marcha son tales que las ondas de una longitud  $\lambda$  determinada se atenúan entre sí. Estas distancias son los radios de los anillos de Newton oscuros, ya que las líneas de espesor constante de la capa de aire son circunferencias concéntricas. Midiendo los radios de los anillos se pueden calcular las longitudes de las ondas.

**LONGITUD DE UNA ONDA LUMINOSA.** Para la luz roja las mediciones dan que  $\lambda = 8 \cdot 10^{-5}$  cm, y para la violeta,  $\lambda_v = 4 \cdot 10^{-5}$  cm. Las longitudes de las ondas correspondientes a los otros colores del espectro tienen valores intermedios (véase la fig. V de las láminas en color). Cualquiera que sea el color, la longitud de la onda luminosa es muy pequeña. Imagínese que una ola del mar de varios metros de longitud se aumenta tanto que llega a ocupar todo el Océano Atlántico desde las costas de América hasta Europa. Pues si una onda luminosa se sometiera al mismo aumento, su longitud sería un poco mayor que la anchura de esta página.

El estudio de la interferencia no sólo demuestra que la luz tiene propiedades ondulatorias, sino que da también la posibilidad de medir la longitud de onda. Al mismo tiempo se pone en claro que, así como la altura del sonido se debe a su frecuencia, el color de la luz viene determinado por la frecuencia de las oscilaciones o por la longitud de onda (recuérdese que entre la longitud de onda, la frecuencia y la velocidad existe la relación  $\lambda v = c$ ).

Fuera de nosotros en la naturaleza no existen colores, sólo existen ondas de distinta longitud. El ojo humano es un instrumento físico complejo capaz de revelar la diferencia de color correspondiente a una diferencia insignificante (de cerca de  $10^{-6}$  cm) de la longitud de las ondas luminosas. La mayoría de los animales no distinguen los colores. Ven siempre las imágenes en blanco y negro.

Cuando la luz pasa de un medio a otro, su longitud de onda varía. Esto se puede comprobar llenando de agua o de cualquier líquido transparente, cuyo índice de refracción sea  $n$ , el espacio que antes ocupaba la capa de aire entre la lente y la lámina de vidrio. En estas condiciones los radios de los anillos de interferencia disminuyen.

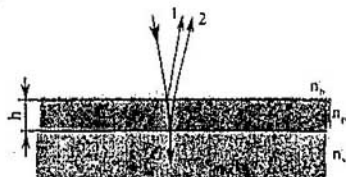
¿Por qué ocurre esto? Porque, como se sabe, cuando la luz pasa del vacío a cualquier medio, su velocidad disminuye  $n$  veces. Pero  $v = \lambda v$ , por lo que al mismo tiempo debe disminuir  $n$  veces la frecuencia o la longitud de onda. Mas los radios de los anillos dependen de la longitud de onda. Por consiguiente, cuando la luz entra en el medio varía  $n$  veces precisamente la longitud de onda, y no la frecuencia.

## 7.5. Algunas aplicaciones de la interferencia

La interferencia tiene aplicaciones muy importantes y extendidas.

Existen aparatos especiales, llamados *interferómetros*, cuyo funcionamiento se basa en el fenómeno de la interferencia. Su utilización puede ser muy diversa:

Fig. 191



para medir con exactitud la longitud de las ondas luminosas y el índice de refracción de los gases y de otras sustancias. Hay interferómetros para fines especiales.

Vamos a detenernos únicamente en dos aplicaciones de la interferencia.

**COMPROBACIÓN DE LA CALIDAD DEL ACABADO DE LAS SUPERFICIES.** Valiéndose de la interferencia se puede apreciar la calidad del acabado de las superficies de las piezas con exactitud de hasta  $1/10$  de longitud de onda, es decir, de hasta  $10^{-6}$  cm. Para esto hay que crear una delgada capa cuneiforme de aire entre la superficie de la muestra y una lámina patrón, de vidrio, muy lisa (fig. 191). Las rugosidades de la superficie de hasta  $10^{-6}$  cm producen distorsiones de las franjas de interferencia que se originan al reflejarse la luz en la superficie que se comprueba y en la cara inferior de la lámina patrón.

**ÓPTICA ANTIRREFLEJANTE.** Los objetivos de las modernas cámaras fotográficas y proyectores de cine, de los periscopios para los submarinos y de otros muchos dispositivos ópticos constan de un gran número de vidrios ópticos—lentes, prismas, etc. Al pasar a través de estos dispositivos la luz se refleja en muchas superficies. El número de superficies reflectoras que hay en los objetivos fotográficos modernos es mayor que 10 y en los periscopios de los submarinos llega hasta 40. Cuando la luz incide perpendicularmente sobre una superficie se refleja en ella de un 5 a un 9% de toda la energía. Por esta razón a través del aparato pasa a menudo sólo de un 10 a un 20% de la luz que a él llega. Como resultado se obtiene una iluminación muy pobre de la imagen. También empeora la calidad de la propia imagen. Una parte del haz luminoso, después de reflejarse muchas veces en las superficies interiores, pasa a través del dispositivo óptico, pero se dispersa y no contribuye a formar una imagen nítida. Ésta es la causa del “velo” de las imágenes fotográficas.

Para evitar las consecuencias desagradables de la reflexión de la luz en las superficies de los vidrios ópticos es necesario disminuir el índice de reflexión. Con esto la imagen que da el aparato se hace más clara. De aquí que la óptica antirreflejante se llame también “*óptica clarificada*”.

La “clarificación” de la óptica se basa en la interferencia. Sobre la superficie del vidrio óptico, por ejemplo, de la lente, se deposita una película delgada cuyo índice de refracción  $n_p$  es menor que el índice de refracción  $n_{vid}$  del vidrio. Para simplificar vamos a examinar el caso en que la luz incide normalmente sobre la película.

La diferencia de marcha de las ondas 1 y 2 (fig. 192) reflejadas, respectivamente, en las superficies superior e inferior de la película es igual al doble del espesor de ésta, es decir, a  $2h$ . La longitud de la onda  $\lambda_p$  en la película



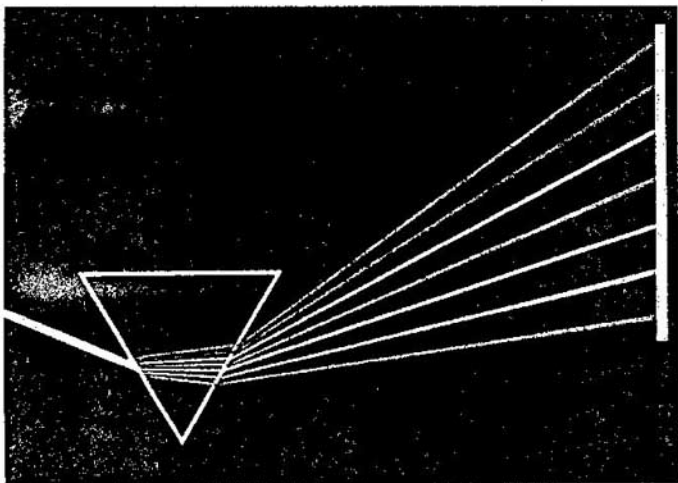


Fig. I. Esquema de la descomposición de la luz blanca en el espectro por medio de un prisma.

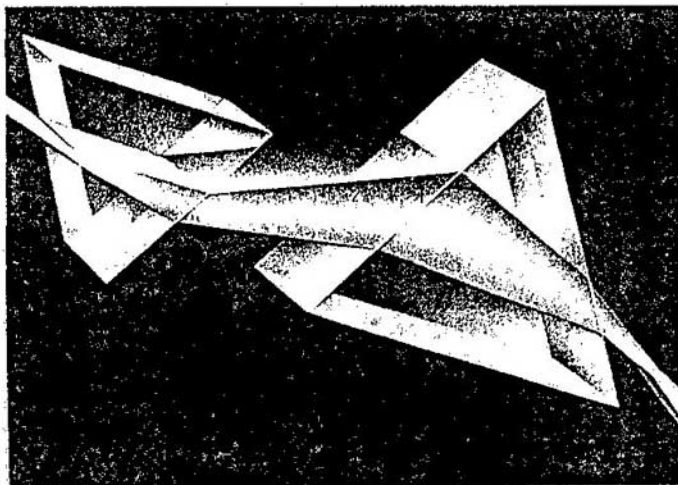


Fig. II. Descomposición y síntesis de la luz blanca por medio de prismas.

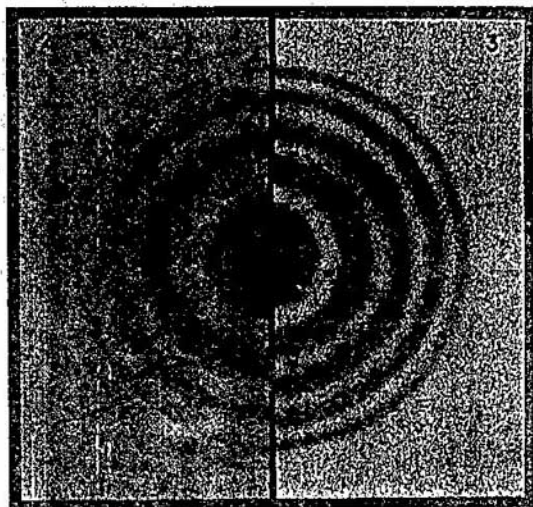
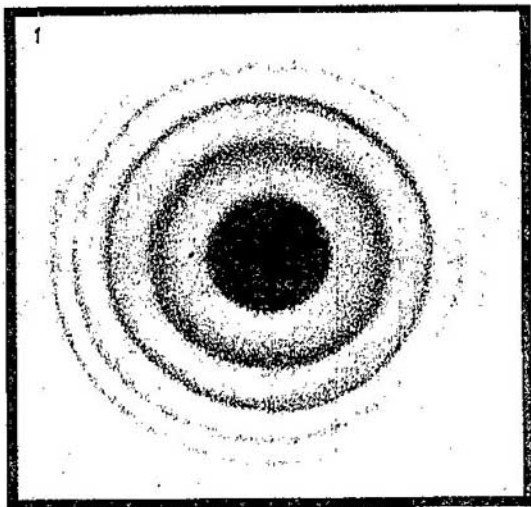


Fig. III. Anillos de Newton a la luz reflejada; 1, blanca; 2, roja; 3, verde.

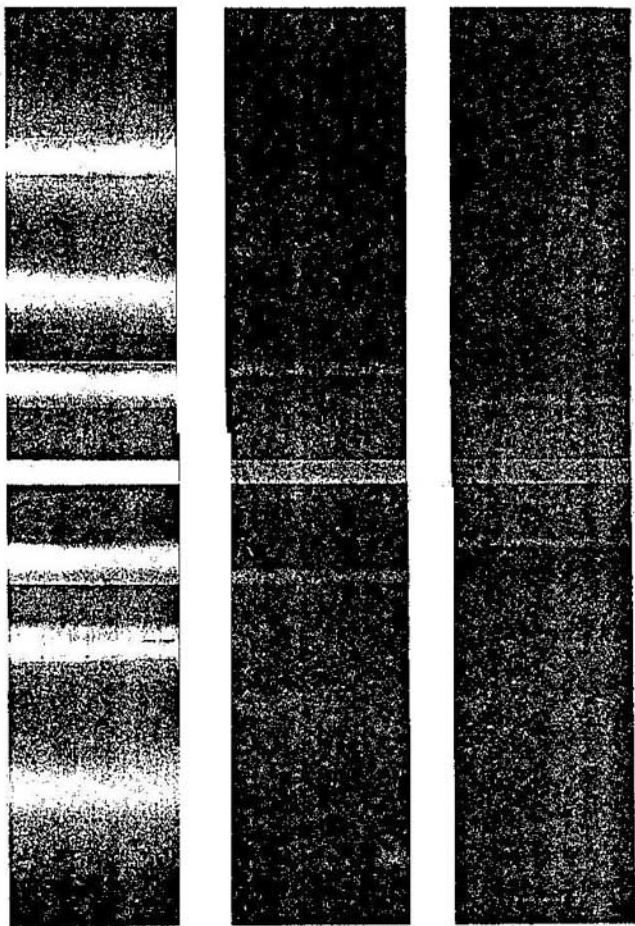


Fig. IV. Espectros obtenidos con una red de difracción: 1, de la luz blanca; 2, de la luz roja monocromática; 3, de la luz violeta monocromática. (La numeración va de arriba abajo.)

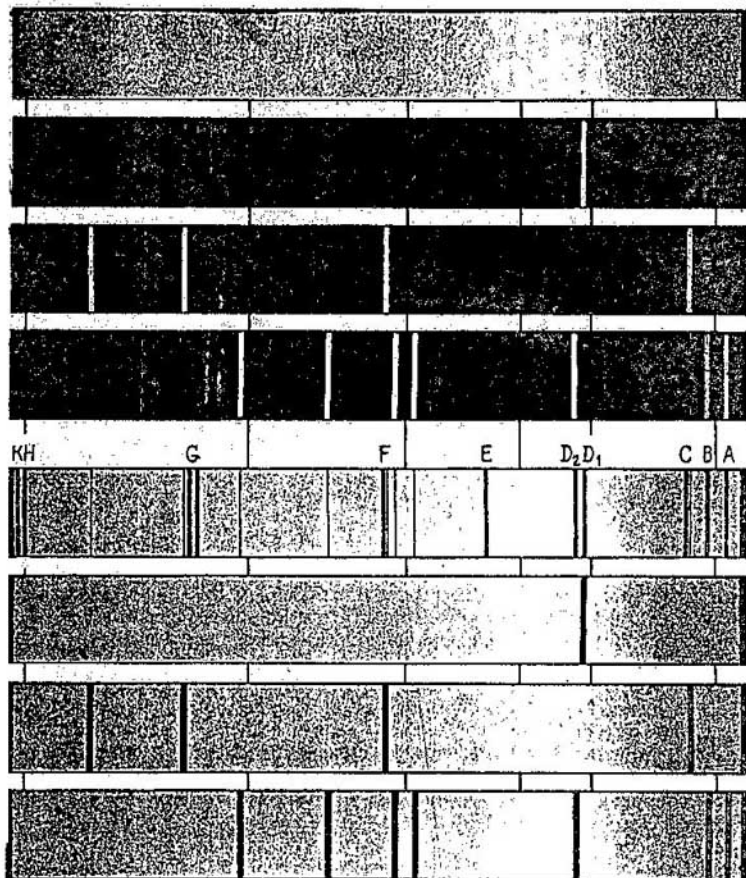


Fig. V. Espectros de emisión: 1, continuo; 2, del sodio; 3, del hidrógeno; 4, del helio.  
 Espectros de absorción: 5, del Sol; 6, del sodio; 7, del hidrógeno; 8, del helio.  
 (La numeración va de arriba abajo.)

es  $n_p$  veces menor que la longitud de onda  $\lambda$  en el vacío:

$$\lambda_p = \frac{\lambda}{n_p}.$$

Para que las ondas 1 y 2 se atenúen entre sí, la diferencia de marcha debe ser igual a la semilongitud de la onda en la película:

$$2h = \frac{\lambda}{2n_p}. \quad (7.6)$$

Si las amplitudes de las dos ondas reflejadas son iguales o se aproximan mucho una a otra, la luz se extingue totalmente. Para conseguir esto se elige convenientemente el índice de refracción de la película, puesto que la intensidad de la luz reflejada depende de la razón de los coeficientes de reflexión de los medios colindantes.

Sobre la lente, en las condiciones ordinarias, incide luz blanca. La expresión (7.6) muestra que el espesor necesario de la película depende de la longitud de onda. Por eso resulta imposible la extinción de las ondas reflejadas de todas las frecuencias. El espesor de la película se elige de manera que, cuando la incidencia sea normal, se extingan totalmente las ondas cuyas longitudes corresponden a la parte media del espectro (luz verde,  $\lambda_v = 5,5 \cdot 10^{-5}$  cm); dicho espesor debe ser igual a la cuarta parte de la longitud de la onda en la película<sup>1)</sup>:

$$h = \frac{\lambda_v}{4n_p}.$$

La reflexión de la luz de las partes extremas del espectro — roja y violeta — se atenúa muy poco. Por eso los objetivos antirreflejantes tienen a la luz refleja un matiz lila. Hoy hasta las cámaras fotográficas más simples y baratas tienen óptica antirreflejante.

Para terminar subrayaremos que la extinción de la luz por la luz no significa que la energía luminosa se transforme en otras formas de energía. Lo mismo que en el caso de la interferencia de las ondas mecánicas, la extinción de las ondas entre sí en una parte dada del espacio significa simplemente que la energía luminosa no llega a ella. La extinción de las ondas reflejadas significa, por consiguiente, que toda la luz pasa a través del objetivo.

¿ ?

1. ¿Cómo se obtienen las ondas luminosas coherentes?
2. ¿En qué consiste el fenómeno de interferencia de la luz?
3. ¿Con qué característica física de las ondas luminosas está relacionada la diferencia de color?
4. Si una capa de hielo transparente recibe un golpe seco de una piedra, se originan en él grietas que ofrecen todos los colores del espectro. ¿A qué se debe esto?

<sup>1)</sup> En la práctica se deposita una capa cuyo espesor es mayor en un número entero de longitudes de onda. Esto es más cómodo. El procedimiento industrial para recubrir las superficies de los vidrios ópticos con finas películas se debe a los científicos soviéticos I. V. GREBENSCHIKOV, A. N. TERENIN y otros.

5. La longitud de una onda disminuye en el agua  $n$  veces ( $n$  es el índice de refracción del agua respecto del aire). ¿Significa esto que un buceador debajo del agua no puede ver los objetos que lo rodean a la luz natural?
6. Cite las principales aplicaciones de la interferencia.

## 7.6. Difracción de la luz

Si la luz es un proceso ondulatorio, además de la interferencia, debe observarse la difracción de la luz, ya que ésta, es decir, el rodeo de los bordes de los obstáculos por las ondas, es característica de todo movimiento ondulatorio. Pero observar la difracción de la luz no es fácil. Esto se debe a que las ondas sólo rodean de un modo apreciable aquellos obstáculos cuyas dimensiones son comparables con la longitud de onda, y la longitud de una onda luminosa es muy pequeña.

Haciendo pasar un estrecho haz de luz por un orificio pequeño se puede observar que se infringe la ley de la propagación rectilínea de la luz. La mancha brillante que surge frente al orificio es mayor que la que debería aparecer si se cumpliera dicha ley.

**EXPERIMENTO DE YOUNG.** En 1802, Young, después de descubrir la interferencia de la luz, hizo su experimento clásico de difracción (fig. 193). En una pantalla opaca practicó con una aguja dos pequeños orificios  $B$  y  $C$  a poca

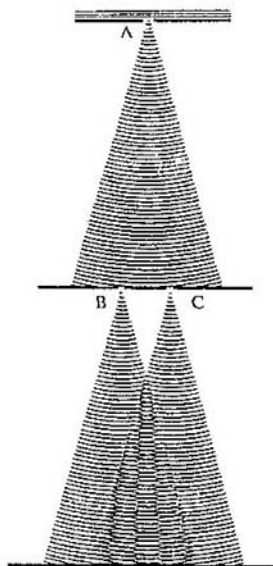


Fig. 193



Augustin Fresnel (1788-1827), eminente físico francés. Sentó las bases de la óptica ondulatoria. Completando el principio de Huygens con la idea de la interferencia de las ondas secundarias, construyó la teoría cuantitativa de la difracción.

Fundándose en ella explicó las leyes de la óptica geométrica y, en particular, el carácter rectilíneo de la propagación de la luz en un medio homogéneo. Ideó un método aproximado para calcular la figura de difracción, basado en la división de la superficie de onda en zonas.

Mostró por primera vez que las ondas luminosas son transversales. Las fórmulas de Fresnel para calcular las amplitudes y las fases de las ondas reflejada y refractada conservan su valor en nuestros días.

distancia uno de otro. Estos orificios los iluminó con un haz de luz estrecho que pasaba, a su vez, por un orificio pequeño *A* practicado en otra pantalla. Precisamente este detalle, difícil de prever en aquel tiempo, fue el que decidió el éxito del experimento, ya que sólo interfieren las ondas coherentes. La onda esférica que, de acuerdo con el principio de Huygens, se producía en el orificio *A* excitaba en los orificios *B* y *C* oscilaciones coherentes. En virtud de la difracción, de estos orificios salían dos conos luminosos que se superponían parcialmente. Como resultado de la interferencia de las ondas luminosas, sobre una tercera pantalla aparecían franjas brillantes y oscuras que se sucedían alternativamente. Tapando uno de los orificios, Young observó que las franjas de interferencia desaparecían. Valiéndose de este experimento precisamente midió Young por primera vez y con bastante exactitud las longitudes de onda, correspondientes a los rayos luminosos de distinto color.

**TEORÍA DE FRESNEL.** El estudio de la difracción culminó en los trabajos de A. J. Fresnel. Éste no sólo investigó con más detalle diversos casos de difracción, sino que construyó una teoría cuantitativa de la difracción que, en principio, da la posibilidad de calcular la figura de difracción que aparece cuando la luz bordea un objeto cualquiera. También él explicó por primera vez la propagación rectilínea de la luz en un medio homogéneo basándose en la teoría ondulatoria.

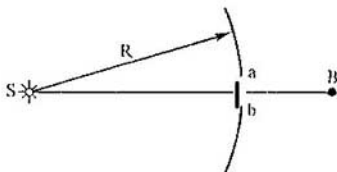


Fig. 194

Fresnel consiguió estos éxitos unificando el principio de Huygens con la idea de la interferencia de las ondas secundarias. De esto se habló sucintamente en el capítulo 4.

Para calcular la amplitud de una onda luminosa en un punto cualquiera del espacio hay que cercar mentalmente el foco de luz con una superficie cerrada. La interferencia de las ondas de los focos secundarios situados en esta superficie determina la amplitud en el punto que se considera del espacio.

Este tipo de cálculos dio la posibilidad de comprender cómo la luz de un foco puntual  $S$ , emisor de ondas esféricas, llega a un punto arbitrario  $B$  del espacio (fig. 194). Si se consideran los focos secundarios de la superficie de cada onda esférica de radio  $R$ , el resultado de las interferencias de las ondas secundarias de estos focos en el punto  $B$  es el mismo que si sólo los focos secundarios que se encuentran en un pequeño segmento esférico  $ab$  enviaran su luz al punto  $B$ . Las ondas secundarias, emitidas por los focos situados en el resto de la superficie, se extinguen entre sí a causa de la interferencia. Por eso todo ocurre como si la luz sólo se propagara a lo largo de la recta  $SB$ , es decir, rectilíneamente.

Al mismo tiempo Fresnel estudió la difracción cuantitativa en diversos tipos de obstáculos.

Un caso curioso ocurrió en una sesión de la Academia de Ciencias de París en el año 1818. Uno de los científicos presentes en la reunión (Poisson) advirtió que de la teoría de Fresnel se deducían hechos que contradicen claramente el buen sentido. Para determinadas dimensiones de un orificio y determinadas distancias desde éste al foco de luz y a la pantalla, en el centro de la mancha brillante debe haber una manchita oscura. Y, al contrario, detrás de un pequeño disco opaco debe haber un punto brillante en el centro de la sombra. Cuál no sería la sorpresa de los científicos, cuando los experimentos que se hicieron (por D. F. Arago) demostraron que, efectivamente, así ocurría en realidad.

**FIGURAS DE DIFRACCIÓN CORRESPONDIENTES A DISTINTOS OBSTÁCULOS.** Como la longitud de la onda luminosa es muy pequeña, el ángulo de desviación de la luz de su dirección rectilínea de propagación es pequeño. Por eso para poder observar claramente la difracción (y en particular, en todos los casos recién mencionados) la distancia entre el obstáculo que ha de rodear la luz y la pantalla debe ser grande. Si esta distancia es muy grande (del orden de varios kilómetros), la difracción se puede observar detrás de objetos bastante grandes (del tamaño de varios metros).

En la fig. 195 se muestran los aspectos que tienen las fotografías de las figuras de difracción producidas por distintos obstáculos: a) por un alambre delgado, b) por un orificio redondo, y c) por una pantalla redonda.

**LÍMITES DE APLICABILIDAD DE LA ÓPTICA GEOMÉTRICA.** Todas las teorías físicas expresan, aproximadamente, los procesos que realmente tienen lugar en la naturaleza. Para cualquier teoría pueden indicarse determinados límites de aplicabilidad. El que en un caso concreto se puede aplicar o no una teoría determinada depende no sólo de la exactitud que asegura esta teoría, sino también de la exactitud que requiere la solución de cada problema práctico. Los límites de una teoría sólo se pueden establecer una vez construida una teoría más general que abarque los mismos fenómenos.



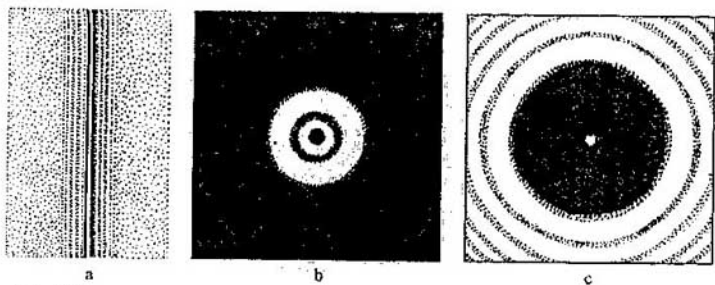


Fig. 195

Todas estas conclusiones de carácter general se refieren también a la óptica geométrica. Esta teoría es aproximada. No es capaz de explicar los fenómenos de la interferencia y de la difracción de la luz. Una teoría más general y exacta es la óptica ondulatoria. La ley de la propagación rectilínea de la luz y otras leyes de la óptica geométrica se cumplen con suficiente precisión sólo cuando las dimensiones de los obstáculos, que encuentra la luz en su camino de propagación, son mucho mayores que la longitud de la onda luminosa.

El funcionamiento de los instrumentos ópticos a que se hizo referencia en el capítulo 6 se pueden explicar basándose en las leyes de la óptica geométrica. De acuerdo con esta teoría se pueden distinguir con el microscopio detalles de un objeto tan pequeños como se quiera; con el telescopio se puede establecer la existencia de dos estrellas por muy pequeñas que sean las distancias angulares entre ellas. Sin embargo, en realidad no ocurre así, y únicamente la teoría ondulatoria permite esclarecer las causas por las cuales existe un límite del poder separador o resolutorio de los instrumentos ópticos.

#### PODER SEPARADOR DEL MICROSCOPIO Y DEL TELESCOPIO.

La naturaleza ondulatoria de la luz impone un límite a la posibilidad de distinguir detalles de un objeto u objetos muy pequeños observados al microscopio. La difracción no permite obtener imágenes nítidas de objetos pequeños, porque la luz no se propaga rigurosamente en línea recta, sino que rodea los objetos. Por eso la imagen resulta borrosa. Ningún aumento da la posibilidad de distinguir detalles cuyas imágenes borrosas se confunden. Esto ocurre cuando las dimensiones de los objetos son menores que la longitud de la onda luminosa.

La difracción también impone un límite al poder resolutorio del telescopio. A causa de la difracción de las ondas, cerca de los bordes de la montura del objetivo la imagen de una estrella no será un punto, sino un sistema de anillos brillantes y oscuros. Es cierto que los radios de estos anillos son muy pequeños, porque el diámetro del objetivo es mucho mayor que la longitud de onda. Pero si dos estrellas se encuentran entre sí a una distancia angular pequeña, los antedichos anillos se superponen y el ojo es incapaz de distinguir si los puntos luminosos son dos o uno solo. La distancia angular límite entre dos puntos luminosos, a la cual éstos se pueden distinguir, se determina por la razón de la longitud de onda al diámetro del objetivo.

## 7.7.

### Red de difracción

En el fenómeno de la difracción se basa la estructura de un magnífico instrumento óptico, la *red de difracción*. Una red de difracción es el conjunto de un gran número de rendijas o estrías separadas por espacios intermedios opacos (fig. 196). Las buenas redes de difracción se hacen en una máquina divisora especial que raya trazos paralelos sobre una lámina de vidrio. El número de trazos llega hasta varios millares en 1 cm y el total de ellos supera 100 000. Son fáciles de hacer réplicas de gelatina de esta red y sujetarlas entre dos láminas de vidrio. Las que mejores cualidades tienen son las llamadas *redes de reflexión*. Éstas consisten en una sucesión alternativa de elementos que reflejan la luz y de elementos que la dispersan. Los trazos que dispersan la luz se rayan con una cuchilla especial bien afilada sobre una lámina metálica pulimentada.

Si la anchura de las rendijas transparentes (o de las franjitas reflectoras) es  $a$  y la anchura de los intervalos opacos (o franjitas dispersoras de la luz) es  $b$ , la magnitud  $d = a + b$  se llama *periodo de la red*. Pasemos ahora a estudiar la teoría elemental de la red de difracción.

Supongamos que sobre la red incide una onda monocromática plana de longitud  $\lambda$  (fig. 197). Los focos secundarios que se encuentran en las rendijas crean ondas luminosas que se propagan en todas las direcciones. Hallemos la condición con la cual las ondas que parten de las rendijas se refuerzan entre sí. Para eso consideremos las ondas que se propagan en la dirección dada por el ángulo  $\varphi$ . La diferencia de marcha entre las ondas procedentes de los bordes de rendijas contiguas es igual a la longitud del segmento  $AC$ . Si en este segmento cabe un número entero de longitudes de onda, las ondas de todas las rendijas, componiéndose, se refuerzan unas a otras. Por el triángulo  $ABC$  se puede hallar la longitud del cateto  $AC$ :

$$|AC| = |AB| \operatorname{sen} \varphi = d \operatorname{sen} \varphi.$$

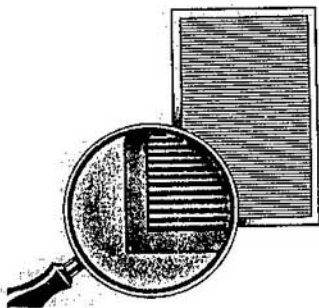


Fig. 196

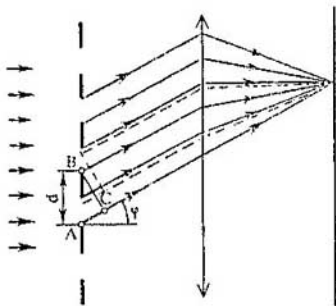


Fig. 197

Los máximos se observan bajo el ángulo  $\varphi$  determinado por la condición

$$d \operatorname{sen} \varphi = k \lambda, \quad (7.7)$$

donde  $k = 0, 1, 2, \dots$ . Éstos son los *máximos principales*.

Debe tenerse en cuenta que cuando se cumple la condición (7.7) se refuerzan no sólo las ondas que parten de los bordes inferiores (según la figura) de las rendijas, sino también las ondas que parten de todos los demás puntos de las rendijas. A cada punto de la primera rendija corresponde un punto de la segunda situado a la distancia  $d$ . Por eso la diferencia de marcha de las ondas secundarias emitidas por estos puntos es igual a  $k\lambda$  y éstas se refuerzan entre sí.

Detrás de la red se coloca una lente convergente en cuyo plano focal se sitúa una pantalla. La lente enfoca los rayos paralelos en un punto. En este punto se produce la composición de las ondas y su reforzamiento mutuo. Los ángulos  $\varphi$  que satisfacen la condición (7.7) determinan la posición de los máximos en la pantalla.

Como la posición de los máximos (excepto el central, correspondiente a  $k = 0$ ) depende de la longitud de onda, la red descompone la luz blanca en un espectro (fig. IV, 1 de las láminas en color). Cuanto mayor sea  $\lambda$ , tanto más lejos del máximo central se encontrarán los máximos correspondientes a la longitud de onda dada (figs. IV, 2 y 3 de las láminas en color). A cada valor de  $k$  le corresponde su espectro.

Con la red de difracción se pueden medir muy exactamente las longitudes de onda. Si el período de la red se conoce, la determinación de la longitud de onda se reduce a medir el ángulo  $\varphi$  de la correspondiente dirección al máximo.

Las pestañas de los párpados, con los intervalos que hay entre ellas, son una especie de red de difracción burda. Por eso, si entornando los ojos, se mira un foco de luz brillante, se pueden ver colores irisados. La luz blanca se descompone en el espectro al refringirse alrededor de las pestañas. Una placa de gramófono de surco fino se asemeja a una red de difracción por reflexión. Si esta placa se mira a la luz reflejada por ella de una lámpara eléctrica, se ve la descomposición de la luz en el espectro. Se pueden observar varios espectros, correspondientes a distintos valores de  $k$ . La figura de difracción será muy nítida si la luz de la lámpara incide sobre la placa formando un ángulo grande.

## 7.8 Carácter transversal de las ondas luminosas. Polarización de la luz

Los fenómenos de la interferencia y de la difracción demuestran indudablemente que la luz que se propaga tiene las propiedades de las ondas. Pero, ¿de qué ondas, de las longitudinales o de las transversales?

Durante mucho tiempo los fundadores de la óptica ondulatoria, Young y Fresnel, pensaron que las ondas luminosas eran longitudinales, es decir, semejantes a las ondas sonoras. En aquel tiempo las ondas luminosas eran consideradas como ondas elásticas en el éter, que llenaba todo el espacio y penetraba en todos los cuerpos. Las ondas transversales sólo pueden existir en los sólidos (véase el capítulo 4). Si el éter fuera sólido, ¿cómo iban a moverse los cuerpos en él sin encontrar resistencia? Porque el éter no podía impedir el movimiento de los cuerpos. De lo contrario no se cumpliría la ley de la inercia.

Fig. 199

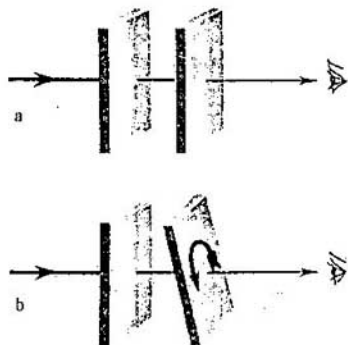
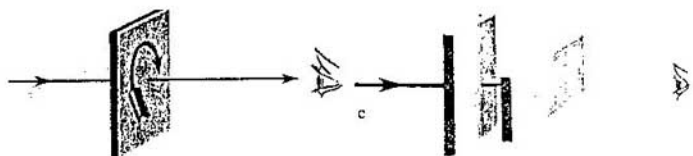


Fig. 198



No obstante, cada vez se iban acumulando más hechos imposibles de comprender considerando las ondas luminosas como longitudinales. Bajo la presión de estos hechos Fresnel se vio obligado, por fin, a reconocer que las ondas luminosas son transversales, a pesar de que parecía extraordinariamente raro, desde el punto de vista de la teoría del éter mecánico como portador de las ondas luminosas.

**EXPERIMENTOS CON TURMALINA.** El carácter transversal de las ondas luminosas ha sido demostrado con muchos experimentos. Vamos a examinar detalladamente sólo uno de ellos, muy sencillo y llamativo. Este experimento se hace con cristales de turmalina (transparentes, de color verde).

El cristal de turmalina tiene eje de simetría y pertenece a los llamados cristales uniaxiales. Tomemos una lámina rectangular de turmalina cortada de tal modo que uno de sus lados coincida con el eje del cristal. Si sobre esta lámina se hace incidir normalmente un haz de luz de una lámpara eléctrica o del Sol, la rotación de la lámina en torno del haz no produce variación alguna en la intensidad de la luz que pasa a través de ella (fig. 198). Puede pensarse que la luz sólo es absorbida parcialmente por la turmalina y adquiere color verdoso. Y nada más. Pero esto no es así. La onda luminosa adquiere nuevas propiedades.

Estas nuevas propiedades se ponen de manifiesto si el haz se hace pasar a través de un segundo cristal de turmalina, exactamente igual que el primero (fig. 199, a), y paralelo a él. Cuando los ejes de los cristales están dirigidos en el mismo sentido, tampoco ocurre nada interesante; simplemente el haz luminoso se debilita más a causa de la absorción por el segundo cristal. Pero si este segun-

do cristal se gira, permaneciendo el primero en reposo (fig. 199, *b*), se observa un fenómeno interesante, la luz se extingue. A medida que aumenta el ángulo entre los ejes, la intensidad de la luz va disminuyendo y cuando los ejes son perpendiculares entre sí la luz no pasa en absoluto (fig. 199, *c*). Es absorbida totalmente por el segundo cristal. ¿Cómo se explica esto?

**CARÁCTER TRANSVERSAL DE LAS ONDAS LUMINOSAS.** De los experimentos antes descritos se deducen dos hechos: PRIMERO, que la onda luminosa que parte del foco es totalmente simétrica respecto de la dirección en que se propaga (al girar el cristal alrededor del rayo en el primer experimento, la intensidad de la luz no varió), y SEGUNDO, que la onda que emerge del primer cristal no posee simetría axil (porque en dependencia del giro del segundo cristal alrededor del rayo se obtiene distinta intensidad de la luz transmitida).

Las ondas longitudinales tienen simetría absoluta respecto de la dirección en que se propagan (las oscilaciones se producen a lo largo de esta dirección, que es a la vez el eje de simetría de la onda). Por eso si la onda luminosa fuera longitudinal sería imposible explicar el experimento en que se hace girar la segunda lámina.

Este experimento se puede explicar perfectamente haciendo dos suposiciones.

La PRIMERA SUPOSICIÓN se refiere a la propia luz. La luz es una onda transversal. Pero en el haz de ondas incidente, que procede de un foco ordinario, existen oscilaciones en todas las direcciones perpendiculares a la de propagación de la onda (fig. 200).

De acuerdo con esta suposición, la onda luminosa tiene simetría axil y, al mismo tiempo, es transversal. Las ondas de la superficie del agua, por ejemplo, no poseen esta simetría, ya que las oscilaciones de las partículas del agua sólo se cumplen en el plano vertical.

Una onda luminosa con oscilaciones en todas las direcciones perpendiculares a la de propagación se dice que es *natural*. Este nombre es apropiado, porque en las condiciones normales las fuentes de luz crean precisamente ondas de este tipo. La suposición hecha explica el resultado del primer experimento. Con la rotación del cristal de turmalina no varía la intensidad de la luz transmitida porque la onda incidente tiene simetría axil (a pesar de ser transversal).

La SEGUNDA SUPOSICIÓN que es necesario hacer se refiere al cristal. El cristal de turmalina tiene la propiedad de transmitir únicamente las ondas luminosas cuyas oscilaciones se efectúan en un plano determinado (el plano *P* en la fig. 201). Esta luz recibe el nombre de *polarizada* o, más exactamente, de

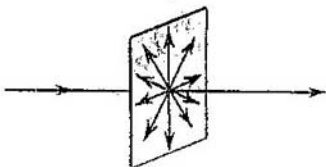


Fig. 200

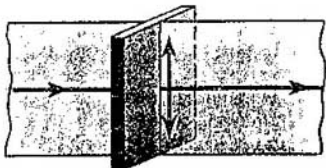


Fig. 201

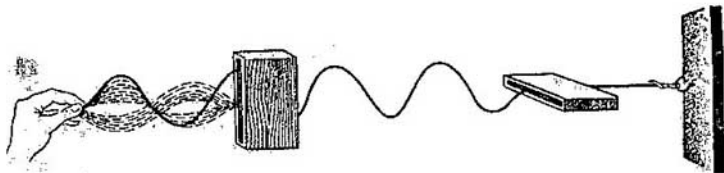


Fig. 202.

*planopolarizada* o *polarizada rectilíneamente*, para distinguirla de la luz natural, que también puede llamarse *no polarizada*. Esta suposición explica totalmente los resultados del segundo experimento. Del primer cristal emerge una onda planopolarizada. Cuando los cristales se cruzan (el ángulo entre sus ejes es de  $90^\circ$ ) esta onda no pasa a través del segundo cristal. Si los ejes forman entre sí un ángulo distinto de  $90^\circ$ , pasan oscilaciones cuya amplitud es igual a la proyección de la amplitud de la onda transmitida por el primer cristal sobre la dirección del eje del segundo cristal.

Así, pues, el cristal de turmalina polariza la luz, es decir, transforma la luz natural en luz polarizada.

**MODELO MECÁNICO DE LOS EXPERIMENTOS CON LA TURMALINA.** No es difícil construir un modelo mecánico simple e intuitivo del fenómeno recién estudiado. En un cordón de goma se puede crear una onda transversal de tal manera que las oscilaciones cambien rápidamente de dirección en el espacio. Esta onda será la análoga de la onda luminosa natural. Hagamos pasar ahora el cordón a través de una cajita estrecha formada por dos tablillas (fig. 202). De las oscilaciones en todas las direcciones posibles la cajita "separa" las oscilaciones en un plano determinado, por lo que de ella sale una onda polarizada.

Si en el camino de esta onda hay otra cajita igual, pero que forme con la primera un ángulo de  $90^\circ$ , las oscilaciones no pasarán a través de ella. La onda se extinguirá totalmente.

**POLAROIDES.** No sólo los cristales de turmalina son capaces de polarizar la luz. Esta misma propiedad la tienen, por ejemplo, los llamados *polaroides*. Un polaroide es una película delgada (de 0,1 mm) de cristales de herapatita (yodossulfuro de quinina) depositados sobre una lámina de celuloide o de vidrio. Con los polaroides se pueden hacer los mismos experimentos que con los cristales de turmalina. Pero los polaroides tienen la ventaja de que con ellos se pueden hacer grandes superficies polarizadoras de la luz. Entre los inconvenientes de los polaroides figura el matiz violáceo que dan a la luz blanca.

Ya hace tiempo que se viene estudiando el problema de poner polaroides en los faros y en los parabrisas de los automóviles para evitar el deslumbramiento que produce la luz de los coches que vienen al encuentro. Para esto el polaroide de los faros y del parabrisa debe dejar pasar las oscilaciones bajo un ángulo de  $45^\circ$  con el horizonte. En este caso la dirección de las oscilaciones luminosas procedentes de los coches que marchan en sentido contrario será perpendicular al plano en el cual el polaroide deja pasar las oscilaciones. La luz de los faros se

extinguirá. En cambio, la luz propia polarizada de un automóvil dado, después de reflejarse sobre la carretera, pasará a través del parabrisas.

El empleo del polaroide tendrá sentido si todos los automóviles se proveen de él.

## 7.9. El carácter transversal de las ondas luminosas y la teoría electromagnética de la luz

La teoría electromagnética de la luz tiene su origen en los trabajos de Maxwell. Éste demostró por vía puramente teórica (véase el § 5.4) la posibilidad de la existencia de las ondas electromagnéticas y halló que la velocidad de propagación de estas ondas en el vacío debía ser igual a la velocidad de la luz, que en aquel tiempo ya era conocida. Sobre esta base supuso Maxwell que la luz era una onda electromagnética.

Además, de la teoría de Maxwell se infiere directamente que las ondas electromagnéticas son transversales. El carácter transversal de las ondas luminosas ya había sido demostrado con experimentos. Por eso Maxwell consideró fundadamente que el hecho de que las ondas electromagnéticas fueran transversales era una importante demostración más en pro de la validez de la teoría electromagnética de la luz.

Cuando Hertz obtuvo experimentalmente las ondas electromagnéticas y midió su velocidad, la teoría electromagnética de la luz recibió su primera confirmación. Quedó demostrado que las ondas electromagnéticas al propagarse ponen de manifiesto las mismas propiedades que las luminosas, a saber: se reflejan, refractan, interfieren, difractan, polarizan, etc., (véase el § 5.9). A finales del siglo XIX quedó establecido definitivamente que las ondas luminosas son excitadas por las partículas cargadas que se mueven dentro de los átomos.

Al ser reconocida la teoría electromagnética de la luz fueron desapareciendo poco a poco las dificultades debidas a la necesidad de introducir el medio hipotético, el éter, que había que considerar como sólido. Las ondas luminosas no son ondas mecánicas que se propagan en un medio especial omnipresente, el éter, sino ondas electromagnéticas. Los procesos electromagnéticos no se subordinan a las leyes de la mecánica, sino a sus propias leyes. Estas leyes fueron establecidas en su forma definitiva por Maxwell.

En la onda electromagnética los vectores  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$  son perpendiculares entre sí (véase el cap. V). En la luz natural las oscilaciones de la intensidad del campo eléctrico  $\vec{E}$  y de la inducción magnética  $\vec{B}$  se producen en todas las direcciones perpendiculares a la de propagación de la onda. Si la luz está polarizada, las oscilaciones tanto de  $\vec{E}$  como de  $\vec{B}$  se efectúan no en todas las direcciones, sino en dos planos determinados. La onda electromagnética representada en la fig. 95 está polarizada.

Se plantea naturalmente la pregunta: al hablar de la dirección de las oscilaciones en la onda luminosa, ¿a las oscilaciones de qué vector nos referimos, a las del  $\vec{E}$  o a las del  $\vec{B}$ ? Experimentos hechos especialmente han demostrado que sobre la retina del ojo o sobre la emulsión fotográfica actúa precisamente el campo eléctrico de la onda luminosa.

A esto se debe que como dirección de las oscilaciones en la onda luminosa se tome la dirección del vector intensidad  $E$  del campo eléctrico.

¿?

1. ¿Por qué es imposible ver un átomo al microscopio?
2. Enuncie el principio de Huygens-Fresnel.
3. ¿Depende la posición de los máximos principales en una red de difracción del número de rendijas en ésta?
4. ¿En qué difiere la luz natural de la polarizada?
5. ¿En qué casos son válidas, con aproximación, las leyes de la óptica geométrica?

## Ejemplos de resolución de problemas

**PROBLEMA 1.** En el experimento de Young, para demostrar la difracción, la distancia entre las rendijas era  $d = 0,07$  mm y la distancia desde la rendija doble hasta la pantalla,  $D = 2$  m. Cuando el dispositivo se iluminaba con luz verde, la distancia entre las franjas de difracción brillantes contiguas resultó ser  $\Delta h = 16$  mm. Determinar por estos datos la longitud de onda.

*Solución.* En cierto punto  $C$  de la pantalla (fig. 203) se observará un máximo de iluminación si se cumple la condición

$$d_2 - d_1 = k\lambda,$$

donde  $k = 0, 1, 2, \dots$  son números enteros.

Se aplica el teorema de Pitágoras a los triángulos  $S_1CE$  y  $S_2CB$ :

$$d_2^2 = D^2 + \left(h_k + \frac{d}{2}\right)^2,$$

$$d_1^2 = D^2 + \left(h_k - \frac{d}{2}\right)^2.$$

Restando término a término la segunda igualdad de la primera, se obtiene:

$$d_2^2 - d_1^2 = 2h_k d, \quad \text{o} \quad (d_1 + d_2)(d_2 - d_1) = 2h_k d.$$

Y como  $d \ll D$ , será  $d_1 + d_2 \approx 2D$ . Por consiguiente,

$$d_2 - d_1 \approx \frac{h_k d}{D}.$$

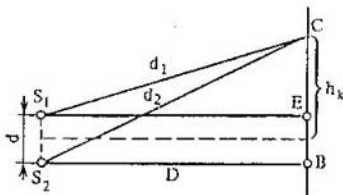


Fig. 203



Teniendo en cuenta que  $d_2 - d_1 = k\lambda$ , se puede escribir:

$$k\lambda \approx \frac{h_k d}{D}.$$

De donde se halla la distancia desde la  $k$ -ésima franja luminosa hasta el centro de la pantalla:

$$h_k \approx \frac{k\lambda D}{d}.$$

La distancia entre las franjas contiguas será:

$$\Delta h = h_{k+1} - h_k \approx \frac{\lambda D}{d}.$$

De donde

$$\lambda \approx \frac{d \cdot \Delta h}{D} \approx 5,6 \cdot 10^{-5} \text{ cm}.$$

**PROBLEMA 2.** Sobre una red de difracción que tiene 500 rayas por milímetro, incide una onda monocromática plana ( $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$  cm). Determinar el orden  $k$  máximo del espectro que se puede observar cuando los rayos inciden perpendicularmente sobre la red.

*Solución.* A  $k$  máximo corresponde  $\sin \varphi = 1$  (véase la fórmula 7.7). Por lo tanto,  $k = d/\lambda = 4$ .

Ejercicio  
10

1. En la fig. 204 se representa el esquema del experimento de Michelson para determinar la velocidad de la luz. ¿Qué número de revoluciones por segundo debe realizar el prisma octogonal de espejos para que el foco se vea en el anteojo, si el rayo luminoso recorre una distancia aproximadamente igual a 71 km?
2. El índice de refracción del agua para la luz roja de longitud de onda en

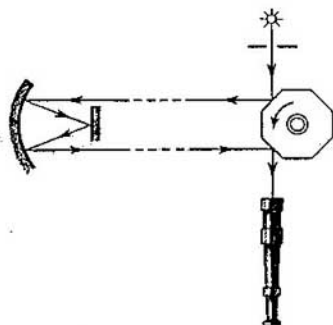


Fig. 204



Fig. 205

- el vacío  $\lambda_1 = 7 \cdot 10^{-5}$  cm es  $n_1 = 1,331$ , y para la luz violeta de longitud de onda en el vacío  $\lambda_2 = 4 \cdot 10^{-5}$  cm es  $n_2 = 1,343$ . Hallar las longitudes de estas ondas en el agua y su velocidad de propagación.
3. Dos focos coherentes  $S_1$  y  $S_2$  emiten luz de longitud de onda  $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$  cm. Los focos se encuentran entre sí a la distancia  $d = 0,3$  cm. La pantalla está a 9 m de distancia de los focos. ¿Qué se observará en el punto  $A$  de la pantalla (fig. 205): una mancha brillante o una mancha oscura?
  4. Sobre una red de difracción, cuyo período  $d = 1,2 \cdot 10^{-3}$  cm, incide normalmente una onda monocromática. Calcular la longitud  $\lambda$  de la onda si el ángulo entre los espectros de segundo y tercer orden es  $\Delta\varphi = 2^\circ 30'$ .
- 

## BREVE RESUMEN DEL CAPÍTULO 7

La velocidad de la luz en el vacío ha sido medida experimentalmente. Esta velocidad es igual, aproximadamente, a 300 000 km/s. En todos los medios la velocidad de la luz es menor que en el vacío.

La refracción de la luz en el límite de separación de dos medios se debe a que la velocidad de la luz varía al pasar ésta de un medio a otro. El índice de refracción relativo de dos medios es igual a la razón de la velocidad de la luz en dichos medios.

El índice de refracción de la luz, como estableció por primera vez Newton, depende de su color. El color de la luz depende a su vez de la frecuencia de las oscilaciones (o de la longitud de la onda luminosa). La dependencia del índice de refracción de la luz respecto de las oscilaciones se llama dispersión. La dispersión hace que el prisma descomponga la luz blanca en un espectro.

La velocidad de la luz en un medio disminuye a causa de que la longitud de la onda luminosa en dicho medio también disminuye. La frecuencia de las oscilaciones permanece invariable.

Cuando ondas coherentes se superponen entre sí, se observa la interferencia de la luz. Las ondas se refuerzan o atenúan una a otra en dependencia de la diferencia de la marcha entre ellas. Se forman ondas coherentes cuando las ondas luminosas se reflejan en las dos superficies de una película delgada. Como la diferencia de fase de las oscilaciones de las ondas que interfieren no sólo depende del grosor de la película, sino también de la longitud de onda, cuando la película se ilumina con luz blanca se origina una figura de interferencia coloreada (colores de las pompas de jabón, de los anillos de Newton, etc.).

Las ondas luminosas rodean los obstáculos cuyas dimensiones son comparables con la longitud de onda. En esto consiste el fenómeno de la difracción de la luz. Como la longitud de una onda luminosa es muy pequeña (del orden de  $10^{-5}$  cm), la difracción de la luz es difícil de observar y para hacerlo se requieren dispositivos especiales. La difracción de la luz impone un límite al poder separador del microscopio y del telescopio.

Las leyes de la óptica geométrica se cumplen aproximadamente con la

condición de que las dimensiones de los obstáculos, que encuentran a su paso las ondas luminosas, sean mucho mayores que la longitud de onda.

En el fenómeno de la difracción se basa la estructura de la red de difracción. Ésta es el conjunto de un gran número de rendijas separadas entre sí por estrechos intervalos. Los valores de los ángulos  $\varphi$  que determinan las direcciones a los máximos de difracción principales del espectro que se obtiene con la red, se hallan partiendo de la igualdad

$$d \sin \varphi = k\lambda,$$

en la que  $k = 0, 1, 2, \dots$ , y  $d$  es el período de la red.

La red descompone la luz blanca en el espectro; con ella se pueden medir las longitudes de las ondas luminosas.

Las ondas luminosas son transversales. Esto se ha demostrado experimentalmente observando el paso de la luz a través de medios anisótropos (cristales). Una onda luminosa en la cual las oscilaciones tienen lugar en un plano determinado, se dice que está polarizada. La luz que proporcionan los focos ordinarios (luz natural) no está polarizada. En una onda luminosa no polarizada las oscilaciones se producen en todas las direcciones en un plano perpendicular a la dirección en que se propaga la onda.

Según la teoría electromagnética de la luz, propuesta por Maxwell, la luz es una onda electromagnética transversal. La demostración del carácter transversal de las ondas luminosas constituyó una etapa importante en el reconocimiento de la exactitud de la teoría electromagnética de la luz.

## 8.1.

## Leyes de la electrodinámica y principio de la relatividad

ESENCIA DE LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD. El desarrollo de la electrodinámica condujo a la revisión de los conceptos de espacio y tiempo.

Según las ideas clásicas acerca del espacio y del tiempo, consideradas inmutables durante siglos, el movimiento no ejerce influencia alguna en el transcurso del tiempo (el tiempo es absoluto) y las dimensiones lineales de un cuerpo cualquiera no dependen de si dicho cuerpo está en reposo o en movimiento (la longitud también es absoluta).

La teoría especial de la relatividad de Einstein es una nueva concepción del espacio y del tiempo que ha venido a sustituir las nociones antiguas (clásicas).

EL PRINCIPIO DE LA RELATIVIDAD EN MECÁNICA Y ELECTRODINÁMICA. Después de enunciar Maxwell en la segunda mitad del siglo XIX las leyes fundamentales de la electrodinámica, se planteó la cuestión de si el principio de la relatividad, correcto para los fenómenos mecánicos, se extiende a los fenómenos electromagnéticos. En otras palabras, ¿transcurren de igual modo los procesos electromagnéticos (la interacción de las cargas y la corriente, la propagación de las ondas electromagnéticas, etc.) en todos los sistemas inerciales de referencia? O, ¿puede ser que el movimiento rectilíneo uniforme, sin influir en los fenómenos mecánicos, ejerza cierta acción sobre los procesos electromagnéticos?

Para poder responder a esta pregunta había que esclarecer si las leyes fundamentales de la electrodinámica varían al pasar de un sistema inercial a otro, o si, por el contrario, permanecen invariables lo mismo que las leyes de Newton. Sólo en el último caso se pueden desechar las dudas sobre la validez del principio de la relatividad referido a los procesos electromagnéticos y considerar este principio como una ley general de la naturaleza.

Las leyes de la electrodinámica son muy complejas y la solución rigurosa de este problema no es cosa fácil. Sin embargo, al parecer, incluso razonamientos simples permiten hallar una respuesta acertada. Según las leyes de la electrodinámica la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el vacío es la misma en todas las direcciones e igual a  $c = 3 \cdot 10^{10}$  cm/s. Pero, por otra parte, de acuerdo con la ley de composición de las velocidades de la mecánica de Newton, la velocidad sólo puede ser igual a  $c$  en un sistema de referencia privilegiado. En cualquiera otro sistema de referencia, que se mueva respecto de este sistema privilegiado con una velocidad  $\vec{v}$ , la velocidad de la luz debe ser igual a  $\vec{c} - \vec{v}$ . Esto significa que, si es justa la ley ordinaria de composición de las velocidades, al pasar de un sistema inercial a otro las leyes

de la electrodinámica deben cambiar de manera que en el nuevo sistema la velocidad de la luz no sea ya igual a  $c$ , sino a  $c - v$ .

Así, pues, se descubrieron ciertas contradicciones entre la electrodinámica y la mecánica de Newton, cuyas leyes están de acuerdo con el principio de la relatividad. Las dificultades surgidas se podía intentar resolverlas por tres procedimientos distintos.

La PRIMERA posibilidad consistía en proclamar injustificada la aplicación del principio de la relatividad a los fenómenos electromagnéticos. Este punto de vista fue mantenido por el gran físico holandés, fundador de la teoría electrónica, Hendrik LORENTZ. Los fenómenos electromagnéticos, ya en los tiempos de Faraday, se consideraban como procesos que tenían lugar en un medio especial omnipresente, que ocupaba todo el espacio, el "éter universal". Un sistema inercial de referencia, en reposo respecto del éter, constituye, según Lorentz, un sistema especial privilegiado. En él las leyes de la electrodinámica de Maxwell serían justas y tendrían la forma más simple. Sólo en este sistema de referencia la velocidad de la luz en el vacío es igual en todas las direcciones.

La SEGUNDA posibilidad consistía en considerar inexactas las ecuaciones de Maxwell e intentar cambiarlas de tal modo que NO VARIARAN al pasar de un sistema inercial a otro (de acuerdo con las concepciones clásicas del espacio y del tiempo). Este intento fue hecho, en particular, por H. Hertz. Según él, el éter es arrastrado totalmente por los cuerpos en movimiento y por eso los fenómenos electromagnéticos transcurren del mismo modo, independientemente de que el cuerpo esté en reposo o en movimiento. Así el principio de la relatividad era correcto.

Finalmente, la TERCERA posibilidad de resolver las dificultades antedichas consistía en renunciar las nociones clásicas de espacio y tiempo, para conservar tanto el principio de la relatividad como las leyes de Maxwell. Ésta era la vía más revolucionaria, puesto que significaba la revisión de las ideas más profundas y fundamentales de la física. Desde este punto de vista resultan inexactas no las ecuaciones del campo electromagnético, sino las leyes de la mecánica de Newton, que estaban de acuerdo con las antiguas concepciones del espacio y del tiempo. Había, pues, que cambiar las leyes de la mecánica y no las leyes de la electrodinámica de Maxwell.

La única posibilidad correcta resultó ser precisamente la tercera. Desarrollándola consecuentemente llegó Einstein a unos nuevos conceptos de espacio y tiempo. Las dos primeras vías fueron refutadas por los experimentos hechos.

Los intentos, realizados por Hertz, de cambiar las leyes de la electrodinámica de Maxwell pusieron de manifiesto que las nuevas ecuaciones eran incapaces de explicar una serie de hechos que se observan. Así, según la teoría de Hertz, el agua en movimiento debería arrastrar por completo la luz que en ella se propaga, puesto que arrastra al éter en que se propaga la luz. Pero las experiencias han demostrado que esto no ocurre en realidad.

EXPERIMENTO DE MICHELSON. El punto de vista de Lorentz, según el cual debe existir un sistema de referencia privilegiado, asociado con el éter universal, que se encuentre en reposo absoluto, también ha sido desmentido por experimentos directos.

Si la velocidad de la luz fuera igual a 300 000 km/s sólo en el sistema de referencia asociado al éter, midiendo la velocidad de la luz en un sistema inercial arbitrario, se podría descubrir el movimiento de dicho sistema respecto del éter y determinar la velocidad de este movimiento. De un modo semejante a como en un sistema de referencia que se mueve respecto del aire se produce viento, al moverse respecto del éter (claro está si éste existe) debe manifestarse el "viento de éter". Un experimento para descubrir el "viento de éter" fue realizado en 1881 por los científicos norteamericanos Albert MICHELSON y E. MORLEY siguiendo la idea expuesta por Maxwell 12 años antes.

En este experimento se comparó la velocidad de la luz en la dirección en que se mueve la Tierra con la velocidad en dirección perpendicular a dicho movimiento. Las medidas se hicieron con mucha exactitud por medio de un aparato especial, el interferómetro de Michelson. Los experimentos se hicieron a distintas horas del día y en diferentes estaciones del año. Pero en todas ellas el resultado fue negativo: no se consiguió descubrir el movimiento de la Tierra con respecto al éter.

Ocurría como si yendo en un automóvil a 100 km/h se sacara la cabeza por la ventanilla y no se notara viento alguno.

Por lo tanto, la idea de la existencia de un sistema de referencia privilegiado no resistió la prueba experimental. Esto indica, a su vez, que no existe medio especial alguno (como el "éter portador de la luz") al cual se pueda asociar dicho sistema de referencia.

## 8.2. Postulados<sup>1)</sup> de la teoría de la relatividad

Para explicar los resultados negativos del experimento de Michelson y de otras experiencias que debían haber descubierto el movimiento de la Tierra respecto del éter, se introdujeron diversas hipótesis. Con ellas se intentó explicar por qué no se consigue descubrir el sistema de referencia privilegiado (suponiendo que tal sistema existiera en realidad). Así, en particular, para explicar el experimento de Michelson se propuso la hipótesis sobre el acortamiento de las dimensiones lineales de todos los cuerpos cuando éstos se mueven respecto del éter.

Einstein abordó el problema de un modo totalmente distinto: no hay que inventar diferentes hipótesis para explicar los resultados negativos de todos los intentos de descubrir la diferencia entre sistemas inerciales. La total equivalencia de los sistemas inerciales de referencia con respecto no sólo de los procesos mecánicos, sino también de los electromagnéticos, es una ley de la naturaleza. No existe diferencia alguna entre el estado de reposo y el de movimiento rectilíneo uniforme.

El *principio de la relatividad* es el postulado principal de la teoría de Einstein. Este postulado se puede enunciar así: todos los procesos que tienen

---

<sup>1)</sup> El postulado en una teoría física desempeña el mismo papel que el *axioma* en matemáticas. Es una proposición fundamental que lógicamente no puede demostrarse. En física el postulado resulta de generalizar hechos experimentales.



Albert Einstein (1879-1955), el gran físico del siglo XX. Creador de la nueva teoría del espacio y el tiempo conocida como teoría especial de la relatividad. Extendiendo esta teoría al caso de los sistemas no inerciales de referencia, construyó la teoría general de la relatividad, que es la teoría moderna de la gravitación. Introdujo el concepto de partícula de luz o fotón. Su trabajo sobre la teoría del movimiento browniano condujo al triunfo definitivo de la teoría cinéticomolecular de la estructura de la sustancia. La humanidad conserva un profundo respeto por la actividad social progresista de Albert Einstein, que repetidas veces intervino en pro de la paz.

lugar en la naturaleza se realizan de la misma manera en todos los sistemas inerciales de referencia.

Esto quiere decir que, en todos los sistemas inerciales las leyes físicas tienen la misma forma. De este modo el principio de la relatividad de la mecánica clásica se extiende a todos los procesos de la naturaleza, incluidos los electromagnéticos.

Pero la teoría de la relatividad no sólo se basa en el principio de la relatividad. Hay un segundo postulado: la velocidad de la luz en el vacío es igual en todos los sistemas inerciales de referencia. Esta velocidad no depende de la velocidad del foco ni de la velocidad del receptor de la señal luminosa.

La velocidad de la luz ocupa, por lo tanto, una posición especial. Es más, como se deduce de los postulados de la teoría de la relatividad, la velocidad de la luz en el vacío es la velocidad máxima posible de transmisión de las interacciones en la naturaleza.

Para decidirse a enunciar los postulados de la teoría de la relatividad hacia falta una gran audacia científica. Esto se debe a que están en evidente contradicción con las concepciones clásicas de espacio y tiempo.

En efecto, supongamos que en el instante en que los orígenes de coordenadas de dos sistemas inerciales de referencia  $K$  y  $K_1$  (fig. 206), que se mueven

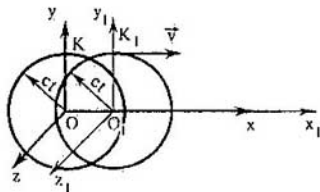


Fig. 206

uno respecto del otro con la velocidad  $v$ , coinciden, en dicho origen de coordenadas se produce un destello. En un tiempo  $t$  los sistemas se alejan uno de otro la distancia  $vt$  y la superficie de la onda esférica tendrá el radio  $ct$ . Los sistemas  $K$  y  $K_1$  son equivalentes y la velocidad de la luz igual en el uno y en el otro. Por consiguiente, desde el punto de vista de un observador asociado al sistema de referencia  $K$ , el centro de la esfera se encuentra en el punto  $O$ , y desde el punto de vista de un observador asociado al sistema de referencia  $K_1$ , se encuentra en el punto  $O_1$ . Pero una misma superficie esférica no puede tener dos centros,  $O$  y  $O_1$ . Esta manifiesta contradicción se infiere de los razonamientos basados en los postulados de la teoría de la relatividad.

La contradicción efectivamente existe. Pero no dentro de la misma teoría de la relatividad, sino en los conceptos clásicos de espacio y tiempo, que cuando las velocidades son muy grandes no son válidos.

### 8.3. Relatividad de la simultaneidad

La causa de la inconsistencia de las concepciones clásicas del espacio y del tiempo consiste en haber supuesto erróneamente que es posible la transmisión instantánea de las interacciones y de las señales de un punto del espacio a otro. La existencia de una velocidad límite finita de transmisión de las interacciones hace necesario un profundo cambio de los conceptos habituales de espacio y tiempo, basados en la experiencia diaria. El concepto de *tiempo absoluto*, que transcurre de una vez y para siempre a un ritmo dado, totalmente independiente de la materia y su movimiento, es erróneo.

Admitiendo que las señales se transmiten instantáneamente, la afirmación de que dos hechos ocurren de modo simultáneo en dos puntos distantes en el espacio  $A$  y  $B$  tendrá un sentido absoluto. Se pueden colocar en los puntos  $A$  y  $B$  relojes y sincronizarlos por medio de señales instantáneas. Si una de estas señales se envía desde  $A$ , por ejemplo, a las 0 h 45 min y en este mismo instante, según el reloj que hay en  $B$ , llega al punto  $B$ , quiere decir que ambos relojes marcan la misma hora, es decir, marchan *sincrónicamente*. Si esta coincidencia no existe, los relojes se pueden *sincronizar* adelantando el reloj que marca menos tiempo en el instante en que se envía la señal.

Dos acontecimientos cualesquiera, por ejemplo, la caída de dos rayos, son simultáneos si ocurren cuando los relojes sincronizados marcan la misma hora.

Únicamente disponiendo en los puntos  $A$  y  $B$  relojes sincronizados se puede juzgar acerca de si dos acontecimientos cualesquiera ocurrieron en estos puntos simultáneamente o no. Pero, ¿cómo se pueden sincronizar los relojes que se encuentran a cierta distancia entre sí cuando la velocidad de propagación de las señales no es infinita?

Para sincronizar los relojes es natural que se recurra a las señales luminosas o, en general, a las electromagnéticas, ya que la velocidad de las ondas electromagnéticas en el vacío es una magnitud constante, rigurosamente determinada.

Este es precisamente el procedimiento que se utiliza para comprobar los relojes por radio. Las señales horarias dan la posibilidad de sincronizar todos



Fig. 207

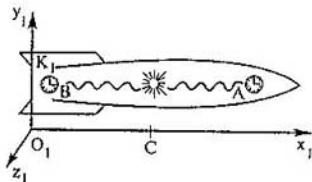
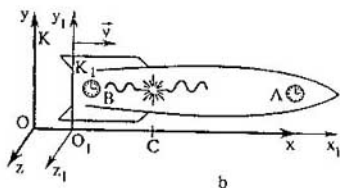
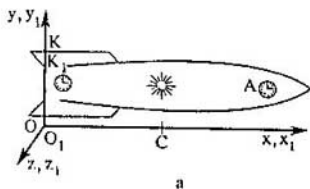


Fig. 208



los relojes con un reloj patrón exacto. Conociendo la distancia desde la estación emisora hasta el receptor, se puede calcular el retraso de la señal. Esta corrección es insignificante y en la vida cotidiana carece de importancia. Pero cuando se trata de las enormes distancias cósmicas, su importancia puede ser notoria.

Analicemos más detalladamente un método simple de sincronizar relojes que no requiere cálculo alguno. Supongamos que un cosmonauta desea saber si marchan a la par los relojes  $A$  y  $B$  situados en los extremos opuestos de la nave cósmica (fig. 207). Para esto, por medio de un foco, en reposo respecto de la nave y situado en el centro de ella, el cosmonauta produce un destello. La luz llega simultáneamente a ambos relojes. Si los relojes marcan la misma hora en ese instante, están sincronizados.

Esto será así solamente con respecto al sistema de referencia  $K_1$  asociado a la nave. En el sistema de referencia  $K$ , respecto del cual se mueve la nave, no ocurre lo mismo. El reloj situado en la proa de la nave se aleja del punto en que se produjo el destello del foco y la luz, para alcanzar el reloj  $A$ , debe recorrer una distancia mayor que la mitad de la longitud de la nave (fig. 208,  $a$  y  $b$ ). Por el contrario, el reloj  $B$ , situado en la popa, se acerca al punto en que se produjo el destello y el camino a recorrer por la señal luminosa es menor que la mitad de la longitud de la nave. Por consiguiente, un observador situado en el sistema  $K$  llegará a la conclusión de que las señales no llegan simultáneamente a ambos relojes.

Dos hechos cualesquiera que ocurran en los puntos  $A$  y  $B$  al mismo tiempo en el sistema  $K_1$ , no serán simultáneos en el sistema  $K$ . Pero en virtud del principio de la relatividad, los sistemas  $K_1$  y  $K$  son totalmente equivalentes. A ninguno de ellos puede darse preferencia. Por lo tanto, hay que llegar a la conclusión de que la simultaneidad de los sucesos alejados en el espacio es relativa. La causa de la relatividad de la simultaneidad es, como se ha visto, el carácter finito de la propagación de las señales.

Precisamente en la relatividad de la simultaneidad está el secreto de la paradoja de las señales luminosas esféricas a que se hizo referencia en el § 8.2. La luz llega en el mismo instante a los puntos de la superficie esférica con centro en el punto  $O$ , únicamente desde el punto de vista de un observador que se encuentre en reposo respecto del sistema  $K$ . En cambio, desde el punto de vista de un observador asociado al sistema  $K_1$ , la luz llega a dichos puntos en distintos instantes.

También es justo, claro está, lo inverso, es decir, en el sistema  $K$  la luz llega a los puntos de la esfera, cuyo centro está en  $O_1$ , en distintos instantes, y no simultáneamente, como le parece al observador que se encuentra en el sistema  $K_1$ .

De aquí se deduce que, en realidad, no existe tal paradoja.

## 8.4. Consecuencias fundamentales que se deducen de los postulados de la teoría de la relatividad

De los postulados de la teoría de la relatividad se infiere una serie de consecuencias muy importantes que se refieren a las propiedades del espacio y del tiempo. No vamos a detenernos en el fundamento relativamente complejo de estas consecuencias. Nos limitaremos a enunciarlas someramente.

**RELATIVIDAD DE LAS DISTANCIAS.** La distancia no es una magnitud absoluta, sino que depende de la velocidad con que se mueve el cuerpo respecto de un sistema de referencia dado.

Designemos por  $l_0$  la longitud de una varilla en el sistema de referencia  $K$  respecto del cual la varilla está en reposo. En este caso la longitud  $l$  de dicha varilla en el sistema de referencia  $K_1$ , respecto del cual se mueve la varilla con la velocidad  $v$ , se determina por la fórmula

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (8.1)$$

Como puede verse por esta fórmula,  $l < l_0$ . En esto consiste la contracción relativista de los cuerpos en los sistemas de referencia que se mueven uno respecto de otro.

**RELATIVIDAD DE LOS INTERVALOS DE TIEMPO.** Supongamos que el intervalo de tiempo entre dos sucesos, que ocurren en el mismo punto de un sistema inicial  $K$ , es  $\tau_0$ . Estos sucesos pueden ser, por ejemplo, dos toques de metrónomo que bate segundos.

Entonces el intervalo  $\tau$  entre estos sucesos en el sistema de referencia  $K_1$ , que se mueve respecto del sistema  $K$  con la velocidad  $v$ , se expresa así:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (8.2)$$

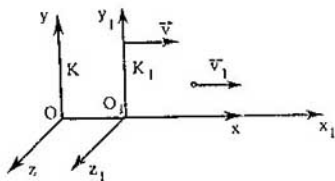


Fig. 209

Es evidente que  $\tau > \tau_0$ . Éste es el efecto relativista de dilatación del tiempo en los sistemas de referencia en movimiento.

Si  $v \ll c$ , en las fórmulas (8.1) y (8.2) se puede despreciar la magnitud  $v^2/c^2$ . Entonces  $l \approx l_0$  y  $\tau \approx \tau_0$ , es decir, la contracción relativista de los cuerpos y la dilatación del tiempo en el sistema de referencia móvil puede no tenerse en cuenta.

#### LEY RELATIVISTA DE LA COMPOSICIÓN DE VELOCIDADES.

A los nuevos conceptos de espacio y tiempo corresponde una nueva ley de composición de las velocidades. Es evidente que la ley clásica de composición de las velocidades no puede ser válida, puesto que contradice la afirmación de que la velocidad de la luz en el vacío es constante.

Si un tren se mueve a la velocidad  $v$  y en uno de sus vagones se propaga una onda luminosa en el sentido en que avanza el tren, su velocidad respecto de la Tierra debe ser igual a  $c$ , y no a  $c + v$ . La nueva ley de composición de las velocidades debe conducir al resultado requerido.

Escribamos la ley de composición de las velocidades para el caso particular en que un cuerpo se mueve a lo largo del eje  $X_1$  del sistema de referencia  $K_1$  (fig. 209) que, a su vez, se mueve con la velocidad  $v$  respecto del sistema  $K$ . Se supone que durante el movimiento los ejes de coordenadas  $X$  y  $X_1$  coinciden todo el tiempo y los ejes de coordenadas  $Y$  e  $Y_1$ ,  $Z$  y  $Z_1$  permanecen paralelos.

Llamemos  $v_1$  a la velocidad del cuerpo respecto de  $K_1$ , y  $v_2$  a su velocidad respecto de  $K$ . Entonces, de acuerdo con la ley relativista de composición de las velocidades

$$v_2 = \frac{v_1 + v}{1 + \frac{v_1 v}{c^2}} \quad (8.3)$$

Si  $v \ll c$  y  $v_1 \ll c$ , el término  $v_1 v/c^2$  que figura en el denominador se puede despreciar y en vez de (8.3) se obtiene la ley clásica de composición de las velocidades:

$$v_2 = v_1 + v.$$

Y si  $v_1 = c$ , la velocidad  $v_2$  también es igual a  $c$ , como requiere el segundo postulado de la teoría de la relatividad. En efecto,

$$v_2 = \frac{c + v}{1 + \frac{cv}{c^2}} = c \frac{c + v}{c + v} = c.$$

Una propiedad notable de la ley relativista de composición de las velocidades es que, cualesquiera que sean las velocidades  $v_1$  y  $v$  (naturalmente menores que  $c$ ), la velocidad resultante  $v_2$  nunca es mayor que  $c$ .

En el caso límite, cuando  $v_1 = v = c$ , se obtiene

$$v_2 = \frac{2c}{2} = c.$$

Las velocidades  $v > c$  son imposibles. A esta conclusión se puede llegar también por medio de razonamientos formales. Efectivamente, si  $v > c$ , las fórmulas (8.1) y (8.2) carecen de sentido, ya que tanto la longitud como el tiempo se hacen imaginarios.

¿ ?

1. ¿Qué afirmaciones sirven de base para la teoría de la relatividad?
2. ¿En qué difiere el primer postulado de la teoría de la relatividad del principio de ésta en la mecánica?
3. ¿Qué sucesos llevan el nombre de simultáneos?
4. ¿Para qué velocidades de movimiento la ley relativista de composición de aquéllas se transforma en la clásica?
5. ¿En qué consiste la diferencia esencial de la velocidad de la luz respecto de las velocidades con que se mueven todos los demás cuerpos?

## 8.5. Dependencia de la masa respecto de la velocidad. Dinámica relativista

Con los nuevos conceptos de espacio-tiempo no concuerdan las leyes del movimiento de la mecánica de Newton cuando las velocidades son grandes. Sólo si las velocidades son pequeñas, es decir, cuando son justos los conceptos de espacio y tiempo clásicos, la segunda ley de Newton

$$m \frac{\Delta v}{\Delta t} = F \quad (8.4)$$

no cambia de forma al pasar de un sistema inercial de referencia a otro (es decir, se cumple el principio de la relatividad).

Pero cuando las velocidades de movimiento son grandes, esta ley, en su forma habitual (clásica), no es correcta.

De acuerdo con la segunda ley de Newton (8.4), una fuerza constante, actuando sobre un cuerpo durante mucho tiempo, puede comunicarle una velocidad tan grande como se quiera. Pero en realidad la velocidad de la luz en el vacío es la velocidad límite y, cualesquiera que sean las condiciones, un cuerpo no puede moverse a una velocidad mayor que la de la luz en el vacío. Se requiere un cambio muy pequeño en la ecuación del movimiento de los cuerpos para que ésta sea correcta cuando las velocidades son grandes. Previamente vamos a pasar a la forma de escribir la segunda ley de la dinámica que utilizó el propio Newton:

$$\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \vec{F}, \quad (8.5)$$

donde  $\vec{p} = m\vec{v}$  es el impulso del cuerpo. En esta fórmula se suponía que la masa del cuerpo es independiente de la velocidad.

Es asombroso que incluso a grandes velocidades la ecuación (8.5) no cambia de forma. La variación sólo afecta a la masa. Cuando la velocidad de un cuerpo aumenta, su masa no permanece constante, sino que crece. Este incremento de la masa es tanto mayor cuanto más se aproxima la velocidad con que se mueve el cuerpo a la velocidad de la luz  $c$ .

La dependencia de la masa respecto de la velocidad puede hallarse partiendo de la suposición de que la ley de conservación del impulso es justa también con los nuevos conceptos de espacio y tiempo. Los cálculos son demasiado complejos. Daremos únicamente el resultado final.

Si por  $m_0$  se designa la masa del cuerpo en reposo, entonces la masa  $m$  del mismo cuerpo moviéndose a la velocidad  $v$  se determina por la fórmula

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (8.6)$$

En la fig. 210 se da la gráfica de la masa del cuerpo en función de su velocidad.

Cuando las velocidades son mucho menores que la de la luz, la expresión del denominador en el segundo miembro de la fórmula (8.6) difiere muy poco de la unidad. Así, a la velocidad de un cohete cósmico moderno  $v \approx 10$  km/s, se obtiene que

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 0,9999999944.$$

Por eso no es extraño que a velocidades relativamente pequeñas sea imposible apreciar el aumento de la masa. Pero las partículas elementales alcanzan en los aceleradores de partículas cargadas modernas velocidades

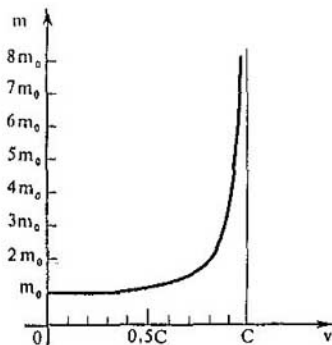


Fig. 210

enormes. Si la velocidad de una partícula sólo es 90 km/s menor que la velocidad de la luz, su masa aumenta 40 veces. Los potentes aceleradores de electrones son capaces de acelerar estas partículas hasta velocidades tan sólo 35 ó 40 m/s menores que la velocidad de la luz. En estas condiciones la masa del electrón aumenta 2000 veces, aproximadamente, y el electrón adquiere una masa mayor que la del protón. Para mantener este electrón en una órbita circular, sobre él debe actuar, por parte del campo magnético, una fuerza 2000 veces mayor que la que podría suponerse de no tener en cuenta que la masa depende de la velocidad. Para calcular las trayectorias de las partículas rápidas no sirve la mecánica de Newton.

Tomando en consideración (8.6), el impulso del cuerpo es

$$\vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (8.7)$$

La ley fundamental de la dinámica relativista se escribe en la forma antigua:

$$\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \vec{F}$$

Pero el impulso del cuerpo se determina aquí por la fórmula (8.7), y no simplemente por el producto  $m_0 \vec{v}$ .

Así, pues, la masa, que desde los tiempos de Newton, es decir, durante dos siglos y medio, se había considerado invariable, en realidad depende de la velocidad.

A medida que aumenta la velocidad del movimiento, la masa del cuerpo, que determina sus propiedades inerciales, también aumenta. Cuando  $v \rightarrow c$  la masa del cuerpo, de acuerdo con la ecuación (8.6), crece indefinidamente ( $m \rightarrow \infty$ ); por eso la aceleración tiende a cero y la velocidad deja prácticamente de aumentar, aunque la fuerza siga actuando indefinidamente.

La necesidad de utilizar las ecuaciones relativistas del movimiento para calcular los aceleradores de partículas cargadas significa que, en nuestros días, la teoría de la relatividad se ha convertido en una ciencia de ingeniería.

Las leyes de la mecánica de Newton se pueden considerar como un caso particular de la mecánica relativista, correctas cuando las velocidades con que se mueven los cuerpos son mucho menores que la velocidad de la luz.

## 8.6. Sincrofasotrón

En los aceleradores potentes modernos —*sincrofasotrones*— se utiliza el principio del paso, repetido muchas veces, de las partículas cargadas (principalmente protones) a través de intervalos aceleradores en los cuales se concentra un campo eléctrico variable muy intenso.

El movimiento, siguiendo una trayectoria aproximadamente circular, se asegura por medio de un campo magnético. Este campo hace que varíe la

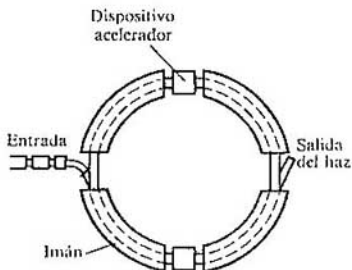
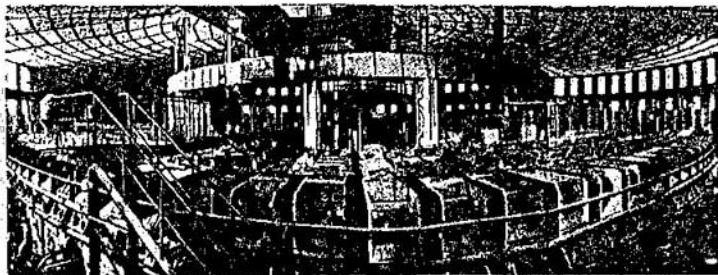


Fig. 211

dirección de la velocidad de las partículas, sin alterar su energía (véase el libro "Física 3" de la editorial MIR).

El sincrofasotrópico tiene la forma de un anillo de grandes dimensiones. Las partículas se mueven por una cámara de vacío situada dentro de un sistema de electroimanes. La trayectoria de cada partícula está formada por unos cortos trozos rectilíneos aislados y unos arcos de circunferencia (fig. 211). Una parte de los trozos rectilíneos se utiliza para colocar los electrodos entre los cuales se crea el campo eléctrico acelerador. En otros trozos rectilíneos se encuentran los aparatos para introducir las partículas cargadas en el acelerador y para que salgan de él los haces de partículas aceleradas hasta velocidades relativistas.

Como cada paso de la partícula, por ejemplo, del protón, por el intervalo acelerador hace que aumente su velocidad (y, por lo tanto, su masa), el campo magnético que curva su trayectoria no puede permanecer constante. Para que el radio de curvatura de la trayectoria se conserve invariable, el campo magnético debe aumentar a medida que las partículas se van acelerando. Al mismo tiempo (sincrónicamente) que varía el campo magnético debe variar, de un modo rigurosamente determinado, el campo eléctrico alternativo en los intervalos aceleradores. Para que el protón, que cada vez se mueve a mayor velocidad, llegue al intervalo acelerador en el instante en que el campo eléctrico está dirigido en el sentido de su velocidad, la frecuencia con que varía el campo eléctrico



Sincrofasotrópico de 10 GeV del Instituto de Investigaciones Nucleares de la URSS (Dubna).

también debe aumentar a medida que crece la aceleración. La coordinación necesaria entre el aumento del campo magnético y de la frecuencia del eléctrico se calcula valiéndose de la dinámica relativista. El sincrofasotrón es un aparato relativista. En la URSS el primer aparato de este tipo, para energías de 10 mil millones de eV<sup>1)</sup>, fue construido en la ciudad de Dubna en el Instituto Unificado de Investigaciones Nucleares.

El acelerador más grande de la Unión Soviética es el sincrofasotrón de Sérpújov. La masa total de sus imanes es de 20 000 t. En la longitud de una vuelta (cerca de 1,5 km) los protones que se aceleran recorren una diferencia de potencial total de 350 mil V y adquieren, respectivamente, la energía de 350 000 eV. En un ciclo completo de aceleración los protones adquieren una energía de más de 70 mil millones de eV.

## 8.7. Relación entre la masa y la energía

Pasamos ahora a estudiar la consecuencia más importante de la teoría de la relatividad, que desempeña uno de los papeles más importantes en la física nuclear y en la física de las partículas elementales. Nos referimos a la *relación universal entre la energía y la masa*.

La relación entre la energía y la masa se deduce inevitablemente de la ley de conservación de la energía y del hecho de que la masa del cuerpo depende de la velocidad con que se mueve. Esto se puede ver en un simple ejemplo. Al calentar el gas que hay en un recipiente se le comunica una energía determinada. La velocidad del movimiento térmico caótico de las moléculas depende de la temperatura y aumenta a medida que se calienta el gas. El aumento de la velocidad del movimiento de las moléculas, de acuerdo con la fórmula (8.6), significa un incremento de la masa de todas las moléculas. Por consiguiente, la masa del gas que hay en el recipiente aumenta al crecer su energía interna. Entre la masa del gas y su energía existe relación.

RELACION ENTRE LA MASA Y LA ENERGÍA EN LOS MOVIMIENTOS LENTOS. Lo más fácil es establecer la relación entre la masa y la energía basándose en el ejemplo del movimiento de un cuerpo con la velocidad  $v$ , mucho menor que la velocidad de la luz  $c$ . Para eso hallamos la expresión aproximada de la dependencia de la masa respecto de la velocidad para  $v \ll c$ . El denominador de la fórmula (8.6) se puede escribir así:

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \sqrt{\left(1 - \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}\right)^2 - \frac{1}{4} \frac{v^4}{c^4}}$$

Despreciando la magnitud pequeña  $\frac{1}{4} \frac{v^4}{c^4}$  se obtiene:

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \approx 1 - \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}$$

<sup>1)</sup> El ELECTRÓN-VOLTIO (eV) es una unidad de energía que no figura en el SI, pero se usa mucho en la física nuclear:  $1 \text{ eV} = 1,60207 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ . Un electrón adquiere la energía de 1 eV cuando recorre una diferencia de potencial de 1 V.



Por lo tanto

$$m \approx \frac{m_0}{1 - \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}}$$

Multiplicando el numerador y el denominador por  $1 + \frac{1}{2} v^2/c^2$  y volviendo a despreciar el término  $\frac{1}{4} v^4/c^4$ , se llega a la fórmula aproximada siguiente:

$$m \approx m_0 + \frac{1}{2} m_0 v^2 \frac{1}{c^2}. \quad (8.8)$$

De aquí se sigue que la variación de la masa del cuerpo  $\Delta m = m - m_0$ , cuando su energía cinética aumenta en  $\Delta W_c = \frac{1}{2} m_0 v^2$  se expresa así:

$$\Delta m = \frac{\Delta W_c}{c^2}.$$

Esto significa que el incremento de la masa del cuerpo cuando su velocidad aumenta es igual a la energía cinética comunicada al cuerpo, dividida por el cuadrado de la velocidad de la luz.

**FÓRMULA DE EINSTEIN.** En la teoría de la relatividad esta deducción se generaliza ampliamente. Valiéndose de esta teoría Einstein estableció su fórmula, magnífica por su sencillez y comunidad, que relaciona la energía con la masa:

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (8.9)$$

La energía de un cuerpo o sistema de cuerpos es igual a la masa multiplicada por el cuadrado de la velocidad de la luz. En toda la física sólo hay dos o tres fórmulas tan simples y universales que relacionen magnitudes físicas fundamentales.

Si varía la energía del sistema también varía su masa:

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}. \quad (8.10)$$

Como el coeficiente  $1/c^2$  es muy pequeño, sólo son posibles las variaciones apreciables de la masa cuando las variaciones de la energía son muy grandes. En las reacciones químicas o cuando se calientan cuerpos en condiciones normales, las variaciones de la energía son tan pequeñas que las correspondientes variaciones de la masa no se pueden revelar por vía experimental. Una cafetera caliente tiene más masa que cuando está fría; pero incluso con las balanzas más sensibles no se puede apreciar esta diferencia. Únicamente en las transformaciones de los núcleos atómicos y de las partículas elementales son tan grandes las variaciones de la energía, que las variaciones de la masa relacionadas con ellas son ya apreciables.

En la explosión de una bomba de hidrógeno se libera una cantidad de energía enorme (de cerca de  $10^{17}$  J). Esta energía es mayor que toda la energía eléctrica que se produce en el mundo durante varios días. La energía desprendida se traslada junto con la radiación. Esta última posee no sólo energía, sino también masa, la cual es igual, aproximadamente, al 0,1% de la masa de los materiales iniciales.

**ENERGÍA EN REPOSO.** Cuando las velocidades del movimiento del cuerpo son pequeñas ( $v \ll c$ ), la fórmula (8.9) se puede escribir así<sup>1)</sup>:

$$E \approx m_0 c^2 + \frac{m_0 v^2}{2}. \quad (8.11)$$

Aquí el segundo término es la energía cinética ordinaria del cuerpo. Mayor interés y novedad ofrece el primer término: él determina la energía del cuerpo cuando la velocidad es nula, es decir, la llamada *energía en reposo*  $E_0$ :

$$E_0 = m_0 c^2. \quad (8.12)$$

Este resultado es sorprendente. Todo cuerpo, por el sólo hecho de su existencia, posee energía, y ésta es proporcional a la masa en reposo  $m_0$ .

Cuando las partículas elementales, QUE POSEEN masa en reposo, se transforman en partículas en que  $m_0 = 0$ , la energía en reposo se transforma totalmente en energía cinética de las partículas recién formadas.

Este hecho es la demostración experimental más evidente de la existencia de la energía en reposo.

- ¿ ?
1. Escriba la fórmula de la dependencia entre la masa de un cuerpo y la velocidad con la que este se mueve.
  2. ¿Bajo qué condición se puede considerar que la masa de un cuerpo no depende de la velocidad?
  3. ¿En qué consiste la ley de la relación entre la masa y la energía?
  4. ¿Qué es la energía en reposo?
  5. ¿Por qué cuando un cuerpo se calienta no se logra apreciar experimentalmente el aumento de su masa?

- Ejercicio
- 11
1. Desde el punto de vista de un observador que se halla en un tren en marcha, la caída de dos rayos, uno en el punto *A* (delante del tren) y otro en el punto *B* (detrás del tren) fue simultánea. ¿Qué rayo cayó antes, desde el punto de vista de un observador situado en tierra?
  2. ¿Cuál es la velocidad de un electrón si su masa es 40000 veces mayor que la masa en reposo?
  3. Una cantidad de agua igual a 1 kg se calienta 50 K. ¿Cuánto aumentará su masa?

## BREVE RESUMEN DEL CAPÍTULO 8

La teoría especial de la relatividad de Einstein se basa en dos postulados.

El principio de la relatividad es el postulado principal de esta teoría. Se

<sup>1)</sup> En este caso se utiliza la expresión aproximada de la masa (8.8).

enuncia así: todos los procesos de la naturaleza transcurren de igual forma en todos los sistemas inerciales de referencia.

Según el segundo postulado, la velocidad de la luz en el vacío es la misma para todos los sistemas inerciales de referencia. Esta velocidad no depende de la velocidad de la fuente ni de la velocidad del receptor de la señal luminosa.

La teoría de la relatividad es una nueva concepción del espacio y del tiempo que ha venido a sustituir las viejas representaciones clásicas. Según la teoría de la relatividad, la simultaneidad de los sucesos, la distancia y los intervalos de tiempo no son magnitudes absolutas, sino relativas. Dependen del sistema de referencia.

De la teoría de la relatividad se infiere que la velocidad de la luz en el vacío es la máxima velocidad posible de transmisión de las interacciones en la naturaleza.

Cuando la velocidad de un cuerpo aumenta, su masa  $m$  no permanece constante, sino que crece de acuerdo con la fórmula

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

en la que  $m_0$  es la masa en reposo del cuerpo. Respectivamente, el impulso relativista del cuerpo se expresa por la fórmula

$$\vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Teniendo en cuenta esta expresión del impulso, la ley fundamental de la dinámica relativista se puede escribir en la misma forma que la segunda ley de Newton:

$$\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \vec{F}$$

La consecuencia más importante de la teoría de la relatividad para la física nuclear y la física de las partículas elementales es la relación entre la masa y la energía. La energía  $E$  de un cuerpo o sistema de cuerpos es igual a su masa multiplicada por el cuadrado de la velocidad de la luz:

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

La expresión  $E_0 = m_0 c^2$  representa la energía en reposo.

## 9.1. Tipos de radiación. Fuentes de luz

Hasta aquí hemos venido estudiando la propagación de las ondas luminosas. Ahora vamos a tratar de la radiación de la luz por los cuerpos.

La luz está compuesta por ondas electromagnéticas cuya longitud va desde  $4 \cdot 10^{-5}$  hasta  $8 \cdot 10^{-5}$  cm. Estas ondas electromagnéticas son emitidas por las partículas cargadas cuando se mueven con aceleración. Estas partículas cargadas entran en la composición de los átomos que forman la sustancia. Pero si se desconoce la estructura del átomo es imposible decir nada fidedigno acerca del mecanismo de la radiación. Sólo está claro que dentro del átomo no hay luz, lo mismo que dentro de una cuerda de piano no hay sonido. Así como la cuerda empieza a sonar cuando la golpea el mazo, los átomos generan luz cuando se les excita. Para que un átomo comience a radiar hay que transmitirle cierta cantidad de energía. Al radiar, el átomo pierde la energía recibida, y para que la sustancia siga emitiendo luz continuamente es necesario suministrar energía del exterior a sus átomos.

**RADIACIÓN TÉRMICA.** La forma de radiación más simple y extendida es la *térmica*, en la cual la energía que pierden los átomos al emitir luz es compensada por la energía del movimiento térmico de los mismos átomos (o moléculas) del cuerpo radiante. Cuanto más elevada sea la temperatura del cuerpo, tanto más rápidamente se moverán los átomos. En los choques de los átomos (o moléculas) rápidos entre sí una parte de su energía cinética se convierte en energía de excitación de los átomos, que después emiten luz.

La radiación del Sol es una radiación térmica. También es una fuente térmica de luz la lámpara eléctrica de incandescencia. Ésta es una fuente de luz muy cómoda, pero poco económica. Sólo un 12%, aproximadamente, de toda la energía de la corriente eléctrica que se desprende en el filamento de la lámpara se transforma en energía luminosa. Finalmente, otra fuente térmica de luz es la llama. En ella los gránulos de hollín (partículas de combustible que no han tenido tiempo de arder) se ponen candentes, a expensas de la energía que desprende el combustible al quemar, y emiten luz.

**ELECTROLUMINISCENCIA.** La energía que necesitan los átomos para emitir luz la pueden tomar de fuentes no térmicas. Durante la descarga en gases el campo eléctrico comunica a los electrones una gran energía cinética. Los electrones rápidos experimentan choques inelásticos con los átomos. Parte de la energía cinética de los electrones se gasta en excitar los átomos. En tanto que los átomos así excitados ceden la energía en forma de ondas luminosas. En virtud de esto la descarga en un gas va acompañada de emisión de luz. Esto es la *electroluminiscencia*.



Serguéi Ivánovich Vavilov (1891-1951), eminente físico, hombre de Estado y figura social soviética, presidente de la Academia de Ciencias de la URSS de 1945 a 1951. Sus principales trabajos científicos versan sobre óptica física y, en primer lugar, sobre fotoluminiscencia. Su estudio de la polarización de la luz luminiscente llevó al esclarecimiento de la naturaleza de los radiadores elementales. Bajo su dirección se elaboró la tecnología para fabricar las lámparas de "luz solar" y se desarrolló el método de análisis por luminiscencia de la composición química de las sustancias. También bajo su dirección, P. A. Cherenkov descubrió en 1934 la radiación de luz por los electrones que se mueven en un medio con mayor velocidad que la luz en dicho medio.

La aurora boreal es una manifestación de la electroluminiscencia. Los flujos de partículas cargadas emitidos por el Sol son capturados por el campo magnético de la Tierra. En los polos magnéticos de nuestro planeta estos flujos excitan los átomos que hay en las capas superiores de la atmósfera, lo que hace que estas capas se iluminen. La electroluminiscencia se utiliza en los tubos para anuncios luminosos.

**CATODOLUMINISCENCIA.** La luminiscencia que se produce en los sólidos al bombardearlos con electrones se llama *catodoluminiscencia* o *luminiscencia catódica*. En virtud de la catodoluminiscencia se iluminan las pantallas de los tubos catódicos de televisión.

**QUIMIOLUMINISCENCIA.** Durante ciertas reacciones químicas que se desarrollan con desprendimiento de energía, una parte de ésta se transforma directamente en energía luminosa. La fuente de luz, en este caso, permanece fría (es decir, a la temperatura ambiente). Este fenómeno recibe el nombre de *quimioluminiscencia*. Sin duda son muchos los que han tenido ocasión de observarla. En verano, por la noche, se pueden ver unos insectos muy interesantes, las luciernagas o gusanillos de luz. En su cuerpo "arde" una pequeña "linterna" verde. Si los mismos se cogen uno no se quema los dedos. La manchita luminosa del abdomen de la luciernaga tiene casi la misma temperatura que el aire que la rodea. La propiedad de emitir luz también la poseen otros organismos; bacterias, insectos y muchos peces que viven a gran profundidad, donde no llega la luz del Sol. Algunas veces emiten luz en la oscuridad los pedacitos de madera en putrefacción.

Lamentablemente, hasta ahora no se han conseguido crear fuentes de luz prácticas cuya acción se base en la quimioluminiscencia.

**FOTOLUMINISCENCIA.** La luz que incide sobre una sustancia en parte es reflejada y parcialmente absorbida. En la mayoría de los casos la energía absorbida sólo sirve para calentar los cuerpos. No obstante, algunos cuerpos

empiezan a emitir luz bajo la influencia directa de la radiación que sobre ellos incide. En esto consiste la *fotoluminiscencia*. La luz excita los átomos de la sustancia (o sea, aumenta su energía interna) y luego ellos mismos emiten luz. Por ejemplo, las pinturas luminosas con que se recubren muchas figurillas para los árboles de navidad emiten luz después de haber sido irradiadas.

La luz emitida en la fotoluminiscencia tiene, por regla general, mayor longitud de onda que la luz que excitó la luminiscencia. Esto se puede observar haciendo un experimento. Si sobre un recipiente que contenga fluoresceína (colorante orgánico) se dirige un haz luminoso que atraviese previamente un filtro óptico violeta, el líquido empieza a emitir luz amarillo-verdosa, es decir, luz cuya longitud de onda es mayor que la de la luz violeta.

El fenómeno de la fotoluminiscencia se utiliza mucho en las lámparas de "luz solar". El físico soviético S. I. VAVILOV propuso recubrir la superficie interna de los tubos de descarga con sustancias capaces de emitir luz bajo la influencia de la radiación de onda corta de la descarga en gas. Las lámparas de luz solar son, aproximadamente, tres o cuatro veces más económicas que las habituales lámparas de incandescencia.

## 9.2. Espectros y aparatos espectrales

### DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA EN EL ESPECTRO.

Ninguna fuente de luz produce *luz monocromática*, es decir, de una longitud de onda rigurosamente determinada. De esto nos convencerán los experimentos de descomposición de la luz en un espectro por medio de un prisma, así como los de interferencia y de difracción.

La energía que lleva consigo la luz de la fuente está distribuida de un modo determinado entre las ondas de todas las longitudes que entran en la composición del haz luminoso. Puede decirse también que la energía está distribuida entre las frecuencias, ya que la longitud de onda y la frecuencia están relacionadas por una simple expresión

$$\lambda\nu = c,$$

Toda fuente de luz se caracteriza por la energía total que emite en la unidad de tiempo. La energía radiada no se distribuye uniformemente entre las ondas de distinta longitud. Por eso una característica muy importante de la radiación es la distribución de la energía emitida en la unidad de tiempo entre las longitudes de onda o frecuencias.

Esta distribución puede hallarse empíricamente. Para esto, con un prisma, hay que obtener el espectro de la radiación, por ejemplo, de un arco voltaico, y medir la energía luminosa correspondiente a pequeños intervalos espectrales de anchura  $\Delta\nu$ . A ojo no es posible apreciar (ni siquiera aproximadamente) la distribución de la energía. El ojo humano posee sensibilidad selectiva para con la luz: su sensibilidad máxima se encuentra en la región verde-amarilla del espectro. Lo mejor es valerse de la propiedad que tiene el cuerpo negro de absorber casi totalmente la luz de todas las longitudes de onda y de calentarse a expensas de la energía luminosa. Basta medir la temperatura del cuerpo y por ella formarse una idea de la cantidad de energía absorbida en la unidad de tiempo.

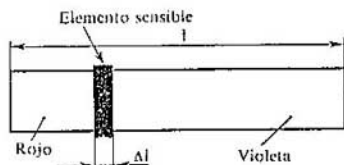


Fig. 212

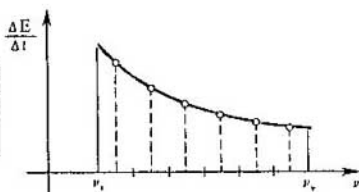


Fig. 213

El termómetro ordinario tiene demasiado poca sensibilidad para poderlo utilizar con éxito en estos experimentos. Para medir la temperatura se necesitan instrumentos más sensibles. Se puede emplear un termómetro eléctrico de resistencia en el cual el elemento sensible tenga la forma de lámina metálica delgada (véase "Física 3" de la editorial MIR). Esta lámina debe cubrirse de una capa delgada de negro de humo, que absorbe casi totalmente la luz de cualquier longitud de onda.

La lámina del termómetro sensible al calentamiento debe situarse ya sea en uno o bien en otro lugar del espectro (fig. 212). A todo el espectro visible, cuya longitud  $l$  va desde los rayos rojos hasta los violáceos inclusive, le corresponde el intervalo de frecuencias que se extiende desde  $\nu_r$  hasta  $\nu_v$ . A la anchura  $\Delta l$  de la lámina ennegrecida corresponde un pequeño intervalo  $\Delta\nu$ . Por el calentamiento de esta lámina se puede apreciar la cantidad de energía luminosa correspondiente al intervalo de frecuencia  $\Delta\nu$ . Desplazando la lámina a lo largo del espectro se pone de manifiesto que la mayor parte de la energía corresponde a la parte roja del espectro, y no a la amarillo-verdosa, como parece a simple vista.

Con los resultados de estos experimentos se puede construir la curva de la energía radiada en la unidad de tiempo en función de la frecuencia. La energía de la radiación se determina por la temperatura de la lámina, y la frecuencia no es difícil de hallar si el instrumento que se utiliza para descomponer la luz está graduado, es decir, si se conoce la frecuencia que corresponde a cada parte del espectro.

Tomando sobre el eje de abscisas los valores de las frecuencias correspondientes a los centros de los intervalos  $\Delta\nu$ , y sobre el eje de ordenadas la energía  $\Delta E/\Delta t$  absorbida por el instrumento en la unidad de tiempo, se obtiene una serie de puntos por los cuales se puede trazar una curva suave (fig. 213). Esta curva da una idea clara de cómo se distribuye la energía luminosa en la parte visible del espectro de la luz del arco voltaico.

**APARATOS ESPECTRALES.** Para el análisis espectral exacto ya no sirven dispositivos tan simples como lo son la rendija estrecha, para limitar el haz luminoso, y el prisma. El dispositivo más perfecto, en que se utiliza un prisma y una lente (véase la fig. 188), propuesto por Newton, tampoco es totalmente satisfactorio. Se necesitan dispositivos que den un espectro nítido, es decir, que separen bien las ondas de distinta longitud y que no permitan (o casi no permitan) que distintas partes del espectro se superpongan. Estos dispositivos

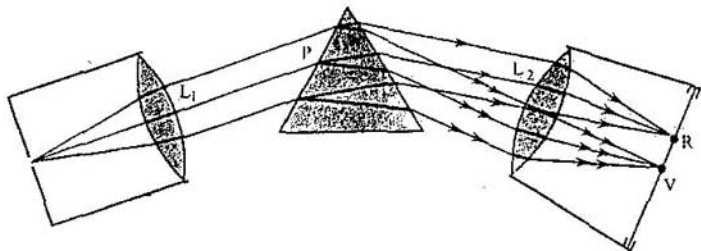


Fig. 214

se llaman *aparatos espectrales*. La parte fundamental de un aparato espectral suele ser un prisma o una red de difracción.

Veamos el esquema de la estructura de un aparato espectral de prisma (fig. 214). La radiación que se analiza entra primero en la parte del aparato denominada *colimador*. Éste consiste en un tubo, uno de cuyos extremos está cerrado por una pantalla opaca con una rendija estrecha, y en el otro hay una lente convergente  $L_1$ . La rendija se encuentra en el plano focal de la lente, por eso el haz luminoso divergente, que viniendo de la rendija incide sobre la lente, emerge de ella en forma de haz paralelo y cae sobre el prisma  $P$ .

Como a las distintas frecuencias corresponden índices de refracción diferentes, del prisma salen haces paralelos cuyas direcciones no coinciden. Estos haces inciden sobre la lente  $L_2$ . En el plano focal de esta lente hay una pantalla, que puede ser un vidrio esmerilado mate o una placa fotográfica. La lente  $L_2$  enfoca los haces de rayos paralelos sobre la pantalla y, en vez de una imagen de la rendija, se obtiene toda una serie de imágenes. A cada frecuencia (o, más exactamente, a cada estrecho intervalo espectral) corresponde una imagen. Todas estas imágenes juntas forman el espectro.

El aparato que acabamos de describir es un *espectrógrafo*. Si en lugar de la segunda lente y la pantalla se utiliza un anteojo para la observación visual de los espectros, el aparato recibe el nombre de *espectroscopio*. Los prismas y otros elementos de los aparatos espectrales no siempre se hacen, de vidrio. A veces se utilizan también materiales transparentes como el cuarzo, la sal gema y otros. Esto se debe a que el vidrio, que es transparente para las ondas electromagnéticas del espectro visible, absorbe intensamente las ondas de otras longitudes.

### 9.3. Tipos de espectros

La composición espectral de la radiación de diferentes sustancias es muy diversa. Pero, a pesar de esto, todos los espectros, como muestra la experiencia, se pueden dividir en tres tipos que difieren mucho entre sí.

**ESPECTROS CONTINUOS.** El espectro solar o el de una lámpara de arco es *continuo*, es decir, en él están representadas todas las longitudes de onda. En



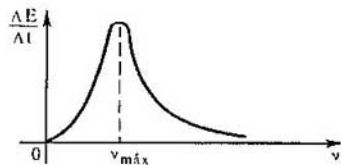


Fig. 215

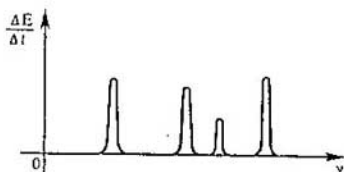


Fig. 216

este espectro no existen interrupciones y en la pantalla del espectrógrafo se puede ver una franja multicolor continua (fig. V, 1 de las láminas en color).

La distribución de la energía entre las frecuencias (o longitudes de onda) es distinta para cuerpos diferentes. Así, por ejemplo, un cuerpo de superficie muy negra radia ondas electromagnéticas de todas las frecuencias, pero la curva de la energía en función de la frecuencia tiene el máximo para una frecuencia determinada  $\nu_{máx}$  (fig. 215). Las energías de la radiación correspondiente a las frecuencias más pequeñas ( $\nu \rightarrow 0$ ) y muy grandes ( $\nu \rightarrow \infty$ ) son insignificantes. A medida que aumenta la temperatura el máximo de la energía de radiación se desplaza hacia la parte de las ondas cortas.

Los espectros continuos los dan, como muestra la experiencia, los cuerpos en estado sólido o líquido. Para obtener el espectro continuo hay que calentar el cuerpo hasta alta temperatura.

El carácter del espectro continuo y el propio hecho de su existencia se deben no sólo a las propiedades de los distintos átomos que irradian, sino también, y en alto grado, a la interacción de los átomos entre sí. Los gases no dan espectro continuo. Pero los líquidos y los sólidos se diferencian de los gases, en primer lugar, porque las interacciones entre sus átomos son muy intensas.

También produce un espectro continuo el plasma de alta temperatura. El plasma emite ondas electromagnéticas principalmente cuando los electrones chocan con los iones.

**ESPECTROS DE RAYAS.** Introduzcamos en la pálida llama de un mechero de gas un trocito de amianto humedecido en una solución de sal común. Si se observa la llama con un espectroscopio, sobre el fondo apenas distinguible del espectro continuo de aquélla, se destaca una raya amarilla brillante (fig. V, 2 de las láminas en color). Esta raya amarilla la da el vapor de sodio que se origina al desintegrarse las moléculas de sal común en la llama. En la misma lámina en color se dan también los espectros del hidrógeno y del helio. Cada uno de ellos es como una "empalizada" de rayas de color de distinto brillo, separadas por anchas franjas oscuras. Éstos son los llamados *espectros de rayas*. La existencia de un espectro de rayas significa que la sustancia emite luz sólo de longitudes de onda perfectamente determinadas (o, más exactamente, en determinados intervalos espectrales muy estrechos). En la fig. 216 se ve la distribución aproximada de la energía en un espectro de rayas. Cada raya tiene una anchura finita.

Los espectros de rayas los dan todas las sustancias en estado gaseoso atómico (no molecular). En este caso la luz la emiten los átomos, que

prácticamente no interaccionan entre sí. Este es el tipo más fundamental de los espectros.

Los átomos aislados de un elemento químico dado emiten longitudes de onda rigurosamente determinadas.

Para observar los espectros de rayas se utiliza generalmente la luz que el vapor de la sustancia produce en la llama o la luz de una descarga en un tubo lleno del gas que se analiza.

Si aumenta la densidad del gas elemental, las distintas rayas del espectro se ensanchan y, finalmente, cuando la densidad del gas es muy grande, la interacción de los átomos se hace considerable y las rayas empiezan a superponerse unas a otras formando un espectro continuo.

**ESPECTROS DE BANDAS.** Un espectro de bandas está formado por franjas aisladas, separadas por intervalos oscuros. Utilizando un aparato espectral muy bueno se puede descubrir que cada banda es el conjunto de un gran número de rayas muy próximas entre sí.

A diferencia de los espectros de rayas, los espectros de bandas son creados no por átomos, sino por moléculas no ligadas o ligadas débilmente unas con otras.

Para observar los espectros moleculares, lo mismo que para observar los espectros de rayas, se utiliza generalmente la luz que dan los vapores del gas en la llama o la de la descarga en el gas.

**ESPECTROS DE ABSORCIÓN.** Todas las sustancias cuyos átomos se encuentran en estado excitado emiten ondas luminosas cuya energía está distribuida de un modo determinado entre las longitudes de onda. La absorción de la luz por una sustancia también depende de la longitud de la onda. Así, un vidrio rojo deja pasar las ondas correspondientes a la luz roja ( $\lambda \approx 8 \cdot 10^{-5}$  cm) y absorbe todas las demás.

Si a través de un gas frío, que no irradia, se hace pasar luz blanca, sobre el fondo del espectro continuo de la fuente aparecen rayas oscuras (véase la fig. V, 5-8 de las láminas en color). El gas absorbe con la máxima intensidad precisamente la luz de aquellas longitudes de onda que él emite cuando está muy caliente. Las rayas oscuras sobre el fondo del espectro continuo son rayas de absorción, que, en conjunto, forman un *espectro de absorción*.

## 9.4. Análisis espectral

Los espectros de rayas desempeñan un importante papel especial, porque su carácter está ligado directamente con la estructura del átomo. Estos espectros los crean átomos que no sufren influencias externas. Por eso, al conocer los espectros de rayas, damos el primer paso para el estudio de la estructura atómica. Observando estos espectros los científicos tuvieron la posibilidad de "mirar" el interior del átomo. Aquí la óptica entra en contacto directo con la física atómica.

La propiedad principal de los espectros de rayas consiste en que las longitudes de onda (o las frecuencias) del espectro de rayas de una sustancia cualquiera dependen únicamente de las propiedades de los átomos de esta sustancia, y no dependen en absoluto del procedimiento por el cual se excita la

luminosidad de los átomos. Los átomos de cada elemento químico dan un espectro que no se parece a los espectros de todos los demás elementos: son capaces de irradiar un conjunto rigurosamente determinado de longitudes de onda.

En esto se basa el *análisis espectral*, es decir, el método para determinar la composición química de una sustancia por su espectro. Algo así como las huellas dactilares de las personas, individualmente inconfundibles, vienen a ser los espectros de rayas. El carácter único de los surcos cutáneos de las falanges terminales de los dedos ayudan con frecuencia a detener un delincuente. Del mismo modo, la individualidad de los espectros da la posibilidad de determinar la composición química de un cuerpo. Con el análisis espectral se puede descubrir un elemento dado en la composición de una sustancia compuesta incluso si la masa de dicho elemento no supera  $10^{-10}$  g. La sensibilidad de este método es grandísima.

El análisis cuantitativo de la composición de una sustancia por medio de su espectro es difícil, ya que el brillo de las rayas espectrales depende no sólo de la masa de la sustancia, sino también del procedimiento que se emplea para excitar la luminosidad. Así, a temperaturas no muy altas, muchas rayas espectrales no se manifiestan en general. No obstante, si se cumplen las condiciones establecidas en las normas para excitar la luminosidad, también es posible el análisis espectral cuantitativo.

En la actualidad ya han sido determinados los espectros de todos los átomos y existen tablas de ellos. Por medio del análisis espectral se han descubierto muchos elementos nuevos, como el rubidio, el cesio y otros. Los elementos han recibido, a menudo, nombres derivados del color de las rayas más intensas de su espectro. El rubidio, por ejemplo, da rayas rojo-oscuras, de color rubí. La palabra *cesio* (del latín *caesius*) significa azul celeste. Ese es el color de las rayas fundamentales del espectro del cesio.

Precisamente por medio del análisis espectral se ha sabido la composición química del Sol y de las estrellas. En estos casos los otros métodos de análisis son inaplicables. Las estrellas resulta que están formadas por los mismos elementos químicos que hay en la Tierra. Es curioso que el helio fue descubierto antes en el Sol que en la atmósfera de la Tierra. El nombre de este elemento recuerda la historia de su descubrimiento: la palabra *helio* (del griego *helios*) significa sol.

En virtud de su relativa sencillez y universalidad, el análisis espectral es el método fundamental de control de la composición de los materiales en la metalurgia, construcción de maquinaria e industria atómica. Por medio del análisis espectral se determina la composición química de las monas y minerales. La composición de las mezclas complejas, principalmente orgánicas, se analiza por sus espectros moleculares.

El análisis espectral se puede hacer no sólo ateniéndose a los espectros de emisión, sino también a los espectros de absorción. Precisamente las rayas de absorción del espectro del Sol y de las estrellas son las que permiten estudiar la composición química de estos cuerpos celestes. La brillante superficie luminosa del Sol—fotosfera—da un espectro continuo. La atmósfera solar absorbe selectivamente la luz de la fotosfera, lo que hace que aparezcan las rayas de absorción sobre el fondo del espectro continuo de la fotosfera.

Pero la atmósfera misma del Sol también emite luz. Durante los eclipses de Sol, cuando el disco solar está tapado por la Luna, se produce la "inversión" de las rayas del espectro. En vez de las rayas de absorción, en el espectro solar se destacan las rayas de emisión.

## 9.5. Radiación infrarroja y ultravioleta

**RADIACIÓN INFRARROJA.** Volvamos al experimento para investigar cómo está distribuida la energía en el espectro del arco voltaico, descrito en el § 9.2. Cuando la lámina ennegrecida—elemento sensible del termómetro—se desplaza hacia el extremo rojo del espectro se nota que la temperatura aumenta. Si la lámina se corre más allá del extremo rojo del espectro, donde el ojo no ve luz, el calentamiento de la lámina resulta ser todavía mayor. Las ondas electromagnéticas que producen este calentamiento reciben el nombre de *infrarrojas*. Estas ondas las emite todo cuerpo caliente incluso si no está incandescente. Por ejemplo, un horno caliente o una batería de calefacción emiten ondas infrarrojas, las cuales calientan sensiblemente los cuerpos que las rodean. Por eso las ondas infrarrojas se suelen llamar también *térmicas*.

Las ondas infrarrojas, imperceptibles para el ojo humano, tienen longitudes mayores que la de la onda de luz roja. El máximo de la energía de radiación del arco voltaico y de las lámparas de incandescencia corresponde a los rayos infrarrojos.

La radiación infrarroja se utiliza para secar pinturas, hortalizas, frutas, etc. Hay aparatos con los cuales la imagen infrarroja de un objeto, invisible, se hace visible. Se construyen gemelos y visores ópticos que permiten ver en la oscuridad.

**RADIACIÓN ULTRAVIOLETA.** Más allá del extremo violeta del espectro el termómetro eléctrico también posee de manifiesto una elevación de la temperatura, aunque no de mucha importancia. Por consiguiente, existen ondas electromagnéticas de menor longitud que las de la luz violeta. Estas ondas se llaman *ultravioletas*.

La radiación ultravioleta se puede descubrir empleando una pantalla recubierta de sustancia luminiscente. La pantalla empieza a emitir luz en aquella parte a la cual llegan los rayos que se encuentran más allá de la zona violeta del espectro.

Los rayos ultravioletas se caracterizan por ser químicamente muy activos. La emulsión fotográfica es muy sensible a la radiación ultravioleta. De esto es fácil cerciorarse si en un local oscuro se proyecta el espectro sobre un papel fotográfico. Una vez revelado, el ennegrecimiento del papel es mayor en la parte que se expuso más allá del extremo violeta del espectro que en la región visible de éste.

Los rayos ultravioletas no originan imágenes visuales, son invisibles. Pero su acción sobre la retina del ojo y sobre la piel es grande y destructora. Las capas superiores de la atmósfera absorben insuficientemente la radiación ultravioleta del Sol. Por eso en las montañas altas no se puede estar sin gafas oscuras ni permanecer desnudos durante mucho tiempo. El vidrio absorbe intensamente los rayos ultravioletas. Ésta es la razón por la cual los vidrios de

las gafas, transparentes para el espectro visible, protegen los ojos contra la radiación ultravioleta.

Sin embargo, los rayos ultravioletas en pequeñas dosis producen efectos terapéuticos. Los baños de Sol prudentes son beneficiosos sobre todo para los jóvenes; los rayos ultravioletas contribuyen al crecimiento y fortalecen el organismo. Además de su acción directa sobre los tejidos de la piel (formación del pigmento protector y de la vitamina  $D_2$ ), los rayos ultravioletas influyen en el sistema nervioso central, estimulando una serie de funciones vitales en el organismo.

Los rayos ultravioletas ejercen también acción bactericida. Destruyen bacterias patógenas y, para este fin, se utilizan en medicina.

## 9.6. Rayos X

Quizá no todos hayan oído hablar de rayos infrarrojos y ultravioletas, pero nadie ignora que existen los rayos X. Estos admirables rayos pasan a través de cuerpos que son opacos para la luz ordinaria. El grado de absorción de estos rayos es proporcional a la densidad de la sustancia. Por eso con los rayos X se pueden obtener fotografías (radiografías) de los órganos internos del cuerpo humano. En estas radiografías se distinguen bien los huesos del esqueleto (fig. 217) y se localizan diversas degeneraciones de los tejidos blandos.

En la URSS todos los ciudadanos se someten una vez al año a exploración fluoroscópica. Por medio de los rayos X se hacen radiografías del tórax que permiten prevenir posibles enfermedades antes de que el individuo comience a sentir sus síntomas.

**DESCUBRIMIENTO DE LOS RAYOS X.** Los rayos X fueron descubiertos en 1895 por el físico alemán Wilhelm Konrad ROENTGEN. Era éste un hombre capaz de observar y notar lo nuevo allí donde muchos científicos no veían nada de particular. Este don le ayudó a hacer el magnífico descubrimiento.

A finales del siglo XIX atrajo la atención general de los físicos la descarga eléctrica en gas a poca presión. En estas condiciones en el tubo de descarga se creaban flujos de electrones muy rápidos, que en aquel entonces recibieron el nombre de rayos catódicos. Su naturaleza aún no se conocía de un modo fidedigno. Sólo se sabía que se originaban en el cátodo del tubo.

Roentgen también se dedicó a investigar los rayos catódicos y pronto descubrió que una placa fotográfica que estaba cerca del tubo de descarga se velaba incluso envuelta en un papel negro. Más tarde consiguió observar otro fenómeno que le extrañó mucho. Una pantalla de papel impregnada ligeramente en solución de platino-cianuro de bario empezaba a emitir luz cuando con ella se envolvía el tubo de descarga. Y si Roentgen interponía su mano entre el tubo y la pantalla, se veían en ésta las sombras oscuras de los huesos sobre el fondo más claro del contorno de la mano.

El científico comprendió que en el tubo de descarga se originaba una radiación muy penetrante desconocida hasta entonces. Él mismo le dio el nombre de rayos X. Después fue denominada también con el término de "rayos Roentgen".



Wilhelm Roentgen (1845-1923), eminente físico alemán. En 1895 descubrió la radiación electromagnética de onda corta que se conoce con el nombre de rayos X o rayos Roentgen. Este descubrimiento ejerció enorme influencia en todo el desarrollo ulterior de la física y, en particular, condujo al descubrimiento de la radiactividad. El primer premio Nobel de física fue concedido a W. Roentgen. Contribuyó a la rápida aplicación práctica de su invento en medicina y a su propagación. La estructura del primer tubo de rayos X, que él construyó, se ha conservado en rasgos generales hasta hoy.

Roentgen observó que la nueva radiación se manifestaba en el punto en que los rayos catódicos (flujos de electrones rápidos) chocaban con la pared de vidrio del tubo. En este sitio el vidrio emitía luz verdosa. Experimentos posteriores demostraron que los rayos X se producen al ser decelerados los electrones rápidos por cualquier obstáculo, en particular por electrodos metálicos.

**PROPIEDADES DE LOS RAYOS X.** Los rayos descubiertos por Roentgen actuaban sobre la placa fotográfica y producían la ionización del aire, pero no se reflejaban apreciablemente ni se refractaban en ninguna sustancia. El campo electromagnético no ejercía influencia alguna sobre la dirección en que se propagaban.



Fig. 217

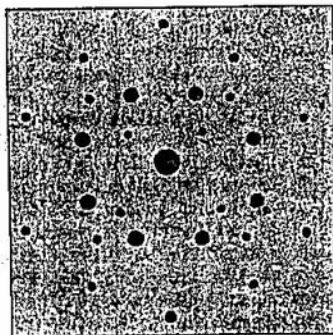


Fig. 218

Se supuso de inmediato que los rayos  $X$  son ondas electromagnéticas que se originan cuando los electrones son decelerados bruscamente. A diferencia de los rayos luminosos de la parte visible del espectro y de los rayos ultravioletas, los rayos  $X$  tienen una longitud de onda mucho menor. Esta longitud es tanto menor cuanto más energía tienen los electrones que chocan con el obstáculo. La gran penetrabilidad de los rayos  $X$  y sus demás peculiaridades se suponían debidas precisamente a la pequeñez de su longitud de onda. Pero esta hipótesis requería demostraciones, las cuales fueron aportadas 15 años después del descubrimiento de los rayos.

**DIFRACCIÓN DE LOS RAYOS  $X$ .** Si los rayos  $X$  son ondas electromagnéticas, deben difractarse, puesto que el fenómeno de la difracción es característico para todos los tipos de ondas. Los rayos  $X$  se hicieron pasar por rendijas muy estrechas practicadas en láminas de plomo, pero no pudo observarse nada semejante a la difracción. Entonces el físico alemán Max LAUE supuso que la longitud de onda de estos rayos era demasiado pequeña para que su difracción en obstáculos creados artificialmente pudiera ser descubierta, ya que es imposible hacer rendijas de  $10^{-8}$  cm de anchura, que es la dimensión del propio átomo. ¿Y si los rayos  $X$  tienen, aproximadamente, esa misma longitud de onda? Quedaba una sola posibilidad de difractarlos, utilizar como redes de difracción los cristales. Éstos son estructuras ordenadas en las cuales las distancias entre los distintos átomos son del mismo orden de magnitud que las dimensiones de éstos, es decir, de  $10^{-8}$  cm. Un cristal, con su estructura periódica, es un dispositivo natural que inevitablemente debe producir la difracción apreciable de las ondas, si la longitud de éstas se aproxima a las dimensiones de los átomos.

Y he aquí que un estrecho haz de rayos  $X$  fue dirigido sobre un cristal, detrás del cual se había colocado una placa fotográfica. El resultado que se obtuvo coincidía totalmente con las esperanzas más optimistas. Además de la gran mancha central que producían los rayos que se propagaban rectilíneamente, aparecían pequeñas manchitas regularmente dispuestas alrededor de aquella (fig. 218). La presencia de estas manchitas sólo podía explicarse por la difracción de los rayos  $X$  en la estructura ordenada del cristal.

El estudio de la figura de difracción dio la posibilidad de medir la longitud de onda de los rayos  $X$ , la cual resultó ser menor que la de los rayos ultravioletas y, por su orden de magnitud, igual a las dimensiones de los átomos ( $10^{-8}$  cm).

**APLICACIÓN DE LOS RAYOS  $X$ .** Los rayos  $X$  han encontrado muchas y muy importantes aplicaciones prácticas.

En medicina se utilizan para diagnosticar correctamente las enfermedades.

Su empleo en la investigación científica es muy extenso. Por la figura de difracción, que se obtiene al pasar estos rayos a través de los cristales, se consigue establecer el orden en que están colocados los átomos en el espacio, es decir, la estructura de los cristales. Hacer esto con las sustancias cristalinas inorgánicas no ofrece dificultad. Pero por medio del análisis estructural de rayos  $X$  se consigue descifrar también la estructura de los compuestos orgánicos más complejos, incluso de las proteínas. En particular se ha podido determinar la estructura molecular de la hemoglobina, que consta de decenas de millares de átomos.

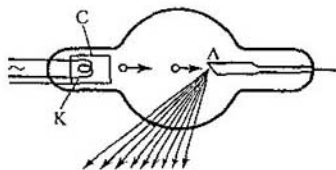


Fig. 219

Estos resultados han sido posibles gracias a que la longitud de onda de los rayos X es muy pequeña. Precisamente por eso se pudo "ver" la estructura molecular. Ver, claro está, no en el sentido directo de la palabra, se trata en obtener la figura de difracción, por medio de la cual, después de hacer no pocos esfuerzos para descifrarla, se puede reconstruir el carácter de la disposición espacial de los átomos.

Entre otras aplicaciones de los rayos X conviene destacar la *defectoscopia*, es decir, el método para detectar rechupes en las piezas de fundición, grietas en los railes, defectos en las costuras soldadas, etc. La defectoscopia de rayos X se basa en la variación que experimenta la absorción de los rayos X por las piezas cuando en ellas hay cavidades o inclusiones extrañas.

**ESTRUCTURA DEL TUBO DE RAYOS X.** Para obtener los rayos X se han concebido aparatos muy perfectos llamados *tubos de rayos X*. Estos tubos superan en mucho a los construidos por Roentgen.

En la fig. 219 se muestra esquemáticamente la estructura de un tubo electrónico de rayos X. El cátodo K es una espiral de wolframio que emite electrones en virtud de la emisión termoelectrónica. El cilindro C enfoca el flujo de electrones que van a chocar con el electrodo metálico (ánodo) A. Al ocurrir esto se generan los rayos X. La tensión entre el ánodo y el cátodo alcanza varias decenas de kilovoltios. En el tubo se crea un vacío profundo; la presión del gas en él es de  $10^{-5}$  a  $10^{-7}$  mm Hg.

## 9.7. Escala de las radiaciones electromagnéticas

Sabemos que la longitud de las ondas electromagnéticas puede ser muy diversa: desde valores del orden de  $10^3$  m (ondas hertzianas) hasta  $10^{-8}$  cm (rayos X). La luz visible constituye una parte insignificante del amplio espectro de las ondas electromagnéticas. Pero precisamente al estudiar esta pequeña parte del espectro fueron descubiertas otras radiaciones con propiedades extraordinarias.

En las guardas de este libro puede verse la escala completa de las ondas electromagnéticas, con indicación de las longitudes de onda y de las frecuencias de las distintas radiaciones, así como de los aparatos con los cuales se obtienen las ondas electromagnéticas de las distintas gamas de frecuencias. Se distinguen *las radiaciones de baja frecuencia, las ondas hertzianas, los rayos infrarrojos, la luz visible, los rayos ultravioletas, los rayos X y los rayos  $\gamma$* . Todas estas radiaciones, excepto los rayos  $\gamma$ , se han dado ya a conocer. La radiación de onda más corta es la de rayos  $\gamma$ , que son emitidos por los núcleos atómicos.

Entre las distintas radiaciones en principio no existe una diferencia esencial.



Todas ellas son ondas electromagnéticas generadas por partículas cargadas que se mueven con aceleración. Las ondas electromagnéticas se manifiestan, al fin de cuentas, por su acción sobre las partículas cargadas. En el vacío toda radiación electromagnética, cualquiera que sea su longitud de onda, se propaga con la velocidad de 300 000 km/s. Los límites entre las distintas zonas de la escala de radiaciones son puramente convencionales.

Las radiaciones de distinta longitud de onda se diferencian entre sí por el procedimiento de obtención (emisión por una antena, radiación térmica, radiación por deceleración de los electrones rápidos, etc.) y por los métodos para detectarlas.

De los procedimientos de obtención y detección de las ondas hertzianas se trató en el capítulo 5; de las ondas electromagnéticas de la gama óptica (infrarrojas, visibles y ultravioletas) y de los rayos X, se ha hablado brevemente en este capítulo. A continuación vamos a referirnos a los rayos  $\gamma$ .

A medida que disminuye la longitud de onda las diferencias cuantitativas de dicha longitud conducen a diferencias cualitativas importantes.

Las radiaciones de distinta longitud de onda se diferencian mucho entre sí por la capacidad de la sustancia para absorberlas. Las radiaciones de onda corta (los rayos X y, sobre todo, los rayos  $\gamma$ ) son poco absorbidas. Las sustancias opacas para las ondas de la gama visible son transparentes para estas radiaciones. El índice de reflexión de las ondas electromagnéticas también depende de la longitud de onda. Pero la diferencia principal entre las radiaciones de onda larga y las de onda corta consiste en que la radiación de onda corta revela las propiedades de las partículas. De esto vamos a tratar en el capítulo siguiente.

---

¿ ?

1. Enumere las fuentes de luz que conozca.
  2. ¿Es continuo el espectro de la luz que emite una lámpara de incandescencia?
  3. Describa cómo debe estar estructurado un aparato espectral en el cual, en vez de un prisma, se utilice una red de difracción.
  4. ¿Qué operaciones hay que hacer con un corpúsculo de sustancia para conocer su composición química, aplicando el análisis espectral?
  5. ¿Por qué la luz solar que pasa a través del vidrio de una ventana no broncea la piel?
  6. ¿Qué se determina por las rayas de absorción del espectro solar: la composición de la atmósfera del Sol o la de sus capas profundas?
  7. ¿Por qué procedimiento se detectan las ondas hertzianas, las radiaciones de la gama óptica y los rayos X?
- 

## BREVE RESUMEN DEL CAPÍTULO 9

La luz la emiten las partículas cargadas, es decir, los electrones, que se mueven en los átomos. Para que un átomo pueda radiar tiene que recibir energía del exterior. Si los átomos reciben la energía durante los choques en el proceso del movimiento térmico, se dice que la radiación es térmica. La causa de la electroluminiscencia y de la catodoluminiscencia es la excitación de los átomos por los electrones acelerados en un campo eléctrico. Los átomos pueden excitarse y emitir luz durante algunas reacciones químicas.

En esto consiste la quimioluminiscencia. Finalmente, una serie de cuerpos comienzan a emitir luz cuando sobre ellos actúa una radiación. Ésta es la fotoluminiscencia.

Las fuentes de luz más difundidas son las térmicas: el Sol, las lámparas eléctricas de incandescencia, la llama, etc.

Una característica muy importante de una radiación es la distribución de su energía entre las frecuencias o las longitudes de onda. Los espectros de emisión se investigan por medio de los aparatos espectrales. El elemento esencial de un aparato espectral es un prisma o una red de difracción.

La radiación que emiten los sólidos, los líquidos y el plasma de alta temperatura tiene espectro continuo. En el espectro continuo están representadas con distinta intensidad todas las longitudes de onda.

En cambio, la radiación que emite la sustancia en estado atómico gaseoso tiene espectro de rayas. Las longitudes de las ondas del espectro de rayas dependen únicamente de las propiedades de los átomos de la sustancia y no de los procedimientos de excitación de los átomos. En este hecho se funda el análisis espectral.

Los espectros de emisión de las moléculas constan de franjas aisladas, separadas por intervalos oscuros. Este tipo de espectro se llama espectro de bandas.

La absorción de la luz por la sustancia depende de la longitud de onda. La luz que más intensamente absorbe una sustancia es la de aquellas longitudes de onda en las cuales ella misma emite con intensidad la energía cuando se encuentra en estado muy caliente. Por las rayas de absorción se determina la composición química del Sol y de las estrellas.

La luz visible son ondas electromagnéticas de longitud desde  $4 \cdot 10^{-7}$  hasta  $8 \cdot 10^{-7}$  m. Las radiaciones cuyas longitudes de onda son mayores que la de la luz roja ( $8 \cdot 10^{-7}$  m) se llaman infrarrojas. Rayos infrarrojos emiten todos los cuerpos calientes.

Las ondas electromagnéticas cuyas longitudes son menores que  $4 \cdot 10^{-7}$  m se llaman ultravioletas. Los rayos ultravioletas se distinguen por su gran actividad química.

Aún menor es la longitud de onda de los rayos X. La longitud de onda de estos rayos es del orden de las dimensiones de los átomos. Los rayos X se producen cuando los electrones que han pasado por una tensión aceleradora de varios kilovoltios se deceleran bruscamente. Estos rayos se utilizan en medicina (diagnóstica de rayos X), en la técnica (defectoscopía de rayos X) y en la investigación científica.

La escala de las ondas electromagnéticas se extiende desde las ondas hertzianas largas ( $\lambda > 1$  km) hasta los rayos gamma ( $\lambda < 10^{-10}$  m). Las ondas electromagnéticas de distinta longitud se dividen convencionalmente en gamas atendiendo a diversos criterios (procedimiento de obtención, método de detección, carácter de su interacción con la sustancia). Las diferencias cuantitativas de las longitudes de onda conduce a diferencias cualitativas importantes. La radiación de onda corta pone de manifiesto las propiedades de las partículas.

# Física cuántica

## Introducción

(Surgimiento de la teoría cuántica)

La gran revolución en la física coincidió con el comienzo del siglo XX. Los intentos de explicar las leyes de la distribución de la energía en los espectros de emisión térmica (radiación electromagnética del cuerpo caliente) que se observaban en los experimentos resultaron infructuosos. Las leyes del electromagnetismo de Maxwell, tantas veces comprobadas, se "plantaron" inesperadamente cuando se quiso aplicarlas al problema de la emisión de ondas electromagnéticas cortas por la sustancia. Esto era tanto más sorprendente por cuanto estas leyes definen muy bien la emisión de las ondas hertzianas por una antena y, en su tiempo, la existencia misma de las ondas electromagnéticas fue predicha fundándose en estas leyes.

La electrodinámica de Maxwell conducía en este caso a una conclusión sin sentido, según la cual un cuerpo caliente, perdiendo continuamente energía a causa de la radiación de ondas electromagnéticas, debería enfriarse hasta la temperatura de cero absoluto. De acuerdo con la teoría clásica, el equilibrio térmico entre la sustancia y la radiación es imposible. Pero la experiencia diaria demuestra que, en realidad, no ocurre nada de esto. Un cuerpo caliente no gasta toda su energía en radiar ondas electromagnéticas.

Buscando una salida a esta contradicción entre la teoría y la experiencia, el físico alemán MAX PLANCK supuso que los átomos emiten la energía electromagnética en porciones discontinuas, *cuantos*. La energía  $E$  de cada porción es directamente proporcional a la frecuencia  $\nu$  de la radiación:

$$E = h\nu.$$

El coeficiente de proporcionalidad  $h$  recibe el nombre de *constante de Planck*.

La suposición de Planck significaba de hecho que las leyes de la física clásica son inaplicables a los fenómenos del micromundo.

La teoría de la radiación térmica construida por Planck concordaba perfectamente con la experiencia. Por la distribución de la energía entre las frecuencias, conocida experimentalmente, se determinó el valor de la constante de Planck. Dicho valor resultó ser muy pequeño:

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}.$$

En el párrafo siguiente se estudiará otro fenómeno físico con ayuda del cual también se puede determinar la constante de Planck, pero por un procedimiento más sencillo.

Max Planck (1858-1947), gran físico teórico alemán, fundador de la teoría cuántica, o sea, de la teoría moderna del movimiento, las interacciones y las transmutaciones de las partículas microscópicas. En 1900, en un trabajo dedicado a la radiación térmica en equilibrio, introdujo por primera vez la suposición de que la energía de un oscilador (sistema que efectúa oscilaciones armónicas) toma valores discretos proporcionales a la frecuencia de las oscilaciones  $\nu$ . El coeficiente de proporcionalidad  $h$  entre la energía y la frecuencia recibió el nombre de constante de Planck. La energía electromagnética es emitida por el oscilador en porciones  $h\nu$  separadas. También hizo una gran aportación al desarrollo de la termodinámica.



Así, pues, Planck indicó la salida de las dificultades con que había tropezado la teoría. Pero este éxito fue logrado a costa de renunciar a la aplicación de las leyes de la física clásica a los sistemas microscópicos y a la radiación.

## 10.1. Efecto fotoeléctrico

En el desarrollo de las ideas acerca de la naturaleza de la luz se dio un gran paso al estudiar un fenómeno curioso, descubierto por H. Hertz y cuidadosamente investigado por el eminente físico ruso Alexandr Grigórichevich STOLIÉTOV. Este fenómeno se conoce con el nombre de *efecto fotoeléctrico*.

*Se llama efecto fotoeléctrico el desprendimiento (arranque) de electrones de una sustancia por la acción de la luz.*

Para observar el efecto fotoeléctrico se puede utilizar una plaquita de zinc unida a un electroscopio (fig. 220). Si la plaquita se carga positivamente, su iluminación, por ejemplo, con un arco voltaico, no influye en la rapidez con que se descarga el electroscopio. Pero si la plaquita se carga negativamente, el haz luminoso del arco descarga el electroscopio muy rápidamente.

Esto sólo tiene una explicación. La luz arranca electrones de la superficie de la plaquita. Si ésta tiene carga negativa, los electrones son repelidos y el electroscopio se descarga. Pero si la carga de la plaquita es positiva, los electrones arrancados por la luz son atraídos por la placa y vuelven a ella. Por eso la carga del electroscopio no varía.

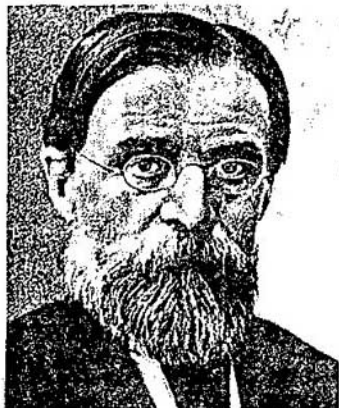
Cuando en la trayectoria del flujo luminoso se interpone un vidrio ordinario, la plaquita cargada negativamente ya no pierde electrones por muy intenso que sea dicho flujo. Como se sabe que el vidrio absorbe los rayos ultravioletas, de este experimento se deduce que es precisamente la parte ultravioleta del espectro la que produce el efecto fotoeléctrico. Este hecho, simple de por sí, no se puede explicar basándose en la teoría ondulatoria de la luz. Es incomprensible por qué las ondas luminosas de pequeña frecuencia no pueden arrancar electrones incluso si la amplitud de la onda es grande y, por consiguiente, es grande también la fuerza que actúa sobre los electrones.

**LÉYES DEL EFECTO FOTOELÉCTRICO.** Para tener una idea más completa del efecto fotoeléctrico es necesario esclarecer de qué depende el número de electrones arrancados por la luz (fotoelectrones) de la superficie de la sustancia y qué determina su velocidad o energía cinética. Con este fin se realizaron investigaciones experimentales que consistieron en lo siguiente. En una ampolla de vidrio, de la que se extrae el aire, hay dos electrodos (fig. 221). A través de una "ventana" de cuarzo, transparente no sólo para la luz visible, sino también para la radiación ultravioleta, penetra en la ampolla e incide sobre uno de los electrodos un haz de luz. A los electrodos se aplica una tensión, que puede variarse con un potenciómetro y medirse con un voltímetro. Al electrodo iluminado se conecta el polo negativo de la batería. Bajo la acción de la luz este electrodo emite electrones que, al moverse en el campo eléctrico, originan una

Alexandr Grigóricvich Stoliétov (1839-1896), eminente físico ruso. Conocido en todo el mundo por su investigación del efecto fotoeléctrico. Demostró la posibilidad de utilizar dicho efecto en la práctica.

En su tesis doctoral "Estudio de la función imanación del hierro dulce" elaboró el método de investigación de los materiales ferromagnéticos y estableció la forma de la curva de imanación. Este trabajo se utilizó mucho en la práctica al construir máquinas eléctricas.

Stoliétov hizo grandes esfuerzos en pro del desarrollo de la física en Rusia. Por iniciativa suya se creó el Instituto de Física adjunto a la Universidad de Moscú.



corriente eléctrica. Cuando las tensiones son pequeñas no todos los electrones arrancados por la luz llegan al otro electrodo. Si, manteniendo constante el flujo luminoso, aumentamos la diferencia de potencial entre los electrodos, la intensidad de la corriente crece. Para cierto valor de la tensión la intensidad de la corriente alcanza su valor máximo, después de lo cual cesa su crecimiento (fig. 222). El valor máximo de la intensidad de la corriente  $I_s$  recibe el nombre de *corriente de saturación*. Esta corriente viene determinada por el número de electrones que emite por segundo el electrodo iluminado.

Variando en este experimento el flujo luminoso se consigue establecer que el número de electrones arrancados por la luz de la superficie del metal en 1 s es directamente proporcional a la energía de la onda luminosa absorbida durante ese tiempo. En esto no hay nada inesperado: cuanto mayor es la energía del haz luminoso tanto más eficaz es su acción.

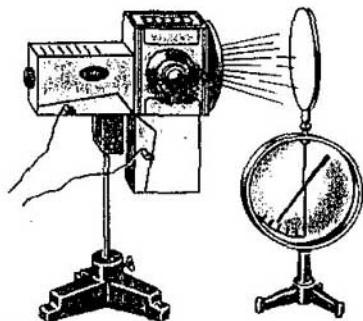


Fig. 220

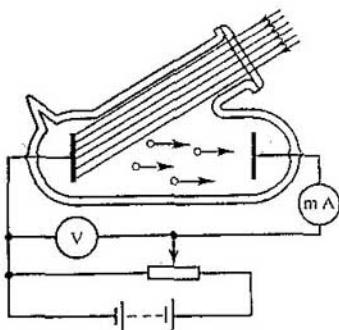


Fig. 221

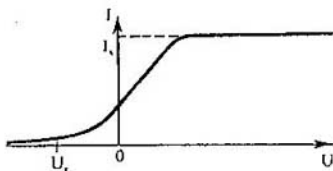


Fig. 222

Detengámonos ahora en la medición de la energía cinética (o de la velocidad) de los electrones. En la gráfica que reproduce la fig. 222 se ve que la intensidad de la corriente fotoeléctrica es distinta de cero incluso cuando la tensión es nula. Esto significa que una parte de los electrones arrancados por la luz llegan al electrodo derecho (véase la fig. 221) en ausencia de tensión. Si se invierte la polaridad de la batería, la intensidad de la corriente disminuye y, con cierto valor  $U_r$  de la polaridad invertida, se anula. Se debe esto a que el campo eléctrico decelera los electrones arrancados hasta detenerlos totalmente y, luego, hace que retornen al electrodo.

La *tensión retardadora*  $U_r$  depende de la energía cinética máxima de los electrones arrancados por la luz. Midiendo la tensión retardadora y aplicando el teorema de la energía cinética (véase el libro "Física 2" de Ed. MIR), se puede hallar el valor máximo de la energía cinética de los electrones:

$$\frac{mv^2}{2} = eU_r.$$

Si varía la intensidad de la luz (es decir, la energía que incide sobre el electrodo en la unidad de tiempo), la tensión retardadora, como muestran los experimentos hechos, no varía. Esto significa que no varía la energía cinética de los electrones. Desde el punto de vista de la energía ondulatoria este hecho es incomprensible, ya que cuanto mayor sea la intensidad de la luz, tanto mayores serán las fuerzas que actúan sobre los electrones por parte del campo electromagnético de la onda luminosa y, al parecer, tanto más energía debería transmitirse a los electrones.

Los experimentos pusieron de manifiesto que la energía cinética de los electrones arrancados por la luz sólo depende de la frecuencia de ésta. La energía cinética máxima de los fotoelectrones crece linealmente con la frecuencia de la luz y no depende de la intensidad de ésta. Si la frecuencia de la luz es menor que cierta frecuencia mínima  $\nu_{\min}$ , magnitud ésta del todo determinada para cada sustancia dada, el efecto fotoeléctrico no se produce.

## 10.2. Teoría del efecto fotoeléctrico

Todos los intentos de explicar el fenómeno del efecto fotoeléctrico basándose en las leyes de la electrodinámica de Maxwell, según la cual la luz es una onda electromagnética distribuida continuamente en el espacio, resultaron infructuosos. Era imposible comprender por qué la energía de los fotoelectrones sólo está determinada por

la frecuencia de la luz y por qué la luz arranca electrones únicamente cuando su longitud de onda es pequeña.

La explicación del efecto fotoeléctrico fue dada en 1905 por Albert Einstein, que desarrolló la idea de Planck sobre la emisión discontinua de la luz. En las leyes empíricas del efecto fotoeléctrico vio Einstein la confirmación más convincente de que la luz tiene estructura discontinua y es absorbida en porciones separadas (discretas). La energía  $E$  de cada porción de radiación, en total acuerdo con la hipótesis de Planck, es proporcional a la frecuencia:

$$E = h\nu, \quad (10.1)$$

donde  $h$  es la constante de Planck.

De que la luz sea emitida, como demostró Planck, en porciones no se infiere aún que la estructura de la propia luz sea discontinua, como del hecho de que la lluvia caiga en forma de gotas no se sigue que el agua de los arroyos esté formada por partes o gotas indivisibles. Solamente el efecto fotoeléctrico puso de manifiesto que la luz tiene efectivamente estructura discontinua: la porción de energía luminosa radiada  $E = h\nu$  conserva en lo sucesivo su individualidad. Sólo pueden ser absorbidas porciones enteras. La energía de cada porción de radiación se determina por la fórmula (10.1).

La energía cinética del fotoelectrón se puede hallar aplicando la ley de conservación de la energía. La energía de la porción de luz  $h\nu$  se gasta en realizar el *trabajo de extracción o salida*  $A$ , es decir, el trabajo necesario para arrancar el electrón del metal, y en comunicarle energía cinética. Por lo tanto,

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}. \quad (10.2)$$

Esta ecuación explica los hechos principales concernientes al efecto fotoeléctrico. La intensidad de la luz, según Einstein, es proporcional al número de cuantos (porciones) de energía que hay en el haz luminoso y, por consiguiente, determina el número de electrones que arranca del metal. La velocidad de los electrones, de acuerdo con (10.2), viene determinada únicamente por la frecuencia de la luz y por el trabajo de extracción, que depende, a su vez, del tipo de metal y del estado de su superficie. De la intensidad de la luz no depende.

En cada sustancia se observa el efecto fotoeléctrico si la frecuencia  $\nu$  de la luz es mayor que un valor mínimo  $\nu_{\min}$ , ya que para arrancar un electrón del metal, incluso sin comunicarle energía cinética, es necesario realizar el trabajo de extracción  $A$ . Por consiguiente, la energía del cuanto de luz debe ser mayor que dicho trabajo:

$$h\nu > A.$$

La frecuencia límite (mínima)  $\nu_{\min}$  recibe el nombre de *frecuencia umbral* o *umbral rojo* fotoeléctrico. Esta frecuencia se expresa así:

$$\nu_{\min} = \frac{A}{h}. \quad (10.3)$$



El trabajo de extracción  $A$  depende del tipo de metal. Por eso la frecuencia umbral  $\nu_{\min}$  (umbral rojo) es distinta para sustancias diferentes.

Para el zinc la frecuencia umbral es la correspondiente a la longitud de onda umbral  $\lambda_{\max} = 3,7 \cdot 10^{-5}$  cm (radiación ultravioleta). Esto explica el resultado del experimento de interrupción del efecto fotoeléctrico por medio de la lámina de vidrio, que absorbe los rayos ultravioletas.

El trabajo de extracción en el aluminio y en el hierro es mayor que en el zinc. Por eso en el experimento descrito en el § 10.1 se utilizó una plaquita de zinc. En los metales alcalinos, por el contrario, el trabajo de extracción es menor y la longitud de onda umbral  $\lambda_{\max}$  es mayor. Así, para el sodio  $\lambda_{\max} = 6,8 \times 10^{-5}$  cm.

Aplicando la ecuación de Einstein (10.2) se puede hallar la constante de Planck  $h$ . Para esto hay que determinar experimentalmente la frecuencia  $\nu$  de la luz y el trabajo de extracción  $A$  y medir la energía cinética de los fotoelectrones. Este tipo de medidas y cálculos dan:  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  J·s. Exactamente este mismo valor fue hallado por Planck cuando estudiaba la teoría de otro fenómeno muy distinto, la radiación térmica. La coincidencia de los valores de la constante de Planck obtenidos por métodos diferentes confirma que la hipótesis acerca del carácter discontinuo de la emisión y la absorción de la luz por la sustancia es correcta.

## 10.3. Fotones

La luz, al ser emitida y absorbida, se comporta como un flujo de partículas cuya energía  $E = h\nu$  depende de la frecuencia. La porción de luz inesperadamente resultó ser muy parecida a lo que se admite denominar partícula. Las propiedades de la luz que se manifiestan durante la emisión y la absorción se llaman corpusculares. La propia partícula de luz recibió el nombre de *fotón* o *cuanto de luz*.

El fotón, como las partículas, tiene una determinada porción de energía  $h\nu$ . La energía del fotón se suele expresar no por medio de la frecuencia  $\nu$ , sino por la frecuencia angular  $\omega = 2\pi\nu$ . En este caso, en vez del coeficiente de proporcionalidad  $h$ , se utiliza la magnitud  $\hbar$  (que se lee "h cruzada" o "h de Dirac"),

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}.$$

Entonces la energía del fotón se escribe así:

$$E = h\nu = \hbar\omega. \quad (10.4)$$

De acuerdo con la teoría de la relatividad, la energía está siempre relacionada con la masa por la fórmula  $E = mc^2$ . Y como la energía del fotón es  $h\nu$ , su masa  $m$  se determina así:

$$m = \frac{h\nu}{c^2}. \quad (10.5)$$

El fotón no tiene masa en reposo  $m_0$ , es decir, no existe en estado de reposo y al generarse adquiere inmediatamente la velocidad  $c$ . La masa definida por la fórmula (10.5) es la masa del fotón en movimiento. Conociendo la masa y la velocidad del fotón se puede hallar su impulso:

$$p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \quad (10.6)$$

El impulso del fotón está dirigido en el sentido del rayo de luz.

Cuanto mayor sea la frecuencia, tanto mayores serán la energía y el impulso del fotón y tanto más claramente se manifestarán las propiedades corpusculares de la luz. Como la constante de Planck es muy pequeña, la energía de los fotones de la luz visible es insignificante. Los fotones correspondientes a la luz verde tienen una energía de  $4 \cdot 10^{-19}$  J.

No obstante, en los magníficos experimentos de S. I. Vavilov se comprobó que el ojo humano, el más sensible de los "aparatos", es capaz de reaccionar ante diferencias de iluminación equivalentes a cuantos unitarios.

Así, pues, los científicos se vieron obligados a introducir el concepto de luz como un flujo de partículas. Esto puede parecer un retorno a la teoría corpuscular de Newton. Pero no debe olvidarse que la interferencia y la difracción de la luz nos dicen sin lugar a dudas que la luz tiene propiedades ondulatorias. La luz, pues, posee una *dualidad* de propiedades particular. Cuando la luz se propaga se manifiestan sus propiedades ondulatorias y cuando interacciona con la sustancia (emisión y absorción), se revelan sus propiedades corpusculares. Todo esto es, naturalmente, extraño y desacostumbrado. Figurárselo intuitivamente es imposible. No es posible imaginarse de un modo claro y completo los procesos del micromundo, porque son totalmente distintos de los fenómenos macroscópicos que el hombre viene observando durante millones de años y cuyas leyes fundamentales fueron enunciadas a finales del siglo XIX.

Con el tiempo la dualidad de propiedades se ha descubierto también en los electrones y en otras partículas elementales. El electrón, en particular, además de sus propiedades corpusculares, tiene propiedades ondulatorias. Se puede observar la difracción de los electrones.

Estas extraordinarias propiedades de los microobjetos se describen apoyándose en la *mecánica cuántica*, que es la teoría moderna del movimiento de las micropartículas. La mecánica de Newton es inaplicable en este caso. Pero el estudio de la mecánica cuántica supera el marco del curso de física de la enseñanza media.

## 10.4. Aplicaciones del efecto fotoeléctrico

El descubrimiento del efecto fotoeléctrico tuvo mucha importancia para poder profundizar el conocimiento de la naturaleza de la luz. Pero el mérito de la ciencia consiste no sólo en que esclarece la compleja y diversa estructura del mundo que nos rodea, sino también en que pone en nuestras manos los medios con los cuales se puede

perfeccionar la producción y mejorar las condiciones de vida material y cultural de la sociedad.

La aplicación del efecto fotoeléctrico hizo "hablar" al cinematógrafo y dio la posibilidad de transmitir las imágenes en movimiento (televisión). Utilizando aparatos fotoelectrónicos se ha conseguido crear máquinas herramientas que, sin la intervención del hombre, hacen piezas de acuerdo con los planos correspondientes. Aparatos basados en el efecto fotoeléctrico controlan las dimensiones de las piezas mejor que una persona cualquiera, conectan y desconectan a su debido tiempo los faros y el alumbrado público, etc.

Todo esto ha sido posible en virtud de haberse inventado las *células fotoeléctricas*, dispositivos en los cuales la energía de la luz regula la energía de una corriente eléctrica o se transforma en ella.

Una célula fotoeléctrica moderna consiste en una ampolla de vidrio cuya superficie interna está recubierta, en parte, por una capa delgada de metal, en el cual se pequeño el trabajo de extracción (fig. 223). Éste es el cátodo. A través de una "ventanilla" transparente penetra la luz en la ampolla. En el centro de ésta hay un bucle de alambre o un disco (ánodo) que sirve para capturar los fotoelectrones. El ánodo se conecta al polo positivo de una batería. Las células fotoeléctricas que se utilizan reaccionan a la luz visible e incluso a los rayos infrarrojos. Cuando incide la luz sobre el cátodo de la célula, en el circuito se produce una corriente eléctrica que acciona un relé determinado. La combinación de una célula fotoeléctrica con un relé permite construir multitud de dispositivos automáticos capaces de "ver". Uno de estos dispositivos automáticos es el aparato de control de entrada en el metro, que cierra el paso si se cruza un haz luminoso sin depositar previamente una moneda de cinco kopecks.

Aparatos semejantes sirven para evitar averías y accidentes de trabajo. En las fábricas una célula fotoeléctrica puede parar inmediatamente una prensa si en la zona de peligro se halla la mano del operario.

El esquema de un fotorrelé de este tipo se muestra en la fig. 224. Cuando la luz incide sobre la célula fotoeléctrica *F*, por el circuito de la batería *B<sub>1</sub>* pasa, a través de la resistencia *R*, una débil corriente. A los extremos de la resistencia están conectados la rejilla y el cátodo del triodo *T*. El potencial en el punto *C* (rejilla) es menor que el potencial en el punto *D* (cátodo). La lámpara está

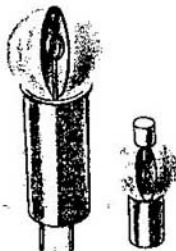


Fig. 223

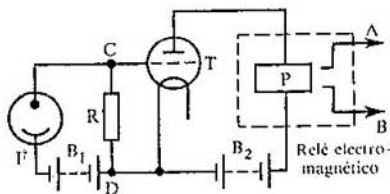


Fig. 224

bloqueada y en el circuito anódico del triodo no hay corriente. Si la mano del operario se encuentra en la zona de peligro, tapa el haz luminoso que va a la célula fotoeléctrica. La lámpara se desbloquea y por el arrollamiento del relé electromagnético intercalado en el circuito anódico pasa corriente. El relé responde y sus contactos cierran el circuito de alimentación del mecanismo que para la prensa.

Por medio de células fotoeléctricas se reproduce el sonido grabado en las películas de cine.

Además del efecto fotoeléctrico que acabamos de estudiar, llamado *efecto fotoeléctrico externo*, existe y tiene diversas aplicaciones el *efecto fotoeléctrico interno* en los semiconductores. Este fenómeno se utiliza en las células fotorresistivas (o fotoconductoras), que son dispositivos cuya resistencia depende de la iluminación. También se construyen células fotoeléctricas semiconductoras, que transforman directamente la energía luminosa en energía de una corriente eléctrica. Estos dispositivos pueden servir de fuentes de corriente y se pueden utilizar para medir la iluminación, por ejemplo, en los exposímetros fotográficos. En este mismo principio se basa el funcionamiento de las baterías solares que se instalan en las naves cósmicas.

## 10.5. Presión de la luz

Maxwell, basándose en la teoría electromagnética de la luz, predijo que la luz debe ejercer presión sobre los obstáculos.

Bajo la acción del campo eléctrico de la onda, los electrones oscilan en los cuerpos. Se genera una corriente eléctrica. Esta corriente está dirigida a lo largo de la intensidad del campo eléctrico (fig. 225). Sobre el movimiento ordenado de los electrones actúa la fuerza de Lorentz  $F$  por parte del campo magnético. Según la regla de la mano izquierda, la fuerza de Lorentz está dirigida en el sentido en que se propaga la onda. Esta es la fuerza de la *presión de la luz*.

Para demostrar que la teoría de Maxwell era justa tenía importancia medir la presión de la luz. Muchos científicos intentaron hacerlo, pero no lo

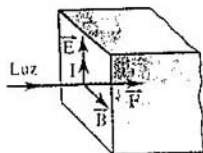


Fig. 225



Fig. 226



Piotr Nikoláevich Lébedev (1866-1912), célebre físico ruso. Fue el primero en medir la presión de la luz sobre los sólidos y los gases. Estos trabajos de Lébedev confirmaron cuantitativamente la teoría de Maxwell.

Tratando de hallar nuevas demostraciones experimentales de la teoría electromagnética de la luz, obtuvo ondas electromagnéticas de longitud milimétrica y estudió todas sus propiedades.

Lébedev creó en Rusia la primera escuela de físicos. Fueron discípulos suyos muchos físicos soviéticos destacados. El Instituto de Física de la Academia de Ciencias de la URSS lleva el nombre de Lébedev.

consiguieron, ya que dicha presión es muy pequeña. En un día de Sol despejado, sobre un metro cuadrado de superficie actúa una fuerza de sólo  $4 \cdot 10^{-8}$  N. El primero que logró medir la presión de la luz fue el destacado físico ruso Piotr Nikoláevich LÉBEDEV, en 1900.

El dispositivo que utilizó Lébedev consiste en una varilla muy liviana, suspendida de un hilo de vidrio finísimo, a cuyos extremos estaban pegadas dos aletas también muy ligeras (fig. 226). Todo el dispositivo se colocaba dentro de un recipiente del cual se extraía el aire. La luz incidía sobre las aletas situadas a uno de los lados de la varilla. El valor de la presión se podía apreciar por el ángulo de torsión del hilo. La dificultad de la medición se debía a que era imposible extraer todo el aire del recipiente (el movimiento de las moléculas del aire, producido por el calentamiento desigual de las aletas y de las paredes del recipiente, hace que se originen momentos de rotación adicionales). Además, en la torsión del hilo influye el desigual calentamiento de las caras de las aletas (la cara expuesta a la luz del foco se calienta más que la cara opuesta). Las moléculas que se reflejan en la cara más caliente transmiten a la aleta un impulso mayor que las moléculas que se reflejan en la cara menos caliente.

Lébedev consiguió superar todas estas dificultades, a pesar del bajo nivel de la técnica experimental que entonces existía, utilizando un recipiente muy grande y unas aletas muy delgadas. La existencia de la presión de la luz sobre los sólidos fue por fin demostrada y medida. El valor obtenido coincidió con el predicho por Maxwell. Más tarde, después de tres años de trabajo, Lébedev logró realizar otro experimento aún más delicado: medir la presión de la luz sobre los gases.

La aparición de la teoría cuántica de la luz permitió explicar de un modo más sencillo la causa de la presión de la luz. Los fotones, lo mismo que las partículas de sustancia que poseen masa en reposo, tienen impulso. Al ser absorbidos por un cuerpo, le comunican su impulso. Según la ley de conservación del impulso, el impulso del cuerpo será igual al de los fotones

absorbidos. Por eso el cuerpo en reposo se pone en movimiento. La variación del impulso del cuerpo, según la segunda ley de Newton, significa que sobre el cuerpo actúa una fuerza.

Los experimentos de Lédédev se pueden considerar como la demostración experimental de que los fotones tienen impulso. La ley de conservación del impulso es totalmente general. Esta ley es justa tanto para la substancia ordinaria como para los fotones o cuantos del campo electromagnético.

Aunque la presión de la luz es muy pequeña en las condiciones habituales, su acción puede llegar a ser muy importante. Dentro de las estrellas, a temperaturas de varias decenas de millones de grados, la presión de la radiación electromagnética puede alcanzar una magnitud enorme. Esta presión, junto con las fuerzas de gravitación, desempeña un papel esencial en los procesos intraestelares.

## 10.6. Acción química de la luz. Fotografía

Las moléculas por separado absorben la energía luminosa en porciones, es decir, en cuantos *hv*. En el caso de la luz visible y ultravioleta la radiación de esta energía es suficiente para descomponer muchas moléculas. En esto se manifiesta la *acción química de la luz*, ya que toda transformación de las moléculas es un proceso químico. Es frecuente que, una vez desintegradas las moléculas, por la luz, comience toda una cadena de transformaciones químicas. El descoloramiento de los tejidos sometidos a la luz del Sol y el bronceado de la piel son ejemplos de la acción química de la luz.

Bajo la acción de la luz se producen reacciones químicas muy importantes en las hojas verdes de los árboles y de la hierba, en las aciculares de las coníferas y en muchos microorganismos. En las hojas verdes, bajo la acción de la luz del Sol, se desarrollan procesos imprescindibles para la vida en la Tierra. Estos procesos nos proporcionan los alimentos y el oxígeno para respirar.

Las hojas absorben del aire el anhídrido carbónico y descomponen sus moléculas en las partes que las constituyen: carbono y oxígeno. Como estableció el biólogo ruso Kliment Arkádievich TIMIRIÁZEV, esto tiene lugar en las moléculas de clorofila bajo la influencia de los rayos rojos del espectro solar. Añadiendo a la cadena del carbono átomos de otros elementos, extraídos del suelo por las raíces, los vegetales construyen moléculas de las proteínas, grasas e hidratos de carbono que sirven para alimento del hombre y de los animales.

Se realiza esto a costa de la energía de los rayos solares. Aquí tiene especial importancia no sólo la energía misma, sino la forma en que ella llega. La *fotosíntesis* (así se llama este proceso) sólo puede efectuarse bajo la acción de la luz de un determinado intervalo del espectro.

El mecanismo de la fotosíntesis no se conoce aún en plena medida. Su conocimiento representará quizá para la humanidad el comienzo de una nueva era. Las proteínas y otras sustancias orgánicas complejas se podrán producir en fábricas bajo la bóveda celeste.

La acción química de la luz sirve de base a la *fotografía*.

La capa sensible de las placas y películas fotográficas está formada por pequeños cristales de bromuro de plata (AgBr) diseminados en gelatina. La



a



b

Fig. 227

incidencia de los cuantos de luz en los cristallitos hace que se desprendan electrones de algunos iones de bromo. Estos electrones son capturados por los iones de plata y en el cristallito se forma una pequeña cantidad de átomos de plata neutros. Pero la cantidad de plata metálica que se desprende a costa de este proceso es pequeña.

En efecto, puede notarse que una placa (o película) fotográfica expuesta a la luz se ennegrece con el tiempo, pero no mucho. Este ennegrecimiento se debe a la formación de la plata metálica. La imagen invisible que se obtiene sobre la placa fotográfica por la acción de la luz se llama imagen *latente*.

La primera operación a que se somete la placa, una vez impresionada, es el *revelado*. Para esto la placa se introduce en una disolución de hidroquinona, metol u otras sustancias, bajo cuya influencia en todos los cristallitos de bromuro de plata que sufrieron la acción de la luz se produce el desprendimiento de la plata metálica. En la placa se obtiene así la imagen negativa del objeto, en la cual el sitio de las partes claras lo ocupan las oscuras y viceversa (fig. 227, a).

La operación siguiente es el *fijado*, que consiste en que los cristallitos de bromuro de plata que quedan se disuelven y eliminan. La placa se hace así insensible a la luz. Para el fijado la placa se introduce en una disolución de hiposulfito. Después se lava y se tiene el negativo acabado.

Colocando el negativo sobre un papel fotográfico, es decir, sobre un papel corriente recubierto de una capa sensible a la luz, se obtiene, después de exponer este último a la luz y de someterlo a un proceso químico análogo al anterior, la imagen positiva (fig. 227, b). El positivo tiene ya los mismos tonos de luz que tenía el original (no invertidos).

La fotografía es capaz de registrar, con bastante exactitud y por mucho tiempo, acontecimientos que irreversiblemente se alejan cada vez más en el pasado. Para la ciencia tiene mucha importancia la fotografía. Procesos tan rápidos como, por ejemplo, un relámpago, se pueden fotografiar para después estudiarlos detalladamente.

Objetos que emiten una luz tan débil que el ojo humano no puede percibir, se pueden registrar en una placa fotográfica exponiéndola durante un tiempo suficientemente largo, es decir, sometiéndola mucho tiempo a su iluminación. Precisamente por eso objetos muy lejanos, como las galaxias, se estudian por medio de sus fotografías.

La técnica moderna permite fotografiar no sólo a la luz visible, sino también en la oscuridad, valiéndose de los rayos infrarrojos. Otra aplicación de la fotografía es el registro del sonido en las películas de cine.

- ¿ ?
1. ¿Qué hechos prueban que la luz tiene propiedades corpusculares?
  2. ¿En qué consisten las leyes fundamentales del efecto fotoeléctrico?
  3. ¿A qué es igual la constante de Planck?
  4. ¿Cómo se puede determinar la energía, la masa y el impulso del fotón, conociendo la frecuencia de las oscilaciones de la luz  $\nu$ ?
  5. ¿En qué caso es mayor la presión de la luz: cuando incide sobre una superficie especular o cuando sobre una superficie negra?

- Ejercicio 12
1. Dibujar la gráfica de la energía cinética de los fotoelectrones en función de la frecuencia de la luz. ¿Cómo se puede determinar la constante de Planck valiéndose de esta gráfica?
  2. Hallar el índice de refracción absoluto  $n$  de un medio en el que la luz, cuyos fotones tienen la energía  $E = 4,4 \cdot 10^{-19}$  J, tiene la longitud de onda  $\lambda = 3 \cdot 10^{-5}$  cm.
  3. Determinar el valor del cuanto de energía  $E$  correspondiente a la longitud de onda  $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$  m.
  4. Determinar la longitud de onda  $\lambda$  de la luz que ilumina la superficie de un metal, si los fotoelectrones tienen la energía cinética  $W_k = 4,5 \times 10^{-20}$  J y el trabajo de extracción de un electrón del metal  $A = 7,6 \cdot 10^{-19}$  J.
  5. ¿Cuál será el umbral rojo  $\nu_{\min}$  del efecto fotoeléctrico si el trabajo de extracción de un electrón del metal  $A = 3,3 \cdot 10^{-19}$  J?
  6. Una radiación de longitud de onda  $\lambda = 3 \cdot 10^{-5}$  cm incide sobre una sustancia para la cual el umbral rojo del efecto fotoeléctrico  $\nu_{\min} = 4,3 \cdot 10^{14}$  s $^{-1}$ . ¿A qué será igual la energía cinética de los fotoelectrones?
  7. ¿Cuál será el impulso del fotón si la longitud de la onda luminosa es  $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$  cm?

## BREVE RESUMEN DEL CAPÍTULO 10

A comienzos del siglo XX fue propuesta la teoría cuántica, es decir, la teoría del movimiento e interacciones de las partículas elementales y de los sistemas formados por ellas.

Para explicar las leyes del movimiento térmico supuso M. Planck que los átomos emiten la energía electromagnética no de un modo continuo, sino en porciones separadas o cuantos. La energía de cada una de estas porciones se determina por la fórmula

$$E = h\nu,$$

en la que  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  J · s es la constante de Planck, y  $\nu$  es la frecuencia de la luz.



La energía electromagnética también es absorbida en porciones separadas. El efecto fotoeléctrico (extracción de electrones de una sustancia por la acción de la luz) confirma esto. El número de electrones arrancados es proporcional a la intensidad de la luz, y la energía cinética de los electrones está determinada únicamente por la frecuencia de la luz. De acuerdo con las ideas de Einstein, la porción de energía absorbida  $h\nu$  se gasta en realizar el trabajo de extracción  $A$ , para arrancar el electrón del metal, y en comunicarle a dicho electrón energía cinética:

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}.$$

Si la frecuencia de la luz  $\nu < \nu_{\min} = A/h$ , el efecto fotoeléctrico no se observa.

Así, pues, durante la emisión y la absorción de la luz se ponen de manifiesto las propiedades corpusculares de ésta. La partícula de luz se llama cuanto de luz o fotón. La energía del fotón se determina por la fórmula

$$E = h\nu = h\omega,$$

en la que  $h = h/2\pi = 1,05 \cdot 10^{-34}$  J·s y  $\omega$  es la frecuencia angular.

El impulso  $p$  del fotón se halla por la fórmula  $p = h/\lambda$ .

En el proceso de su propagación la luz revela sus propiedades ondulatorias (fenómenos de interferencia y de difracción).

Por lo tanto la luz tiene dualidad de propiedades. Más tarde se ha descubierto que el dualismo ondulatorio-corpuscular existe en todas las partículas elementales.

El efecto fotoeléctrico tiene muchas aplicaciones técnicas. En las células fotoeléctricas la energía de la luz regula la energía de una corriente eléctrica o se transforma en ella. Estas células se utilizan en diversos aparatos automáticos capaces de "ver". En el fenómeno del efecto fotoeléctrico se basa el funcionamiento de las baterías solares.

De la teoría de Maxwell se deducía que la luz ejerce presión sobre los obstáculos. Esta presión es muy pequeña. El primero en descubrir experimentalmente la presión de la luz y medirla fue el físico ruso P. N. LÉBEDEV.

La absorción de la luz por la sustancia va acompañada de la acción química de la luz. En las hojas verdes de los vegetales y en muchos microorganismos se producen, por la acción de la luz, reacciones químicas importantísimas. El anhídrido carbónico, que las hojas absorben de la atmósfera, se descompone en carbono y oxígeno. En esto consiste el proceso de la fotosíntesis.

## 11.1. Estructura del átomo. Experimentos de Rutherford

El descubrimiento de la estructura compleja del átomo constituyó una etapa importantísima en el proceso de creación de la física moderna, que dejó huella en todo su ulterior desarrollo. Durante el proceso de creación de la teoría cuantitativa de la estructura del átomo, que permitiera explicar los espectros atómicos, fueron descubiertas las nuevas leyes del movimiento de las micropartículas, es decir, las leyes de la *mecánica cuántica*.

**MODELO DE THOMSON.** A las representaciones correctas de la estructura atómica los científicos llegaron no de golpe. El primer modelo de átomo fue propuesto por el físico inglés J.J. THOMSON, descubridor del electrón. Según Thomson, la carga positiva del átomo ocupa todo el volumen de éste y está distribuida en dicho volumen con densidad constante. El átomo más simple, el de hidrógeno, es una esfera, cargada positivamente, de  $10^{-8}$  cm de radio aproximadamente, dentro de la cual hay un electrón. En los átomos más complejos dentro de la esfera cargada positivamente hay varios electrones, de manera que el átomo es una especie de "bizcocho con pasas", en el cual el papel de las pasas lo desempeñan los electrones. Pero el modelo de átomo de Thomson resultó que contradecía totalmente los resultados de los experimentos en que se investigó la distribución de la carga positiva en el átomo.

Estos experimentos, que realizó por primera vez el gran físico inglés Ernest RUTHERFORD, tuvieron tanta importancia en el conocimiento de la estructura del átomo, que conviene estudiarlos con más detalle que se hizo en el curso de "Física I" (Ed. MIR). Ahora el lector está ya en condiciones de comprender mejor su sentido e importancia.

**EXPERIMENTOS DE RUTHERFORD.** La masa de los electrones es varios millares de veces menor que la masa de los átomos. Y como el átomo en conjunto es neutro, se sigue que la masa fundamental del átomo corresponde a su parte cargada positivamente.

Para investigar experimentalmente la distribución de la carga positiva y, por consiguiente, la masa dentro del átomo, propuso Rutherford, en 1906, proceder al sondeo del átomo con partículas  $\alpha$ . Como se sabe por el curso de física mencionado, estas partículas surgen al desintegrarse el radio y algunos otros elementos. La masa de las partículas  $\alpha$  es, aproximadamente, 8000 veces mayor que la del electrón, y su carga positiva es igual al doble del módulo de la carga del electrón. Estas partículas no son ni más ni menos que átomos de helio totalmente ionizados. La velocidad de las partículas  $\alpha$  es muy grande e igual a 1/15 de la velocidad de la luz.

Con estas partículas bombardeó Rutherford átomos de elementos pesados.



Ernest Rutherford (1871-1937), gran físico inglés nacido en Nueva Zelanda. Sus descubrimientos experimentales sentaron las bases de las ideas modernas sobre la estructura del átomo y la radiactividad. Fue el primero en investigar la composición de las radiaciones de las sustancias radiactivas. Descubrió la existencia del núcleo atómico y por vez primera efectuó la transmutación artificial de los núcleos atómicos. Todos sus experimentos tuvieron carácter fundamental y se caracterizaron por su extraordinaria sencillez y claridad. Discípulos de Rutherford fueron muchos físicos de talento de diversos países: James Chadwick (inglés), Niels Bohr (danés), Piotr Leonidovich Kapitsa (soviético) y otros.

Los electrones, como su masa es pequeña, no pueden desviar sensiblemente la trayectoria de las partículas  $\alpha$ , lo mismo que las piedrecitas de varias decenas de gramos al chocar con un automóvil son incapaces de hacer cambiar su velocidad.

La dispersión (es decir, el cambio de dirección del movimiento) de las partículas  $\alpha$  sólo podía ser provocada por la parte del átomo cargada positivamente. De este modo, por la dispersión de las partículas  $\alpha$  se puede determinar el carácter de la distribución de la carga positiva y de la masa dentro del átomo. El esquema de los experimentos de Rutherford se muestra en la fig. 228. De las partículas  $\alpha$  que emitía la preparación radiactiva se separaba, por medio de un diafragma, un haz, el cual incidía después sobre una hoja delgada del material sometido a investigación (oro, cobre, etc.). Una vez dispersas, las partículas  $\alpha$  iban a parar a una pantalla recubierta de sulfuro de zinc. El choque de cada partícula con la pantalla iba acompañado de un destello (centelleo), que podía observarse al microscopio.

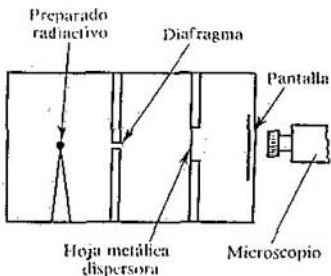


Fig. 228

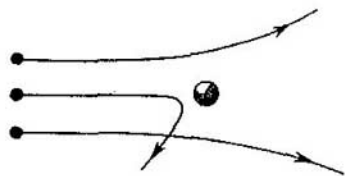


Fig. 229

Cuando el vacío dentro del aparato era suficiente, en ausencia de la hoja metálica, sobre la pantalla se veía una raya debida al centelleo producido por el estrecho haz de partículas  $\alpha$ . Pero cuando en el camino del haz se interponía dicha hoja, las partículas  $\alpha$ , a causa de la dispersión, se distribuían por una superficie mayor de la pantalla.

Modificando el dispositivo experimental, Rutherford procuró descubrir la desviación de las partículas  $\alpha$  en ángulos grandes. Inesperadamente resultó que sólo un pequeño número de partículas  $\alpha$  (aproximadamente una de cada dos mil) se desviaba ángulos mayores que  $90^\circ$ . Más tarde reconoció Rutherford que cuando propuso a sus discípulos hacer el experimento para observar la dispersión de las partículas  $\alpha$  en ángulos grandes, él mismo no creía en el resultado positivo. "Eso era casi tan improbable—decía Rutherford—como si disparando un proyectil de 15 pulgadas contra una hoja de papel fino, el proyectil rebotara en ella y, de retorno, fuera a caer junto al artillero."

Efectivamente, prever este resultado era imposible. Si la carga positiva estuviera repartida por todo el átomo no podría crear un campo eléctrico suficientemente intenso, capaz de rechazar una partícula  $\alpha$ . La fuerza de repulsión máxima se determina por la ley de Coulomb:

$$F_{\text{máx}} = \frac{q_{\alpha}q}{4\pi\epsilon_0 R^2}, \quad (11.1)$$

en la que  $q_{\alpha}$  es la carga de la partícula  $\alpha$ ;  $q$ , la carga positiva del átomo;  $R$ , el radio de éste;  $\epsilon_0$ , la constante eléctrica. La intensidad del campo eléctrico de una esfera cargada uniformemente es máxima en la superficie de la esfera y va disminuyendo hasta llegar a cero a medida que se aproxima al centro. Por eso, cuanto menor sea  $R$  tanto mayor será la fuerza de repulsión de la partícula  $\alpha$ .

**DETERMINACIÓN DE LAS DIMENSIONES DEL NÚCLEO ATÓMICO.** Rutherford comprendió que la partícula  $\alpha$  sólo podía ser rechazada si la carga positiva del átomo y su masa estaban concentradas en una región del espacio muy pequeña. Así llegó Rutherford a la idea del núcleo atómico, como un cuerpo de pequeñas dimensiones en el cual se halla concentrada casi toda la masa del átomo y toda su carga positiva.

En la fig. 229 se pueden ver las trayectorias de las partículas  $\alpha$  que pasan a diferentes distancias del núcleo.

Contando el número de partículas  $\alpha$  desviadas en ángulos diferentes, Rutherford pudo apreciar las dimensiones del núcleo. Resultó que el núcleo tiene un diámetro del orden de  $10^{-12}$  a  $10^{-13}$  cm (distintos núcleos tienen diámetros diferentes). El tamaño del propio átomo es de  $10^{-8}$  cm, es decir, de 10 mil a 100 mil veces mayor que las dimensiones del núcleo. Más tarde se consiguió determinar también la carga del núcleo. Si la carga del electrón se toma como unidad, la carga del núcleo es exactamente igual al número de orden del elemento dado químico en la tabla de Mendeléiev.

**MODELO PLANETARIO DEL ÁTOMO.** De los experimentos de Rutherford se infiere directamente el modelo planetario del átomo. En el centro se encuentra el núcleo atómico, cargado positivamente, en el cual está concentrada casi toda la masa del átomo. En conjunto el átomo es neutro. Por lo tanto, el número de electrones intraatómicos, lo mismo que la carga del núcleo, es igual al número de orden del elemento en el sistema periódico. Está

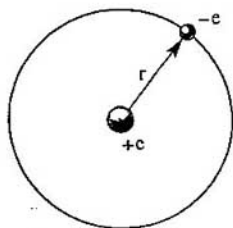


Fig. 230

claro que los electrones no pueden estar en reposo dentro del átomo, ya que de lo contrario caerían en el núcleo. Los electrones se mueven alrededor del núcleo de un modo semejante a como los planetas giran alrededor del Sol. Este carácter del movimiento de los electrones viene determinado por la acción de las fuerzas de Coulomb por parte del núcleo.

En el átomo de hidrógeno se mueve alrededor del núcleo un solo electrón. El núcleo del átomo de hidrógeno tiene una carga positiva igual en módulo a la carga del electrón y una masa 1836,1 veces mayor, aproximadamente, que la masa del electrón. Este núcleo recibe el nombre de *protón* y se ha empezado a considerar como una partícula elemental. Por dimensión del átomo se entiende el radio de la órbita de su electrón (fig. 230).

El modelo planetario del átomo, simple e intuitivo, tiene un fundamento experimental directo. Este modelo parece absolutamente necesario para poder explicar los experimentos de dispersión de las partículas  $\alpha$ . Pero sobre la base de este modelo es imposible explicar el hecho de la EXISTENCIA del átomo y su ESTABILIDAD. ¿Por qué? Porque los electrones se mueven por las órbitas con aceleración y ésta es considerable. Y, según las leyes de la electrodinámica de Maxwell, toda carga que se mueve con aceleración debe radiar ondas electromagnéticas de frecuencia igual al número de sus revoluciones por segundo alrededor del núcleo. La radiación va acompañada de pérdida de energía. Al perder energía, los electrones deben acercarse al núcleo, de un modo semejante a como los satélites artificiales se aproximan a la Tierra al decelerarse en las capas superiores de la atmósfera. Como demuestran los cálculos absolutamente rigurosos, basados en la mecánica de Newton y en la electrodinámica de Maxwell, el electrón debe caer en el núcleo al cabo de un tiempo insignificante (del orden de  $10^{-8}$  s) y el átomo dejar de existir.

En realidad no ocurre esto. Los átomos son estables y en estado no excitado pueden existir un tiempo ilimitado sin radiar ondas electromagnéticas.

La discrepancia entre la experiencia y la conclusión de que es inevitable la aniquilación del átomo a causa de la pérdida de energía en radiación, es el resultado de aplicar las leyes de la física clásica a los fenómenos que tienen lugar dentro del átomo. De aquí se sigue que las leyes de la física clásica son inaplicables a los fenómenos de escala atómica.

Niels Bohr (1885-1962), gran físico danés. Creó la primera teoría cuántica del átomo y participó muy activamente en la elaboración de los fundamentos de la mecánica cuántica. Además hizo una gran aportación a la teoría del núcleo atómico y de las reacciones nucleares. En particular, desarrolló la teoría de la fisión nuclear, proceso en el cual se desprende una enorme cantidad de energía. En Copenhague creó Bohr una gran escuela internacional de físicos y se esforzó por desarrollar la cooperación entre los físicos de todo el mundo. Bohr participó activamente en la lucha contra la amenaza atómica.



## 11.2. Postulados de Bohr

La salida de esta situación tan difícil fue hallada en 1913 por el gran físico danés Niels BOHR, al desarrollar las ideas cuánticas acerca de los procesos que ocurren en la naturaleza.

Einstein calificó el trabajo realizado por Bohr como "la máxima armonía del pensamiento", que siempre le sorprendió. Basándose en hechos experimentales aislados, Bohr, con intuición genial, previó acertadamente la esencia del problema.

Bohr, sin embargo, no propuso una teoría consecuente del átomo. Sólo enunció en forma de postulados los principios básicos de la nueva teoría. Con la particularidad de que las leyes de la física clásica no eran rechazadas incondicionalmente por ellos. Los nuevos postulados más bien imponían solamente ciertas limitaciones a los movimientos que la física clásica consideraba permisibles.

No obstante, el éxito de la teoría de Bohr fue asombroso y todos los físicos comprendieron que Bohr había encontrado el buen camino para desarrollar la teoría. Este camino condujo después a la creación de la armoniosa teoría del movimiento de las micropartículas, la *mecánica cuántica*.

El PRIMER POSTULADO de Bohr dice: un sistema atómico sólo puede encontrarse en determinados estados estacionarios o cuánticos, a cada uno de los cuales corresponde una energía  $E_n$  también determinada; en estado estacionario el átomo no radia.

Este postulado está en clara contradicción con la mecánica clásica, según la cual la energía de los sistemas en movimiento puede ser cualquiera. También contradice la electrodinámica de Maxwell, puesto que admite la posibilidad del movimiento acelerado de los electrones sin emisión de ondas electromagnéticas.

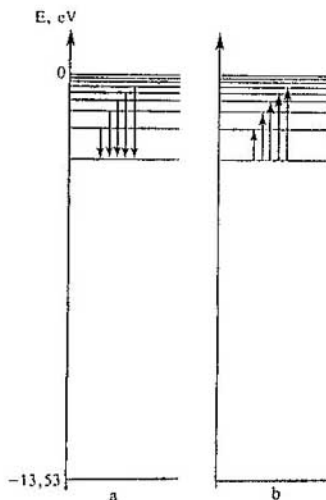


Fig. 231

De acuerdo con el SEGUNDO POSTULADO de Bohr, cuando el átomo pasa de un estado estacionario a otro emite o absorbe un cuanto de energía electromagnética.

La emisión se produce cuando el átomo pasa de un estado con más energía a un estado cuya energía es menor (fig. 231, a).

La absorción de energía por el átomo va acompañada del paso del átomo de un estado de menor energía a un estado de energía mayor (fig. 231, b).

La energía del fotón es igual a la diferencia de energía del átomo en dos de sus estados estacionarios:

$$h\nu_{kn} = E_k - E_n, \quad (11.2)$$

donde  $k$  y  $n$  son los números de los estados estacionarios. Si  $E_k > E_n$  se produce la emisión de un fotón, y si  $E_k < E_n$ , su absorción.

La frecuencia de las oscilaciones correspondiente al cuanto de radiación emitido (o absorbido) se determina por la fórmula

$$\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h} = \frac{E_k}{h} - \frac{E_n}{h}. \quad (11.3)$$

El segundo postulado también contradice la electrodinámica de Maxwell, ya que según este postulado la frecuencia de la luz emitida pone de manifiesto no las peculiaridades del movimiento de los electrones, sino únicamente la variación de la energía del átomo.

## 11.3. Modelo del átomo de hidrógeno según Bohr

Bohr aplicó sus postulados a la construcción de la teoría del sistema atómico más simple, el átomo de hidrógeno.

El problema fundamental consistía en hallar las frecuencias de las ondas electromagnéticas que emite el hidrógeno. Estas frecuencias pueden hallarse basándose en el segundo postulado, si se dispone de una regla para determinar los valores estacionarios de la energía del átomo. Esta regla también tuvo que ser postulada por Bohr.

**ENERGÍAS DE LOS ESTADOS ESTACIONARIOS Y RADIOS DE LAS ÓRBITAS ELECTRÓNICAS CORRESPONDIENTES A ELLOS.** Bohr consideró las órbitas más simples, las circulares. La energía potencial de la interacción del electrón con el núcleo se determina por la fórmula

$$W_p = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r},$$

en la que  $e$  es el módulo de la carga del electrón;  $r$ , la distancia del electrón al núcleo. La constante arbitraria salvo la cual se determina la energía potencial se ha tomado aquí igual a cero. La energía potencial es negativa, porque las cargas de las partículas que interaccionan tienen signos contrarios.

La energía total  $E$  del átomo, según la mecánica de Newton, es igual a la suma de las energías cinética y potencial:

$$E = \frac{mv^2}{2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}. \quad (11.4)$$

Entre la velocidad del electrón y el radio de su órbita existe la relación que se infiere de la segunda ley de Newton. La aceleración centrípeta  $v^2/r$  se la comunica al electrón en la órbita la fuerza de Coulomb. Por lo tanto,

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

o bien

$$mrv^2 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}. \quad (11.5)$$

Sustituyendo la velocidad, en la fórmula (11.4), por su valor deducido de (11.5), se obtiene que

$$E = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r}. \quad (11.6)$$

Según la mecánica clásica el radio de la órbita puede tomar un valor cualquiera. Por consiguiente, la energía también puede tener cualquier valor.

Pero, por el primer postulado de Bohr, la energía sólo puede tomar determinados valores  $E_n$ . Por eso, según (11.6), los radios de las órbitas en el átomo de hidrógeno (tampoco pueden ser arbitrarios). La regla de cuantización de Bohr establece los posibles radios de las órbitas y, respectivamente, los posibles valores de la energía en el átomo.



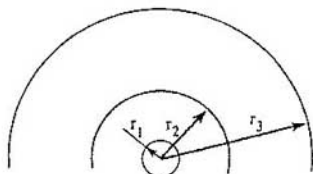


Fig. 232

Cuando el electrón se mueve por una órbita circular, el módulo del impulso  $mv$  y el radio de la órbita  $r$  permanecen invariables. Por lo tanto, también será constante la magnitud  $mvr$ . En mecánica esta magnitud se llama momento de impulso<sup>1)</sup>. Bohr advirtió que la constante de Planck se designa con las mismas unidades de medida que el momento de impulso:

$$J \cdot s = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}} \text{m}.$$

Y como estaba seguro de que la constante de Planck debería desempeñar un papel fundamental en la teoría del átomo, supuso Bohr que el producto del módulo del impulso por el radio de la órbita debe ser múltiplo de la constante de Planck  $h$ :

$$mvr = nh,$$

siendo  $n = 1, 2, 3, \dots$ . Ésta es la *regla de cuantización*. Con ella se puede excluir la velocidad de la fórmula (11.5) y obtener la expresión para los posibles radios de las órbitas:

$$r_n = 4\pi\epsilon_0 \frac{\hbar^2 n^2}{me^2}. \quad (11.7)$$

Los radios de las órbitas de Bohr varían discretamente al variar el número  $n$  (fig. 232). La constante de Planck, la masa y la carga del electrón determinan los valores posibles de las órbitas electrónicas. Teniendo en cuenta que la masa del electrón es  $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  kg, se halla el radio de la órbita menor:

$$r_1 = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{me^2} = 5 \cdot 10^{-11} \text{ m}. \quad (11.8)$$

Éste es precisamente el radio del átomo. La teoría de Bohr da para él un valor correcto. Las dimensiones del átomo vienen determinadas por las leyes cuánticas (el radio se determina por el cuadrado de la constante de Planck). La teoría clásica no puede explicar por qué las dimensiones del átomo son del orden de  $10^{-11}$  m.

Sustituyendo  $r$  en la fórmula (11.6) por las expresiones de los radios de las órbitas (11.7), se obtienen los valores de las energías de los estados estacionarios

<sup>1)</sup> También recibe el nombre de momento cinético, momento angular y momento de la cantidad de movimiento (*N. del T.*)

del átomo (niveles de energía):

$$E_n = -\frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2} \frac{me^4}{2\hbar^2 n^2}. \quad (11.9)$$

En la fig. 231, *a* y *b* estos valores de la energía se han tomado sobre los ejes verticales. En el estado de energía inferior ( $n = 1$ )

$$E_1 = -\frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2} \frac{me^4}{2\hbar^2} = -2,168 \cdot 10^{-18} \text{ J} = -13,55 \text{ eV}.$$

En este estado el átomo puede encontrarse indefinidamente. Para ionizar el átomo de hidrógeno, es decir, para arrancarle el electrón, hay que comunicarle la energía de 13,55 eV. Esta energía recibe el nombre de *energía de ionización*.

Todos los estados con  $n = 2, 3, 4, \dots$  corresponden al átomo excitado. El período de vida en estos estados es del orden de  $10^{-8}$  s. Durante este período el electrón tiene tiempo de dar cerca de un millón de vueltas alrededor del núcleo.

**EMISIÓN DE LUZ.** De acuerdo con el segundo postulado de Bohr, las posibles frecuencias de radiación del átomo de hidrógeno se determinan por la fórmula

$$\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h} = \frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2} \frac{mc^4}{4\pi\hbar^3} \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right) = R \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right), \quad (11.10)$$

donde

$$R = \frac{mc^4}{(4\pi\epsilon_0)^2 \cdot 4\pi\hbar^3} \approx 3,29 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$$

es una magnitud constante.

Los resultados que se obtienen de la teoría de Bohr concuerdan cuantitativamente con los datos experimentales de las frecuencias que emite el átomo de hidrógeno. Todas las frecuencias de radiación del átomo de hidrógeno forman varias series, a cada una de las cuales corresponde un valor determinado del número  $n$  y distintos valores del número  $k > n$ .

La radiación de las frecuencias de una serie dada se produce durante las transiciones de los niveles de energía superiores a uno de los inferiores. Las transiciones al primer estado excitado (es decir, al segundo nivel de energía desde los niveles superiores) forman la *serie de Balmer*. En la fig. 231, *a* estas transiciones se representan por medio de flechas. Las rayas roja, verde y azules de la parte visible del espectro del hidrógeno (véase la fig. V,3 de las láminas en color) corresponden a las transiciones

$$E_3 \rightarrow E_2, E_4 \rightarrow E_2, E_5 \rightarrow E_2 \text{ y } E_6 \rightarrow E_2.$$

Esta serie lleva el nombre del científico suizo J. J. BALMER, que, ya en 1885, basándose en un experimento, había establecido que las frecuencias de la parte visible del espectro del hidrógeno satisfacen la relación

$$\nu = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{k^2} \right).$$

**ABSORCIÓN DE LA LUZ.** La absorción de la luz es el proceso inverso a la emisión. El átomo, al absorber la luz, pasa de los estados de energía inferiores a los superiores. En este caso absorbe las mismas frecuencias que emite al pasar de los estados de energía superiores a los inferiores. En la fig. 231, *b* las flechas representan las transiciones del átomo de unos estados a otros absorbiendo luz.

## 11.4. Demostración experimental de la existencia de los estados estacionarios

Los éxitos de la teoría del átomo fueron obtenidos a cambio de renunciar a los principios fundamentales de la mecánica clásica, que durante 200 años había sido considerada indudablemente correcta. Por eso tuvo gran importancia la demostración experimental directa de que los postulados de Bohr eran justos, sobre todo el primero, acerca de la existencia de los estados estacionarios. El segundo postulado puede considerarse como una consecuencia de la ley de conservación de la energía y de la hipótesis de la existencia real de los fotones.

La existencia de los estados estacionarios fue demostrada en los experimentos hechos por los físicos alemanes James FRANCK y Gustav HERTZ en 1913. La idea de estos experimentos es la siguiente: para descubrir los estados estacionarios hay que investigar el comportamiento del átomo cuando se le transmiten determinadas cantidades de energía. Si los estados estacionarios no existieran, es decir, si la energía interna del átomo pudiera tomar valores cualesquiera, al cederle cierta cantidad de energía lo excitaríamos necesariamente, es decir, aumentaríamos su energía interna. Pero si los estados estacionarios existen, para aumentar la energía interna del átomo habrá que comunicarle a éste una cantidad de energía mayor que la diferencia de energía entre dos estados estacionarios inferiores. Si se le transmite menos cantidad de energía el átomo no se excitará y la energía comunicada sólo servirá para aumentar la energía cinética del átomo en conjunto.

Lo más fácil para transmitir a los átomos una energía determinada es bombardearlos con electrones acelerados por un campo eléctrico. Pasando por una diferencia de potencial  $U$ , el electrón adquiere la energía cinética

$$\frac{mv^2}{2} = eU.$$

El esquema de la instalación experimental de Franck y Hertz se muestra en la fig. 233. La ampolla de vidrio con tres electrodos está llena de vapor de mercurio a baja presión. La batería  $B_1$  crea el campo eléctrico acelerador. La tensión  $U$  entre el cátodo  $K$  y la rejilla  $R$  se puede regular por medio de un potenciómetro. Entre la rejilla y el ánodo se crea, con ayuda de la batería  $B_2$ , un débil campo retardador (la tensión retardadora es de 0,5 V aproximadamente). Este campo impide que lleguen al ánodo los electrones lentos. Los electrones son emitidos por el cátodo  $K$ , calentado por una corriente eléctrica.

Experimentalmente se determina la dependencia de la intensidad de la corriente  $I$  en el circuito anódico, respecto de la tensión  $U$ . La curva obtenida se

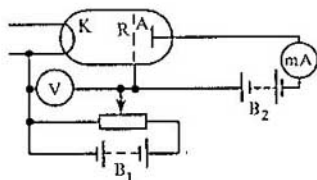


Fig. 233

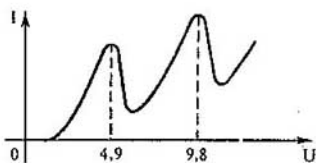


Fig. 234

representa en la fig. 234. La intensidad de la corriente alcanza su primer máximo cuando la tensión es de 4,9 V. Después sigue una caída brusca de la intensidad de la corriente. El máximo siguiente se obtiene con la tensión de 9,8 V y así sucesivamente. Esta dependencia de  $I$  respecto de  $U$  sólo puede explicarse por la existencia de estados estacionarios en los átomos de mercurio.

A tensiones inferiores a 4,9 V los choques de los electrones con los átomos son elásticos. La energía interna de los átomos no varía. La energía cinética de los electrones casi no varía en este caso, debido a que la masa del electrón es mucho menor que la masa de los átomos de mercurio. Como resultado los electrones acelerados por el campo eléctrico entre el cátodo y la rejilla, vencen el campo retardador y llegan al ánodo. El número de electrones, que llegan al ánodo en la unidad de tiempo, crece proporcionalmente a la tensión.

Quando la tensión se eleva hasta 4,9 V, los choques de los electrones con los átomos empiezan a ser inelásticos. La energía interna de los átomos aumenta de golpe y el electrón, después de la colisión, pierde casi toda su energía cinética. El campo retardador no deja que los electrones lentos pasen hasta el ánodo y la intensidad de la corriente disminuye bruscamente. La corriente no desciende hasta cero sólo porque cierta parte de los electrones llegan a la rejilla sin experimentar colisiones inelásticas.

El electrón adquiere la energía necesaria para la colisión inelástica después de pasar por una diferencia de potencial de 4,9 V. De aquí se sigue que *la energía interna de los átomos de mercurio no puede variar en una magnitud menor que  $\Delta E = 4,9$  eV*. Por lo tanto, la energía interna del átomo no puede tener valores arbitrarios ni puede variar en valores cualesquiera. Esto confirma la existencia en el átomo de un conjunto discreto de *estados estacionarios*<sup>1)</sup>.

La exactitud de esta conclusión la confirma también el hecho de que, a la tensión de 4,9 V, el vapor de mercurio empieza a radiar. La frecuencia de radiación, calculada por la fórmula

$$\nu = \frac{\Delta E}{h},$$

coincide con la que se observa experimentalmente. Esto significa que los átomos de mercurio excitados saltan después al estado de energía inferior y emiten cuantos de luz de acuerdo con el segundo postulado de Bohr.

<sup>1)</sup> El segundo máximo de la curva representada en la fig. 234 se debe a que a la tensión de 9,8 V los electrones, en su recorrido hasta la rejilla, sufren dos veces choques inelásticos.

## 11.5. Dificultades de la teoría de Bohr

La teoría de Bohr logró su mayor éxito al ser aplicada al átomo de hidrógeno, para el cual fue posible construir la teoría cuantitativa del espectro.

Pero la teoría cuantitativa del átomo que sigue al de hidrógeno, es decir, del helio, no pudo construirse ya basándose en las ideas de Bohr. Del átomo de helio y de los átomos más complejos la teoría de Bohr sólo permitía sacar conclusiones cualitativas (aunque muy importantes).

Esto no debe extrañar. La teoría de Bohr es una teoría híbrida y tiene contradicciones internas. Por una parte, como se ha visto, en la construcción de la teoría del átomo de hidrógeno se utilizan las leyes ordinarias de la mecánica de Newton y la ley, conocida desde hace ya mucho tiempo, de Coulomb, y por otra parte, se introducen los postulados cuánticos, que no tienen relación alguna con la mecánica de Newton y la electrodinámica de Maxwell. La introducción en la física de las ideas cuánticas requería una reconstrucción radical de la mecánica y la electrodinámica. Esta reconstrucción se llevó a cabo a comienzos del segundo cuarto de nuestro siglo, en que fueron creadas las nuevas teorías físicas: la mecánica cuántica y la electrodinámica cuántica.

Los postulados de Bohr resultaron ser totalmente correctos. Pero aparecen ya no como postulados, sino como consecuencia de los principios fundamentales de estas teorías. La regla de cuantización de Bohr sólo ha quedado como una consecuencia aproximada no siempre aplicable.

La idea de las órbitas determinadas, por las cuales se mueve el electrón en el átomo de Bohr, resultó ser muy convencional. En realidad el movimiento del electrón en el átomo tiene muy poco de común con el movimiento de los planetas por sus órbitas. Si el átomo de hidrógeno en su estado de energía más bajo se pudiera fotografiar con gran tiempo de exposición, se vería una nube cuya densidad máxima se encontraría a una distancia determinada del núcleo. Esta distancia puede tomarse como burda semejanza del radio de la órbita. Ella coincide precisamente con el radio de Bohr (11.8). La fotografía del átomo no se parecería en nada a la representación del sistema solar a que estamos acostumbrados, más bien recordaría la mancha borrosa que podría obtenerse fotografiando una mariposa de esas que de noche vuelan alocadamente alrededor de una lámpara<sup>1)</sup>.

Hoy, valiéndose de la mecánica cuántica, se puede dar respuesta a cualquier pregunta concerniente a la estructura y a las propiedades de las capas electrónicas de los átomos. Pero la parte cuantitativa es bastante complicada y no vamos a estudiarla. La descripción cualitativa de las capas electrónicas de los átomos se dio a conocer en el curso de química.

---

<sup>1)</sup> Aquí se tiene en cuenta la semejanza de las imágenes sólo en promedio, durante un tiempo de exposición grande. El movimiento del electrón no puede identificarse con el revoloteo de la mariposa ni con el movimiento de ningún otro cuerpo macroscópico.

## 11.6. Láseres

**RADIACIÓN INDUCIDA.** En 1917 Einstein predijo la posibilidad de la llamada radiación inducida (estimulada) de luz por los átomos. Se entiende por radiación inducida la radiación de los átomos excitados por la acción de la luz que incide sobre ellos. Una peculiaridad importante de esta radiación es que la onda luminosa que se produce en ella no se diferencia de la onda que incide sobre el átomo NI POR LA FRECUENCIA, NI POR LA FASE, NI POR LA POLARIZACIÓN.

En la terminología de la teoría cuántica la radiación inducida significa la transición del átomo de un estado de energía superior al inferior, pero no espontánea, como en la radiación corriente, sino bajo la influencia de una acción exterior.

**LÁSERES.** Ya en el año 1940 el físico soviético V. A. FABRIKANT indicó la posibilidad de utilizar el fenómeno de la radiación inducida para amplificar las ondas electromagnéticas. En 1954 los científicos soviéticos N. G. BÁSOV y A. M. PRÓJOROV, e independientemente de ellos el físico norteamericano Ch. TOWNES, emplearon el fenómeno de la radiación inducida para crear el generador de ondas ultrahertzianas, de longitud  $\lambda = 3,27$  cm. Por sus trabajos sobre el nuevo principio de generación y amplificación de las ondas hertzianas, N. G. Básov y A. M. Prójorov fueron galardonados en 1959 con el premio Lenin, y en 1963, ellos dos y Ch. Townes recibieron el premio Nobel.

En 1960, en EE. UU. fue creado el primer láser<sup>1)</sup>, generador cuántico de ondas electromagnéticas en la gama visible del espectro.

**PROPIEDADES DE LA RADIACIÓN LÁSER.** Las fuentes de luz láser ofrecen una serie de ventajas importantes en comparación con las otras fuentes de luz:

1. Los láseres son capaces de crear haces de luz muy estrechos con ángulos de divergencia de  $10^{-5}$  rad, aproximadamente. En la Luna un haz de este tipo, emitido desde la Tierra, produce una mancha de 3 km de diámetro.

2. La luz láser es de una monocromaticidad extraordinaria. A diferencia de los focos de luz habituales, cuyos átomos emiten luz independientemente unos de otros, en los láseres los átomos emiten la luz en concordancia. Por eso la fase de la onda no experimenta variaciones irregulares.

3. Los láseres son las fuentes de luz más potentes que existen. En un estrecho intervalo del espectro se consigue durante poco tiempo (en un lapso del orden de  $10^{-11}$  s) una potencia de radiación de  $10^{13}$  W por centímetro cuadrado, mientras que la potencia de radiación del Sol es de sólo  $7 \cdot 10^3$  W por centímetro cuadrado, además en total para todo el espectro. En el estrecho intervalo  $\Delta\lambda = 10^{-6}$  cm (anchura de la raya espectral del láser) el Sol sólo emite  $0,2$  W/cm<sup>2</sup>. La intensidad del campo eléctrico de la onda electromagnética emitida por el láser es mayor que la intensidad del campo dentro del átomo.

<sup>1)</sup> La palabra láser es la sigla de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* ("amplificación de la luz por medio de la radiación estimulada").

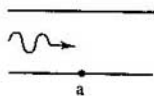


Fig. 235

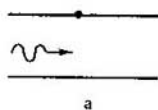
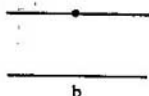
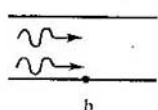


Fig. 236



**PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL LÁSER.** En condiciones normales la mayoría de los átomos se encuentran en el estado de energía más bajo. Por eso a bajas temperaturas la sustancia no emite luz.

Cuando una onda electromagnética pasa a través de una sustancia su energía es absorbida. A expensas de la energía absorbida de la onda, parte de los átomos se excitan, es decir, pasan a un estado de energía superior. Al ocurrir esto el haz luminoso cede la energía

$$h\nu = E_2 - E_1,$$

igual a la diferencia de energía entre los niveles 2 y 1. En la fig. 235, a se representa esquemáticamente el átomo no excitado y la onda electromagnética, en forma de un trozo de senoide. El electrón se encuentra en el nivel bajo. En la fig. 235, b se representa el átomo excitado después de absorber la energía. El átomo excitado puede ceder su energía a los átomos vecinos, al chocar con ellos, o emitir un fotón en cualquier dirección.

Ahora imaginémosnos que, empleando algún procedimiento, se excita gran parte de los átomos de un medio. Entonces, si a través de dicho medio pasa una onda electromagnética de frecuencia

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h},$$

esta onda no se debilitará, sino, al contrario, se reforzará a expensas de la radiación inducida. Bajo su influencia los átomos pasan en concordancia a niveles de energía inferiores, emitiendo ondas que coinciden en frecuencia y en fase con la onda incidente. En la fig. 236, a se muestra el átomo excitado y la onda, y en la fig. 236, b se indica esquemáticamente que el átomo pasó a su estado fundamental y la onda se ha reforzado.

**SISTEMA DE TRES NIVELES.** Existen diversos métodos para obtener el medio con los átomos en estado excitado. En el láser de rubí se utiliza para esto una potente lámpara especial. Los átomos se excitan a costa de la absorción de la luz.

Pero para que el láser funcione dos niveles de energía son insuficientes. Por muy potente que sea la lámpara, el número de átomos excitados no será mayor que el número de átomos no excitados, ya que la luz, al mismo tiempo que excita los átomos, provoca las transiciones inducidas del nivel superior al inferior.

La salida se halló utilizando tres niveles de energía (el número total de niveles es siempre grande, pero aquí se trata de los niveles que "trabajan"). En la fig. 237 vienen representados tres niveles de energía. Es esencial que, en ausencia de la acción exterior, el tiempo durante el cual el sistema se encuentra

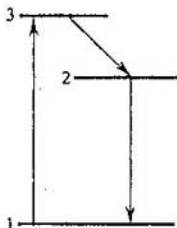


Fig. 237

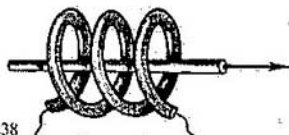


Fig. 238

en distintos estados de energía ("período de vida" o simplemente "vida") es muy desigual. En el nivel 3 vive el sistema muy poco, aproximadamente,  $10^{-8}$  s, después de lo cual pasa espontáneamente al estado 2 sin emitir luz. (La energía se transmite en este caso a la red cristalina.) El período de vida en el estado 2 es 100 000 veces mayor, es decir, del orden de  $10^{-3}$  s. La transición del estado 2 al 1, bajo la acción de la onda electromagnética exterior, va acompañada de radiación. Esto se aprovecha en los láseres. Después del destello de la potente lámpara el sistema pasa al estado 3 y al cabo de un intervalo de tiempo, de alrededor de  $10^{-8}$  s, resulta en el estado 2, en el cual su vida es relativamente larga. De este modo se crea la "superpoblación" del nivel excitado 2, en comparación con el nivel no excitado 1. Los niveles de energía necesarios existen en el cristal de rubí. El rubí es un cristal rojo vivo de óxido de aluminio  $\text{Al}_2\text{O}_3$  con impurezas de átomos de cromo (0,05% aproximadamente). Los niveles de los iones de cromo en el cristal son los que tienen las propiedades requeridas.

**ESTRUCTURA DEL LÁSER DE RUBÍ.** De un cristal de rubí se hace una varilla con los extremos plano-paralelos. Una lámpara de descarga en gas, de forma helicoidal (fig. 238), da luz azul-verdosa. El impulso de corriente, de corta duración, que produce una batería de condensadores de varios millares de microfaradios de capacidad, provoca un destello de la lámpara. Al cabo de poco tiempo el nivel de energía 2 está "superpoblado".

Como resultado de las transiciones espontáneas  $2 \rightarrow 1$ , empiezan a ser emitidas ondas en todas las direcciones posibles. De estas ondas, aquellas que marchan formando ángulo con el eje del cristal salen de él y en los procesos ulteriores no desempeñan papel alguno. Pero la onda que marcha a lo largo del eje del cristal se refleja muchas veces en sus extremos. Esta onda hace que se produzca la radiación inducida de los iones de cromo excitados y se refuerza rápidamente.

Uno de los extremos de la varilla de rubí se hace especular y el otro semitransparente. A través de este último sale un potente impulso de corta duración (de un centenar de microsegundos aproximadamente) de luz roja que posee las propiedades fenomenales de que se habló al principio de este párrafo. La onda es coherente, puesto que todos los átomos radian en concordancia, y muy potente, ya que durante la radiación inducida toda la energía acumulada se desprende en muy poco tiempo.

**OTROS TIPOS DE LÁSERES.** El láser de rubí que acabamos de estudiar funciona en régimen de impulsos. Existen láseres de acción continua.



En los láseres de gas de este tipo la materia emisiva es un gas. Los átomos de dicha materia se excitan por medio de una descarga eléctrica.

Se utilizan también láseres semiconductores de acción continua. Estos láseres fueron creados por primera vez en la URSS. En ellos la energía para la radiación se toma de una corriente eléctrica.

Se construyen láseres gasodinámicos de acción continua de centenares de kilovatios de potencia. En ellos la "superpoblación" de los niveles de energía superiores se crea por expansión y enfriamiento adiabático de flujos gaseosos ultrasónicos calentados hasta varios millares de grados.

**APLICACIONES DE LOS LÁSERES.** Ofrece amplias perspectivas la utilización del rayo láser para comunicaciones, especialmente espaciales, ya que en el espacio cósmico no existen nubes que puedan absorber la luz.

La enorme potencia del rayo láser se utiliza para volatilizar materiales en el vacío, para soldar, etc. Con el rayo láser se pueden hacer operaciones quirúrgicas, como, por ejemplo, "soldar" la retina desprendida del fondo del ojo.

Los láseres dan la posibilidad de obtener imágenes en volumen de los objetos, aprovechando la coherencia del rayo.

Con los láseres se ha podido construir el *localizador óptico*, que permite medir la distancia hasta los objetos con una exactitud de hasta varios milímetros. Esta exactitud no puede lograrse con los radares.

Excitando por medio de la radiación de láser los átomos o las moléculas se pueden provocar reacciones químicas entre ellos que en las condiciones normales no se producen.

Tiene perspectivas la aplicación de potentes rayos láser para efectuar la reacción termonuclear controlada (véase el capítulo 12).

En la actualidad son ya tan diversas y numerosas las aplicaciones de los láseres que aquí es imposible enumerarlas.

---

¿ ?

1. ¿Por qué las partículas cargadas negativamente del átomo no ejercen influencia sobre la dispersión de las partículas  $\alpha$ ?
2. ¿Por qué las partículas  $\alpha$  no podrían ser dispersadas en ángulos grandes si la carga positiva del átomo estuviera distribuida por todo su volumen?
3. El modelo planetario del átomo no está de acuerdo con las leyes de la física clásica, ¿por qué?
4. ¿En qué consisten los postulados de Bohr?
5. ¿En qué difieren la radiación láser y la de una lámpara de incandescencia?

---

Ejercicio

13

1. ¿Cuántas veces menores se hacen el radio de la órbita y la energía del átomo de hidrógeno cuando éste pasa del estado con número  $k = 5$  al estado con número  $n = 1$ ?
2. ¿Cuáles son la velocidad  $v$  y la aceleración  $a$  del electrón en la primera órbita de Bohr?
3. ¿Hasta qué distancia mínima  $r_{\min}$  se aproximan en un choque central una partícula  $\alpha$  y un núcleo de estaño? La velocidad de la partícula  $\alpha$  es igual a  $10^9$  cm/s y su masa  $6,7 \cdot 10^{-24}$  g. El átomo de estaño se supone que está en reposo.

4. Determinar la longitud de onda  $\lambda$  de la luz que emite el átomo de hidrógeno al pasar del estado estacionario con número  $k = 4$  al estado con número  $n = 2$ ?
5. Determinar la longitud de onda mínima de la serie de Balmer.

### BREVE RESUMEN DEL CAPÍTULO 11

Rutherford, estudiando la dispersión de las partículas  $\alpha$  por la sustancia, dedujo la existencia del núcleo atómico. La carga positiva y casi toda la masa del átomo están concentradas en el núcleo atómico, cuyas dimensiones son del orden de magnitud de  $10^{-12}$  a  $10^{-13}$  cm. (Esta magnitud es de 10 mil a 100 mil veces menor que las dimensiones del átomo, cuyo orden de magnitud es de  $10^{-8}$  cm). La carga del núcleo atómico es igual al número de orden del elemento en la tabla de Mendeléiev, multiplicado por el módulo de la carga del electrón. El núcleo del átomo de hidrógeno es el protón.

Basándose en sus experimentos, Rutherford propuso el modelo planetario del átomo. En este modelo los electrones giran alrededor del núcleo de un modo semejante a como los planetas giran alrededor del Sol. Pero, de acuerdo con las leyes de la física clásica, este átomo no puede ser estable, ya que los electrones deben radiar, perdiendo energía, y caer en el núcleo. En realidad se observa lo contrario, todos los átomos son estables.

La salida a estas dificultades la encontró Bohr por la vía del desarrollo de la teoría cuántica. Bohr propuso dos postulados que contradicen la mecánica de Newton y la electrodinámica de Maxwell.

El primer postulado de Bohr dice: un sistema atómico sólo puede encontrarse en determinados estados estacionarios o cuánticos, a cada uno de los cuales corresponde una energía  $E_n$  también determinada; en estado estacionario el átomo no radia.

De acuerdo con el segundo postulado de Bohr, la radiación o absorción de luz se produce cuando el átomo pasa de un estado estacionario a otro. La energía del fotón emitido o absorbido es igual a la diferencia de energía entre los estados estacionarios:

$$h\nu_{kn} = E_k - E_n.$$

Bohr introdujo también una regla de cuantización que permite determinar los radios posibles de las órbitas del electrón y los valores de la energía del átomo de hidrógeno, correspondientes a los estados estacionarios:

$$r_n = 4\pi\epsilon_0 \frac{\hbar^2 n^2}{me^2},$$

$$E_n = - \frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2} \frac{me^4}{2\hbar^2 n^2},$$

donde  $n = 1, 2, 3, \dots$  son números enteros.

La teoría de Bohr da los valores correctos de todas las frecuencias del espectro de rayas de la radiación del hidrógeno. Permite también determinar teóricamente el radio del átomo de hidrógeno y su energía de ionización.

Por medio de experimentos directos se demostró que los estados estacionarios existen en realidad (experimentos de Franck y Hertz).

No obstante, la teoría de Bohr no es lógicamente consecuente. Sobre su base no fue posible construir la teoría cuantitativa de los átomos más complejos (átomo de helio y otros). La introducción de las ideas cuánticas requería una reconstrucción radical de la mecánica y de la electrodinámica. Esta reconstrucción se llevó a cabo en los años 20 de nuestro siglo. Fueron creadas la mecánica cuántica y la electrodinámica cuántica.

Basándose en la teoría cuántica de la radiación se han construido los generadores cuánticos de ondas hertzianas y los generadores cuánticos de luz visible o láseres. Estos últimos crean una radiación coherente de potencia muy grande. La radiación de láser encuentra amplísimas aplicaciones en diversas ramas de la ciencia y de la técnica.

## 12.1. Núcleo atómico y partículas elementales

Los términos *núcleo atómico* y *partículas elementales* ya se han mencionado muchas veces. Ya sabemos que el átomo está formado por un núcleo y electrones. El propio núcleo está constituido por partículas elementales.

*Se llama física nuclear la parte de la física que estudia la estructura y la transformación de los núcleos atómicos.*

En este capítulo se tratará de las partículas que componen el núcleo atómico, de cómo los núcleos se transforman unos en otros, de la estructura de un reactor atómico, de por qué en las reacciones nucleares se libera una cantidad enorme de energía y de lo que esta energía puede dar a la humanidad.

Al principio no existía la división en *física nuclear* y *física de las partículas elementales*. Con la diversidad del mundo de las partículas elementales los físicos chocaron al estudiar los procesos nucleares. La separación de la física de las partículas elementales como rama independiente de investigación ocurrió hace relativamente poco tiempo, alrededor del año 1950. Ahora tenemos dos partes independientes de la física: el contenido de una de ellas constituye el estudio de los núcleos atómicos, el de la otra, el estudio de la naturaleza, propiedades y transmutaciones de las partículas elementales. No obstante, respecto de los problemas que estudian y de los métodos que utilizan en la investigación, estas dos partes de la física tienen muchos puntos comunes.

La mayor parte del tiempo vamos a consagrarla a los problemas fundamentales de la física nuclear y sólo al final nos detendremos brevemente en las propiedades de las partículas elementales. Pero antes daremos a conocer los aparatos gracias a los cuales surgió y comenzó a desarrollarse la física del núcleo atómico y de las partículas elementales. Son éstos los aparatos que sirven para registrar y estudiar los choques y las transmutaciones de los núcleos y de las partículas elementales. Ellos son precisamente los que proporcionan la información necesaria sobre los sucesos que ocurren en el micromundo.

## 12.2. Métodos de observación y registro de las partículas elementales

Todo aparato registrador de partículas elementales o de núcleos atómicos en movimiento se asemeja a una escopeta cargada y montada. El pequeño esfuerzo que se hace al apretar el gatillo de la escopeta produce un efecto, incomparable con la fuerza empleada, el disparo.

El aparato registrador es un sistema macroscópico más o menos complejo que puede encontrarse en estado inestable. Basta una pequeña excitación, debi-

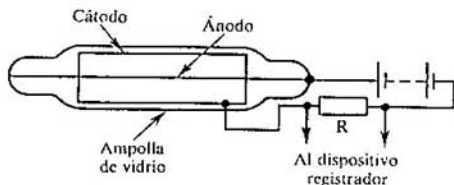


Fig. 239

da al paso de una partícula, para que comience la transición del sistema a un nuevo estado más estable. Este proceso da la posibilidad de registrar la partícula. En la actualidad se utilizan muchos métodos distintos de registro de partículas.

En dependencia de los fines del experimento y de las condiciones en que se hace, se utilizan los aparatos más adecuados, que se diferencian entre sí por las características fundamentales.

Aquí nos limitaremos a describir los dispositivos que más se emplean en la investigación de las partículas elementales y en la física nuclear. El método más simple de registro, es decir, el de recuento del centelleo, ya se ha estudiado.

**CONTADOR DE DESCARGA EN GAS DE GEIGER.** El contador de Geiger es uno de los aparatos más importantes para contar automáticamente las partículas.

El contador (fig. 239) está formado por un tubo de vidrio recubierto por dentro de una capa metálica (cátodo), y de un delgado filamento metálico que pasa a lo largo del eje del tubo (ánodo). El tubo se llena de gas, por lo general argón. El funcionamiento del contador se basa en la ionización por choque. La partícula cargada (electrón, partícula  $\alpha$ , etc.), al pasar por el gas, arranca electrones de los átomos y crea iones positivos y electrones libres. El campo eléctrico entre el ánodo y el cátodo (a los cuales se aplica una alta tensión) acelera los electrones hasta energías con las cuales empieza la ionización por choque. Se produce una avalancha de iones y la corriente a través del contador crece en flecha. Al mismo tiempo en la resistencia de carga  $R$  se genera un impulso de tensión que llega al dispositivo registrador.

Para que el contador pueda registrar la partícula siguiente que incide sobre él hay que extinguir la descarga en avalancha. Esto se consigue automáticamente. Como en el instante en que aparece el impulso de corriente la caída de tensión en la resistencia de carga  $R$  es grande, la tensión entre el ánodo y el cátodo disminuye bruscamente tanto, que la descarga se interrumpe.

El contador de Geiger se utiliza principalmente para registrar electrones y cuantos  $\gamma$  (fotones de gran energía). Pero estos últimos no se pueden registrar directamente, debido a que su poder ionizante es pequeño. Para poderlos detectar, la pared interna del tubo se recubre de un material del cual los cuantos  $\gamma$  arrancan electrones.

El contador registra casi todos los electrones que inciden en él y, aproximadamente, uno de cada cien cuantos  $\gamma$ . El registro de partículas pesadas (partículas  $\alpha$ , por ejemplo) es más difícil, ya que no es fácil practicar en el contador una "ventanilla" suficientemente estrecha, transparente para estas partículas.

En la actualidad existen contadores cuyo funcionamiento se basa en principios distintos que el de Geiger.

**CÁMARA DE NIEBLA.** Los contadores sólo permiten registrar el hecho de que a través de ellos pasan partículas y determinar algunas de sus características. En cambio, en la cámara de niebla (de Wilson), creada en 1912, la partícula cargada rápida deja una trayectoria visible que se puede observar directamente o fotografiarla. Este aparato puede decirse que es una "ventana" abierta al micromundo, es decir, al mundo de las partículas elementales y de los sistemas formados por ellas.

El funcionamiento de la cámara de niebla se basa en la condensación del vapor saturado, sobre los iones, formando gotitas de agua. Los iones los crea a lo largo de su recorrido la partícula cargada que pasa.

La cámara de niebla consiste en un recipiente herméticamente cerrado, lleno de vapor de agua o de alcohol, próximo a la saturación (fig. 240). Si el émbolo desciende bruscamente, a causa de una disminución de la presión debajo de él, el vapor que hay en la cámara se expande adiabáticamente. Con esto se produce su enfriamiento y el vapor se hace sobresaturado. Este estado del vapor es inestable: el vapor se condensa con facilidad. De centros de condensación sirven los iones que origina en el espacio útil de la cámara la partícula que la atraviesa. Si la partícula penetra en la cámara inmediatamente antes o inmediatamente después de la expansión, a lo largo de su recorrido se forman gotitas de agua. Estas gotitas constituyen la trayectoria visible—"traza"—de la partícula lanzada (fig. 241). Luego la cámara retorna a su estado inicial y los iones son expulsados por un campo eléctrico. Antes de la expansión siguiente se quita este campo. En dependencia de las dimensiones de la cámara, el tiempo necesario para restablecer el régimen de trabajo oscila desde varios segundos hasta decenas de minutos.

La información que proporcionan las trazas (huellas) en la cámara de niebla es mucho más rica que la que pueden dar los contadores. Por la longitud de la huella se puede determinar la energía de la partícula, y ateniéndose al número de gotitas por unidad de longitud de la trayectoria se aprecia su velocidad.

Cuanto más larga es la trayectoria de la partícula, tanto mayor es su energía. Y cuanto más gotas se forman por unidad de longitud de la trayectoria, tanto

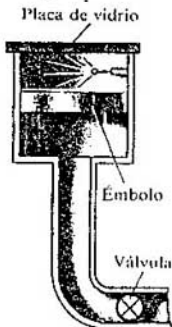


Fig. 240

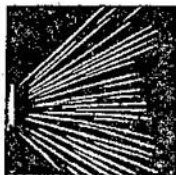


Fig. 241

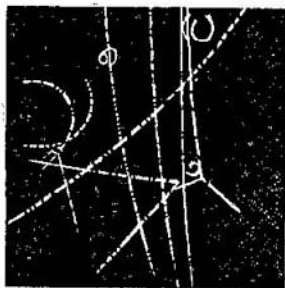


Fig. 242

menor es su velocidad. Las partículas con mayor carga dejan una huella más gruesa.

Los físicos soviéticos P. L. KAPITSA y D. V. SKOBELETSIN propusieron situar la cámara de niebla en un campo magnético homogéneo. El campo magnético actúa sobre las partículas en movimiento con una fuerza determinada (fuerza de Lorentz). Esta fuerza hace que se curve la trayectoria de la partícula sin que varíe el módulo de su velocidad. La curvatura de la trayectoria es tanto mayor cuanto mayor es la carga de la partícula y cuanto menor es su masa. Por la curvatura de la trayectoria se puede determinar la razón de la carga de la partícula a su masa. Si se conoce una de estas magnitudes se puede calcular la otra. Por ejemplo, por la carga de la partícula y la curvatura de la trayectoria se puede hallar su masa.

**CÁMARA DE BURBUJAS.** En 1952 el científico norteamericano D. GLASER propuso utilizar para poner de manifiesto las huellas de las partículas un líquido recalentado. En este líquido, sobre los iones que se originan durante el movimiento rápido de la partícula cargada, se forman burbujas de vapor que hacen visible la trayectoria. Las cámaras de este tipo recibieron el nombre de *cámaras de burbujas*.

En su estado inicial el líquido se encuentra en la cámara a una presión alta que evita su ebullición, a pesar de que la temperatura del líquido es más alta que la de ebullición a la presión atmosférica. Al reducir la presión con rapidez, el líquido resulta recalentado y durante un corto intervalo de tiempo estará en estado inestable. Las partículas cargadas que atraviesan la cámara durante dicho intervalo hacen que aparezcan trayectorias visibles formadas por burbujas de vapor (fig. 242). Los líquidos que se usan comúnmente son el hidrógeno líquido y el propano. La duración del ciclo de trabajo de la cámara de burbujas es pequeña, de 0,1 s aproximadamente.

La ventaja de la cámara de burbujas frente a la de niebla se debe a que la densidad de su sustancia activa es mayor. Como consecuencia el recorrido de las partículas es suficientemente corto e incluso las partículas con grandes energías se detienen en la cámara. Esto da la posibilidad de observar la serie de transformaciones sucesivas que experimenta la partícula y las reacciones que ella produce.

Las trayectorias visibles en las cámaras de niebla y de burbujas son una de



Fig. 243

las fuentes principales de información sobre el comportamiento y las propiedades de las partículas.

La observación de las huellas de las partículas elementales es emocionante, da la sensación de contacto directo con el micromundo.

**MÉTODO DE LAS EMULSIONES FOTOGRAFICAS EN CAPAS GRUESAS.** Para registrar las partículas, además de las cámaras de niebla y de burbujas se utilizan las emulsiones fotográficas en capas gruesas. La acción ionizante de las partículas cargadas rápidas en la emulsión de una placa fotográfica permitió al físico francés A. BECQUEREL descubrir en 1896 la radiactividad. El método de la emulsión fotográfica fue desarrollado por los físicos soviéticos L. V. MISOVSKI, A. P. ZHDÁNOV y otros.

La emulsión fotográfica contiene una gran cantidad de cristallitos microscópicos de bromuro de plata. La partícula cargada rápida, penetrando en el cristallito, arranca electrones de algunos átomos de bromo. La cadena de dichos cristallitos forma una imagen latente. Después del revelado en estos cristallitos se reduce la plata metálica y la cadena de granos de plata forma la trayectoria visible de la partícula (fig. 243). Por la longitud y el grosor de la huella se puede apreciar la energía y la masa de la partícula.

A causa de la gran densidad de la emulsión fotográfica, las trayectorias visibles que se obtienen son muy cortas (del orden de  $10^{-3}$  cm para las partículas  $\alpha$  que emiten los elementos radiactivos), pero al fotografiarlas se pueden ampliar.

La ventaja de la emulsión fotográfica consiste en la continua acción aditiva. Esto permite registrar fenómenos poco frecuentes. También tiene importancia que, en virtud de la gran capacidad de frenado de la emulsión fotográfica, aumenta el número de reacciones interesantes que se observan entre las partículas y los núcleos.

### 12.3. Descubrimiento de la radiactividad

El descubrimiento de la *radiactividad*, fenómeno que demuestra la compleja composición del núcleo atómico, fue puramente casual. Los rayos X, como se recordará, se obtuvieron por primera vez al chocar los electrones rápidos con la pared de vidrio del tubo de descarga. Al mismo tiempo se observó la luminiscencia de las paredes del tubo. Becquerel dedicó mucho tiempo a investigar un fenómeno afín, la luminiscencia de las sustancias expuestas previamente a la luz del Sol. A estas sustancias pertenecen, en particular, las sales de uranio con las cuales hacía sus experimentos Becquerel.





Marie Skłodowska - Curie (1867-1934), eminente física y química. Hizo una valiosísima aportación al estudio de la radiactividad. Nació en Polonia. Era hija de un profesor de física. Trabajaba en Francia. Fue la primera mujer que obtuvo el título de Profesora de la Universidad de la Sorbona (París). Junto con su marido P. Curie descubrió los nuevos elementos radiactivos polonio y radio y estudió sus propiedades. Elaboró el método clásico de preparación y análisis de los minerales de uranio, investigó durante varios años las propiedades de las radiaciones radiactivas, su influencia sobre las células vivas, los isótopos radiactivos, etc. Marie Skłodowska - Curie fue galardonada dos veces con el premio Nobel (de física en 1903 y de química en 1911).

Y he aquí que se le plantea la pregunta: después de ser irradiadas las sales de uranio, ¿no emitirán, además de la luz visible, rayos X? Becquerel envolvió una placa fotográfica en papel negro opaco, puso sobre ella unos granos de sal de uranio y la expuso a la clara luz del Sol. Una vez revelada, la placa ennegreció en aquellas partes, sobre las cuales estaban los granos de sal. Por consiguiente, el uranio creaba cierta radiación que, lo mismo que los rayos X, penetra los cuerpos opacos y actúa sobre la placa fotográfica. Becquerel supuso que esta radiación se producía bajo la influencia de los rayos solares. Pero en una ocasión, en febrero de 1896, no pudo hacer el experimento de turno porque el día estaba nublado. Entonces guardó la placa en un cajón de su mesa y puso sobre ella una cruz de cobre recubierta de sal de uranio. Dos días después decidió revelar la placa por si acaso, y descubrió en ella un ennegrecimiento en forma de sombra clara de la cruz. Esto significaba que las sales de uranio espontáneamente, sin intervención de factores externos, crean cierta radiación. Comenzaron las investigaciones intensas. Está claro que sin esta casualidad también hubieran sido descubiertos los fenómenos radiactivos, pero, seguramente, mucho más tarde.

Pronto observó Becquerel que la radiación de las sales de radio ioniza el aire, lo mismo que los rayos X, y descarga el electroscopio. Probando distintos compuestos químicos de uranio, estableció un hecho muy importante: la intensidad de la radiación está determinada solamente por la cantidad de uranio que hay en el preparado y no depende en absoluto de los compuestos en que se encuentra. Por consiguiente, esta propiedad no es particular de los compuestos, sino del elemento químico uranio, de sus ÁTOMOS.

Era natural intentar descubrir si la propiedad de radiar espontáneamente la poseen otros elementos químicos, además del uranio. En 1898 Marie Skłodowska-Curie, en Francia, y otros científicos descubrieron la radiación del torio. Posteriormente los principales esfuerzos en busca de nuevos elementos

radiactivos fueron realizados por Marie Sklodowska-Curie y su marido Pierre Curie. La investigación sistemática de los minerales, contenedores de uranio y torio, permitió separar un nuevo elemento químico, desconocido hasta entonces, el polonio, llamado así en honor de la patria de Marie Sklodowska-Curie, Polonia.

Finalmente se descubrió otro elemento cuya radiación es muy intensa. Este elemento recibió el nombre de radio. El fenómeno de la radiación espontánea fue llamado por el matrimonio Curie *radioactividad*.

El radio tiene una masa atómica relativa igual a 226 y ocupa en la tabla de Mendeléiev la casilla número 88. Hasta su descubrimiento por Curie este puesto estaba vacío. Por sus propiedades químicas el radio pertenece a los elementos alcalinotérreos.

Más tarde quedó establecido que todos los elementos químicos cuyo número de orden es mayor que 83 son radiactivos.

## 12.4. Rayos alfa, beta y gamma

Después del descubrimiento de los elementos radiactivos empezó a investigarse la naturaleza física de sus radiaciones. Además de Becquerel y del matrimonio Curie, se ocupó de esto Rutherford.

El experimento clásico para descubrir el carácter complejo de la composición de la radiación radiactiva consistía en lo siguiente. El preparado de radio se colocaba en el fondo de un estrecho canal practicado en un trozo de plomo. Enfrente de la entrada del canal se ponía una placa fotográfica. Sobre la radiación que salía de aquél actuaba un campo magnético intenso (fig. 244), perpendicular al rayo. Todo este dispositivo se encontraba en el vacío.

En ausencia del campo magnético, en la placa, una vez revelada, se observaba una mancha oscura exactamente enfrente del canal. En el campo magnético el haz se dividía en tres haces. Dos componentes del flujo inicial se desviaban en sentidos opuestos. Esto indicaba la existencia en estas radiaciones de cargas eléctricas de signos contrarios. La componente negativa de la

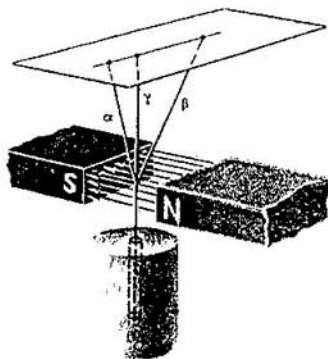


Fig. 244

radiación se desviaba, en el campo magnético, mucho más que la positiva. La tercera componente no sufría desviación en el campo magnético. La componente con carga positiva recibió el nombre de rayos alfa, la de carga negativa, el de rayos beta, y la neutra, el de rayos gamma (rayos  $\alpha$ , rayos  $\beta$  y rayos  $\gamma$ ).

Estos tres tipos de radiaciones se diferencian mucho entre sí por su poder de penetración o grado de dureza, es decir, por la intensidad con que son absorbidos por las distintas sustancias. Los que tienen menor poder de penetración son los rayos  $\alpha$ . Una capa de papel de, aproximadamente, 0,1 mm de espesor es ya opaca para ellos. Si el orificio (canal) del trozo de plomo se tapa con una hoja de papel, en la placa fotográfica no se observará la mancha correspondiente a los rayos  $\alpha$ .

Los rayos  $\beta$  son mucho menos absorbidos al pasar a través de la sustancia. Una lámina de aluminio sólo los detiene totalmente si el espesor de la misma es de varios milímetros. Los que tienen mayor poder de penetración son los rayos  $\gamma$ .

La intensidad de la absorción de rayos gamma aumenta a medida que crece el número atómico de la sustancia absorbente. Pero incluso una capa de plomo de 1 cm de espesor no es para ellos un obstáculo infranqueable. Cuando los rayos  $\gamma$  atraviesan dicha capa de plomo su intensidad sólo se reduce a la mitad.

La naturaleza física de los rayos  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  es, evidentemente, distinta.

**RAYOS GAMMA.** Por sus propiedades los rayos  $\gamma$  se parecen mucho a los rayos X, pero el poder de penetración de los primeros es mucho mayor. Esto indujo a creer que los rayos  $\gamma$  son ondas electromagnéticas. Todas las dudas que sobre esto había desaparecieron una vez que se descubrió la difracción de los rayos  $\gamma$  en los cristales y se midió su longitud de onda. Ésta resultó ser muy pequeña, de  $10^{-8}$  a  $10^{-11}$  cm.

En la escala de las ondas electromagnéticas los rayos  $\gamma$  van inmediatamente después de los rayos X. La velocidad de propagación de los rayos  $\gamma$  es la misma que la de todas las ondas electromagnéticas, cerca de 300 000 km/s.

**RAYOS BETA.** Desde un principio los rayos  $\alpha$  y  $\beta$  fueron considerados como flujos de partículas cargadas. Más fácil resultó organizar experimentos con los rayos  $\beta$ , ya que se desvían mucho tanto en el campo magnético como en el eléctrico.

El problema fundamental consistía en determinar la carga y la masa de las partículas. La investigación de las desviaciones de las partículas  $\beta$  en los campos eléctrico y magnético permitió establecer que estas partículas son electrones que se mueven con una velocidad muy próxima a la de la luz. Conviene indicar que la velocidad de las partículas  $\beta$  que emite un elemento radiactivo dado no son iguales. Se observan partículas con velocidades muy distintas.

**PARTÍCULAS ALFA.** La naturaleza de las partículas  $\alpha$  fue más difícil de establecer, debido a que son desviadas débilmente por los campos magnético y eléctrico.

Este problema consiguió resolverlo definitivamente Rutherford. Para ello midió la razón de la carga  $q$  de la partícula a su masa  $m$ , por la desviación en el campo magnético. Esta razón resultó ser, aproximadamente, dos veces menor que en el protón o núcleo del átomo de hidrógeno. La carga del protón es igual

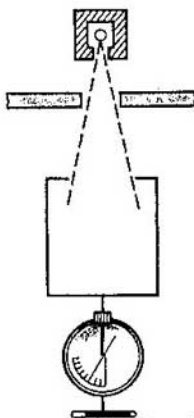


Fig. 245

a la elemental, y su masa se aproxima mucho a la unidad de masa atómica<sup>1)</sup>. Por consiguiente, en las partículas  $\alpha$  a una carga elemental corresponde una masa igual a dos unidades de masa atómica.

Pero la masa y la carga de la partícula  $\alpha$  seguían siendo desconocidas. Era necesario medir la carga o la masa de dicha partícula. Con la aparición del contador de Geiger lo más fácil y seguro era medir la carga. A través de una ventanilla muy estrecha las partículas  $\alpha$  pueden penetrar en el contador y ser registradas por él.

Rutherford interpuso en el camino de las partículas  $\alpha$  un contador de Geiger, que registraba el número de partículas emitidas por un preparado radiactivo en un tiempo determinado. Después, en lugar del contador, puso un cilindro metálico hueco conectado a un electrómetro sensible (fig. 245). Con el electrómetro midió Rutherford la carga de las partículas  $\alpha$  emitidas por la fuente dentro del cilindro en el mismo tiempo (la radiactividad de muchas sustancias casi no varía con el tiempo). Conociendo la carga total de las partículas  $\alpha$  y su cantidad, Rutherford determinó la razón de estas magnitudes, es decir, la carga de una partícula. Esta carga resultó ser igual a dos cargas elementales.

De este modo halló Rutherford que en la partícula  $\alpha$  a cada una de las dos cargas elementales corresponden dos unidades de masa atómica. Por consiguiente, a las dos cargas elementales corresponden cuatro unidades de masa atómica. Esta misma carga y esta misma masa atómica relativa tiene el núcleo de helio. De esto se sigue que la partícula  $\alpha$  es el núcleo del átomo de helio<sup>2)</sup>.

<sup>1)</sup> La unidad de masa atómica (u. m. a.) es igual a  $1/12$  de la masa del átomo de carbono;  $1 \text{ u. m. a.} \approx 1,66057 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ .

<sup>2)</sup> En aquel tiempo (primer decenio del siglo XX) aún no había sido descubierto el núcleo atómico. Por eso Rutherford decía que era el ion del átomo de helio.

No satisfecho con el resultado obtenido, Rutherford, por medio de experimentos directos, demostró después que durante la desintegración radiactiva  $\alpha$  se origina helio. Recogiendo las partículas  $\alpha$  en un recipiente especial y reteniéndolas durante varios días, se cercioró, por medio del análisis espectral, de que en este recipiente se acumulaba helio (cada partícula  $\alpha$  capturaba dos electrones y se convertía en un átomo de helio).

## 12.5. Transiciones radiactivas

¿Qué ocurre en la sustancia durante la radiación radiactiva?

A principios del siglo XX era muy difícil responder a esta pregunta. Desde el comienzo de las investigaciones de la radiactividad se pusieron ya de manifiesto muchos fenómenos extraños.

EN PRIMER LUGAR, la sorprendente permanencia con que los elementos radiactivos uranio, torio y radio emiten la radiación. Durante días, meses y años no variaba la intensidad de la radiación. Sobre ella no ejercía influencia alguna el aumento de la temperatura o de la presión. Las reacciones químicas en que participaban las sustancias radiactivas tampoco influían en la intensidad de la radiación.

EN SEGUNDO LUGAR, muy pronto, después del descubrimiento de la radiactividad, se observó que ésta iba acompañada de desprendimiento de energía. Pierre Curie introdujo una ampolla con cloruro de radio en un calorímetro. Éste absorbía los rayos  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  y a expensas de su energía se calentaba. Curie halló que 1 g de radio desprende en 1 hora cerca de 582 J de energía. El desprendimiento de energía es continuo durante una serie de años.

¿De dónde procede esta energía, sobre cuyo desprendimiento no ejercen influencia alguna todas las acciones conocidas? Por lo visto, durante la radiación experimenta la sustancia algunos cambios profundos totalmente distintos de las transformaciones químicas ordinarias. Se supuso que las transformaciones las sufren los átomos mismos.

Hoy esta idea no nos sorprende, porque hasta los niños pueden oír hablar sobre ella antes de aprender a leer. Pero a principios del siglo XX dicha idea parecía fantástica y había que tener valor para decidirse a exponerla. En aquel tiempo acababan de obtenerse las demostraciones irrefutables de la existencia de los átomos. La idea de Demócrito sobre la estructura atomística de la sustancia triunfaba por fin al cabo de muchos siglos.

Y he aquí que casi inmediatamente después de esto se pone en duda la inmutabilidad de los átomos. No vamos a describir detalladamente los experimentos que en definitiva llevaron a la completa seguridad de que durante la desintegración radiactiva se produce una cadena de transiciones sucesivas de los átomos. Nos detendremos solamente en los primeros de todos los experimentos, empezados por Rutherford y continuados por él mismo en colaboración con el químico inglés F. SODDY.

Rutherford descubrió que la radiactividad del torio (número de partículas  $\alpha$  emitidas en la unidad de tiempo) permanece invariable en una ampolla cerrada. Pero si el preparado se sopla aunque sea con un flujo de aire muy débil, la actividad del torio disminuye mucho.

Esto hizo suponer a Rutherford que, al mismo tiempo que las partículas  $\alpha$ , el torio emite cierto gas que también es radiactivo.

Extrayendo el aire de la ampolla en que estaba el torio, Rutherford separó un gas radiactivo y estudió su poder ionizante. Resultó que la actividad de este gas (a diferencia de la del torio, uranio y radio) disminuye muy rápidamente con el tiempo. Cada minuto su actividad se reduce a la mitad y al cabo de diez minutos desaparece prácticamente por completo. Soddy analizó las propiedades químicas de dicho gas y encontró que no reaccionaba químicamente, es decir, que era un gas noble (inerte). Más tarde este gas recibió el nombre de radón y ocupó en la tabla de Mendeléiev el número de orden 86.

También experimentan transformaciones otros elementos radiactivos: uranio, actinio, radio, etc. La conclusión general a que llegaron los científicos fue formulada con exactitud por Rutherford: "Los átomos de la sustancia radiactiva están sujetos a modificaciones espontáneas<sup>1)</sup>. En cada instante una pequeña parte del número total de átomos se hace inestable y se descompone explosivamente. En la inmensa mayoría de los casos es lanzado con velocidad enorme un fragmento del átomo, una partícula  $\alpha$ . En otros casos la explosión va acompañada de la emisión de un electrón rápido y de la aparición de rayos que, lo mismo que los rayos X, tienen gran poder de penetración y se llaman rayos  $\gamma$ .

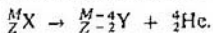
Se ha observado que como resultado de la transformación atómica se origina una sustancia de tipo completamente nuevo, que se diferencia totalmente de la sustancia inicial por sus propiedades físicas y químicas. Esta nueva sustancia también es inestable y experimenta transformación emitiendo la radiación radiactiva característica<sup>2)</sup>.

Así se ha establecido con certeza que los átomos de algunos elementos están sujetos a desintegración espontánea, acompañada de emisión de energía en cantidades enormes en comparación con la energía que se libera en las modificaciones moleculares habituales".

Una vez descubierto el núcleo atómico, se comprendió de inmediato que era él precisamente el que sufría las modificaciones en las transformaciones radiactivas. Porque en la capa electrónica del átomo no existe la partícula  $\alpha$ , y la disminución del número de electrones de dicha capa por unidad de tiempo convierte el átomo en ion, pero no en un nuevo elemento químico. En cambio, la emisión de un electrón por el núcleo hace que varíe la carga de éste (aumentándola) en una unidad.

Por lo tanto, la radiactividad es la transformación espontánea de unos núcleos en otros, acompañada de la emisión de diversas partículas.

**LEY DE DESPLAZAMIENTO.** Las transformaciones de los núcleos se subordinan a la llamada ley de desplazamiento, enunciada por Soddy: durante la desintegración  $\alpha$  el núcleo pierde la carga positiva  $2e$  y su masa disminuye aproximadamente en cuatro unidades de masa atómica. Como resultado el elemento se desplaza dos puestos hacia la izquierda en el sistema periódico. Simbólicamente esto se puede escribir así:

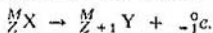


<sup>1)</sup> Del latín *spontaneus*, natural o voluntario.

<sup>2)</sup> En realidad también se pueden formar núcleos estables.

Aquí el elemento se representa, como en química, por su símbolo convencional: la carga del núcleo se escribe en forma de subíndice a la izquierda del símbolo, y la masa atómica, como supraíndice, también a su izquierda. Por ejemplo, el hidrógeno se representa por el símbolo  ${}^1_1\text{H}$ . Para la partícula  $\alpha$ , que es el núcleo del átomo de helio, se adopta la designación  ${}^4_2\text{He}$  y así sucesivamente.

En la desintegración  $\beta$  el núcleo emite un electrón. Como resultado la carga del núcleo aumenta en una unidad y la masa permanece casi invariable:



Aquí  ${}^0_{-1}\text{e}$  representa el electrón: el supraíndice "0" indica que su masa es muy pequeña comparada con la unidad de masa atómica. Después de la desintegración  $\beta$  el elemento se desplaza un puesto hacia la derecha en el sistema periódico. La radiación gamma no implica variación de la carga, y la masa del núcleo varía en una magnitud insignificante.

La ley de desplazamiento muestra que en la desintegración radiactiva se conserva la carga eléctrica y también, aproximadamente, la masa atómica relativa de los núcleos.

Los nuevos núcleos que surgen de la desintegración radiactiva son, a su vez, por lo general, radiactivos.

## 12.6. Ley de la desintegración radiactiva. Periodo de semidesintegración

Rutherford, estudiando las transformaciones de las sustancias radiactivas estableció por vía experimental que su actividad disminuye con el tiempo. De esto se habló en el párrafo anterior. Así, la actividad del radón se reduce a la mitad al cabo de 1 min. La actividad de los elementos como el uranio, torio y radio también disminuye con el tiempo, pero mucho más despacio. Para cada sustancia radiactiva existe un determinado intervalo de tiempo en el transcurso del cual la actividad disminuye dos veces. Este intervalo se llama período de semidesintegración o período medio. El período medio  $T$  es el tiempo durante el cual se desintegra la mitad del número efectivo de átomos radiactivos. Porque la reducción a la mitad de la actividad de un preparado se puede conseguir con facilidad dividiéndolo en dos partes iguales.

La disminución de la actividad, es decir, del número de desintegraciones por segundo, en función del tiempo, para uno de los preparados radiactivos se representa en la fig. 246. El período medio de esta sustancia es igual a 5 días.

Hallemos ahora la fórmula matemática de la desintegración radiactiva. Sea  $N_0$  el número de átomos radiactivos presentes en el instante inicial ( $t = 0$ ). Al cabo de un período medio este número será igual a  $N_0/2$ . Después de otro intervalo de tiempo igual, dicho número se habrá reducido a

$$\frac{1}{2} \frac{N_0}{2} = \frac{N_0}{4} = \frac{N_0}{2^2}$$

Al cabo de un tiempo  $t = nT$ , es decir, de  $n$  períodos de semidesintegración  $T$ ,

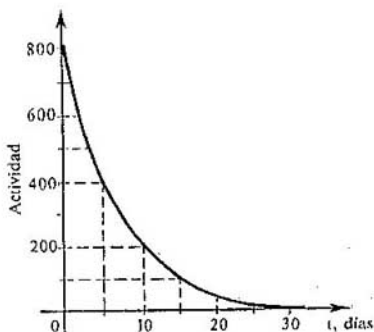


Fig. 246

quedarán

$$N = N_0 \frac{1}{2^n}$$

átomos radiactivos. Pero como

$$n = \frac{t}{T},$$

resulta que

$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T}} \quad (12.1)$$

Ésta es la ley fundamental de la desintegración radiactiva. Por la fórmula (12.1) se halla el número de átomos no desintegrados que hay en un instante cualquiera.

El período medio es la magnitud fundamental determinante de la velocidad de desintegración radiactiva. Cuanto menor sea el período medio tanto menor será el tiempo de vida de los átomos y tanto más rápidamente se producirá la desintegración. Para sustancias diferentes el período medio tiene valores muy distintos. Así, el período medio del uranio  ${}^{238}_{92}\text{U}$  es igual a 4,5 mil millones de años. Precisamente por eso la actividad del uranio no varía apreciablemente en el transcurso de varios años. El período medio del radio es mucho menor e igual a 1600 años. Por eso la actividad del radio es mucho mayor que la del uranio. Hay elementos radiactivos cuyo período medio es de milonésimas de segundo.

Para hallar el período medio, aplicando la fórmula (12.1), es necesario conocer el número de átomos  $N_0$  que había en el instante inicial y calcular el número  $N$  de átomos no desintegrados que quedan al cabo de un intervalo de tiempo  $t$  determinado.

La ley de la desintegración radiactiva es bastante simple. Pero comprender el sentido físico de esta ley no es fácil. En efecto, según la ley, durante un intervalo de tiempo cualquiera se desintegra siempre una misma fracción del



número de átomos existentes (durante el período medio, la mitad de los átomos). Esto significa que la velocidad de desintegración no varía con el tiempo. Los átomos radiactivos no “envejecen”. Así, los átomos de radón, que surgen durante la desintegración del radio, tienen igual probabilidad de sufrir la desintegración radiactiva tanto inmediatamente después de formarse como al cabo de 10 min. La desintegración de cualquier núcleo atómico no es, por así decirlo, la “muerte por vejez” sino un “accidente” en su vida. Para los átomos radiactivos (o, más exactamente, para sus núcleos) no existe el concepto de edad. Sólo puede determinarse su *vida media*  $\tau$ .

La vida de los átomos aislados puede oscilar desde fracciones de segundo hasta millares de millones de años. Un átomo de uranio, por ejemplo, puede descansar tranquilamente en tierra millares de millones de años y explotar inesperadamente mientras los demás átomos, vecinos suyos, continúan en su estado anterior. La vida media  $\tau$  es simplemente la media aritmética del período de vida de una cantidad suficientemente grande de átomos de la misma especie. La vida media es directamente proporcional al período de semidesintegración. Puede decirse que

$$\tau \approx 1,4 T \quad (12.2)$$

Es imposible predecir cuándo se producirá la desintegración de un átomo dado. Sólo tiene sentido la afirmación referida al comportamiento en promedio de un gran conjunto de átomos. La ley de la desintegración radiactiva determina el NÚMERO MEDIO de átomos que se desintegran en un intervalo de tiempo dado. Pero siempre existen desviaciones inevitables del valor medio, y cuanto menor sea la cantidad de átomos en el preparado, tanto mayores serán estas desviaciones. La ley de la desintegración radiactiva es una *ley estadística*. Esta ley es justa en promedio para una gran cantidad de partículas.

## 12.7. Isótopos

El estudio del fenómeno de la radiactividad condujo a un importante descubrimiento, concerniente a la naturaleza de los núcleos atómicos.

Como resultado de la observación de un número enorme de transformaciones radiactivas fue esclareciéndose que existen sustancias totalmente idénticas por sus propiedades químicas, pero cuyas propiedades radiactivas son completamente distintas (es decir, que se desintegran de diferente manera). De ningún modo se lograba separar estas sustancias por los procedimientos químicos conocidos. Sobre esta base Soddy expresó en 1911 la suposición de la posible existencia de elementos con propiedades químicas iguales, pero diferentes en otros aspectos, en particular, en su radiactividad. Estos elementos deben ocupar un mismo puesto en el sistema periódico de Mendeléiev. Soddy les dio el nombre de *isótopos* (es decir, que ocupan el mismo lugar).

La suposición de Soddy obtuvo una brillante confirmación y una

interpretación profunda un año después, cuando Thomson comenzó las mediciones exactas de la masa de los iones de neón por el método de su desviación en los campos eléctrico y magnético. Thomson descubrió que el neón es una mezcla de dos especies de átomos. La mayor parte de ellos tiene una masa relativa igual a 20. Pero existe una adición insignificante de átomos cuya masa atómica relativa es 22. Como resultado la masa atómica relativa de la mezcla es igual a 20,2. Los átomos, que poseían las mismas propiedades químicas, se diferenciaban por su masa. Ambos tipos de neón, como es natural, ocupan el mismo puesto en la tabla de Mendeléiev y, por consiguiente, son isótopos. Así, pues, los isótopos pueden distinguirse no sólo por sus propiedades radiactivas, sino también por su masa. Esta última circunstancia resultó ser la principal. Los núcleos atómicos de los isótopos tienen la misma carga. Por eso el número de electrones que hay en las capas de los átomos y, por lo tanto, las propiedades químicas de los isótopos son iguales. Pero las masas de los núcleos son diferentes. Estos núcleos pueden ser tanto radiactivos como estables. La diferencia de propiedades radiactivas de los isótopos se debe a que sus núcleos tienen distinta masa.

En la actualidad se sabe que tienen isótopos todos los elementos químicos. Algunos elementos sólo tienen isótopos inestables (es decir, radiactivos). Tiene isótopos el más pesado de los elementos que existen en la naturaleza, el uranio (sus masas atómicas relativas son 238, 235 y otras) y el más ligero, el hidrógeno (sus masas atómicas son 1, 2, 3).

Son especialmente interesantes los isótopos del hidrógeno, ya que sus masas atómicas difieren entre sí dos o tres veces. El isótopo del hidrógeno de masa atómica relativa 2 se llama *deuterio*. Es estable (o sea, no radiactivo) y forma parte, como pequeña impureza (1:4500), del hidrógeno ordinario. La combinación del deuterio con el oxígeno da la denominada *agua pesada*. Sus propiedades físicas se diferencian apreciablemente de las del agua común. A la presión atmosférica normal hierve a 101,2°C y se hiela a 3,8°C.

El isótopo del hidrógeno de masa atómica 3 se conoce con el nombre de *tritio*. Es radiactivo  $\beta$  con periodo medio de cerca de 12 años.

La existencia de los isótopos demuestra que la carga del núcleo atómico no determina todas las propiedades de los átomos, sino únicamente sus propiedades químicas y aquellas físicas que dependen de la periferia de la capa electrónica, como, por ejemplo, las dimensiones. Pero la masa del átomo y sus propiedades radiactivas no vienen determinadas por el número de orden en la tabla de Mendeléiev.

Es interesante que cuando las masas atómicas relativas de los isótopos se midieron con precisión, se puso de manifiesto que se aproximan a números enteros. A veces se encuentra una gran desviación de las masas atómicas relativas de los elementos químicos respecto de los números enteros. Así, la masa atómica relativa del cloro es igual a 35,5. Esto significa que, en su estado natural, la sustancia químicamente pura es una mezcla de isótopos en distintas proporciones. El que las masas atómicas relativas de los isótopos sean números enteros (aproximadamente) tiene mucha importancia para esclarecer la estructura del núcleo atómico.

## 12.8. Descubrimiento del neutrón

**TRANSFORMACIÓN ARTIFICIAL DE LOS NÚCLEOS ATÓMICOS.** La primera transformación artificial de los núcleos en la historia de la humanidad fue realizada en 1919 por Rutherford. Esto no fue ya un descubrimiento casual.

Como el núcleo es muy estable y ni las altas temperaturas, ni la presión, ni los campos electromagnéticos provocan la transformación de los elementos y tampoco influyen en la velocidad de la desintegración radiactiva, supuso Rutherford que para destruir o transformar el núcleo se necesita una energía muy grande. Los portadores de gran energía más a propósito en aquel tiempo eran las partículas  $\alpha$  que emiten los núcleos durante la desintegración radiactiva.

El primer núcleo sometido a transformación artificial fue el del átomo de nitrógeno  $^{14}_7\text{N}$ . Bombardeando el nitrógeno con partículas  $\alpha$  de gran energía, emitidas por el radio, descubrió Rutherford la aparición de protones, es decir, de núcleos de átomos de hidrógeno.

En los primeros experimentos los protones se detectaron por el método del centelleo y los resultados no fueron suficientemente convincentes y seguros. Pero varios años después la transformación del nitrógeno se pudo observar en la cámara de niebla. Aproximadamente, una partícula  $\alpha$ , de cada 50 000 emitidas por el preparado radiactivo en la cámara, es capturada por un núcleo de nitrógeno, el cual emite un protón. Al mismo tiempo el núcleo de nitrógeno se transforma en núcleo de un isótopo del oxígeno:



En la fig. 247 se muestra una de las fotografías de este proceso. A la izquierda se ve la "horquilla" característica, bifurcación de la trayectoria. La huella gruesa pertenece al núcleo de oxígeno, y la delgada, al protón. Las demás gruesas partículas  $\alpha$  no sufren choques con los núcleos y sus trayectorias son rectilíneas.

Otros investigadores descubrieron las transformaciones, bajo la influencia de las partículas  $\alpha$ , de los núcleos del flúor, sodio, aluminio y otros, también acompañadas de emisión de protones. Los núcleos pesados de los elementos



Fig. 247

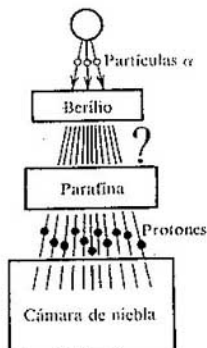


Fig. 248

Frédéric Joliot-Curie (1900-1958), eminente científico y figura social progresista francesa, uno de los fundadores del movimiento internacional de partidarios de la paz. Junto con su esposa Irène descubrió en 1934 la radiactividad artificial. Para el descubrimiento de los neutrones tuvo gran importancia el trabajo del matrimonio Curie acerca de la radiación del berilio sometido a la acción de las partículas  $\alpha$ . Frédéric Joliot-Curie con sus colaboradores fueron, en 1939, los primeros en determinar el número medio de neutrones que se desprenden durante la fisión del núcleo del átomo de uranio y en demostrar la posibilidad de la reacción nuclear en cadena con liberación de energía. Estos trabajos se vieron interrumpidos por la guerra.



finales del sistema periódico no experimentaban transformaciones. Era evidente que su gran carga eléctrica impedía a las partículas  $\alpha$  llegar hasta ellos.

**DESCUBRIMIENTO DEL NEUTRÓN.** En 1932 ocurrió un acontecimiento importantísimo para toda la física nuclear. Un discípulo de Rutherford, el físico inglés JAMES CHADWICK, descubrió el neutrón.

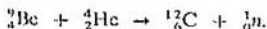
Al bombardear el berilio con partículas  $\alpha$  no aparecían protones. Pero se observaba una radiación muy penetrante, capaz de atravesar un obstáculo tal como una chapa de plomo de 10 a 20 cm de espesor. Se supuso que serían rayos  $\gamma$  de gran energía. Irene Joliot-Curie (hija de Marie y Pierre Curie) y su marido Frédéric Joliot-Curie descubrieron que si en el camino de esta radiación se interponía una placa de parafina, el poder ionizante de la radiación aumentaba bruscamente. Supusieron con razón que la radiación arrancaba de la placa de parafina los protones que contiene en gran cantidad esta sustancia rica en hidrógeno. Valiéndose de la cámara de niebla (el esquema del experimento se da en la fig. 248) el matrimonio Joliot-Curie descubrió estos protones y, por su alcance, calcularon su energía. Si, de acuerdo con la suposición hecha, los protones se aceleraban a causa del choque con cuantos  $\gamma$ , la energía de estos cuantos debía ser enorme, de cerca de 55 MeV.

Chadwick observó en la cámara de niebla las trayectorias de los núcleos de nitrógeno que habían sufrido el choque con la radiación del berilio. Según su apreciación, la energía de los cuantos  $\gamma$  capaces de comunicar a los núcleos de nitrógeno la velocidad que se observaba en estos experimentos debía ser de 90 MeV. Observaciones análogas de las trayectorias de núcleos de argón en la cámara de niebla llevaron a la conclusión de que la energía de los hipotéticos cuantos  $\gamma$  indicados debía ser de 150 MeV. De este modo, considerando que los núcleos se ponían en movimiento a causa de los choques con partículas exentas de masa en reposo, los investigadores se encontraron ante una clara contradicción: a unos mismos cuantos  $\gamma$  había que atribuirles distintas energías.

Evidentemente la suposición de que el berilio emitía cuantos  $\gamma$ , es decir, partículas exentas de masa en reposo, era inconsistente. Del berilio sometido a la acción de las partículas  $\alpha$  salían lanzadas ciertas partículas bastante pesadas. Porque sólo al chocar con partículas pesadas podían los protones o los núcleos de nitrógeno y de argón recibir la gran energía que se observaba. Como dichas partículas tenían un gran poder de penetración y no ionizaban un gas de por sí, debían ser eléctricamente neutras, ya que la interacción de las partículas cargadas con la sustancia es intensa y, por eso, pierden pronto su energía.

La nueva partícula recibió el nombre de *neutrón*. Su existencia la había predicho Rutherford, más de diez años antes de que Chadwick hiciera sus experimentos. Por la energía y el impulso de los núcleos después de chocar con los neutrones, pudo determinarse la masa de éstos. Resultó ser muy poco mayor que la masa del protón, concretamente 1838,6 masas electrónicas en vez de 1836,1 para el protón.

Cuando las partículas  $\alpha$  se encuentran con un núcleo de berilio se produce la reacción siguiente:



Aquí  ${}^1_0\text{n}$  es el símbolo del neutrón; su carga es nula y su masa relativa igual, aproximadamente, a la unidad.

Una reacción semejante se observa también bombardeando con partículas  $\alpha$  el boro, quinto elemento del sistema periódico.

¿ ?

1. ¿Se pueden registrar con la cámara de niebla partículas sin cargas?
2. ¿Qué ventajas tiene la cámara de burbujas frente a la de niebla?
3. ¿Qué leyes de conservación, conocidas por vosotros, se cumplen en las transformaciones radiactivas?
4. Un contador registra las partículas  $\beta$  de un preparado radiactivo, cuya intensidad es muy pequeña. ¿Funcionará el contador a intervalos iguales de tiempo?
5. ¿Existen isótopos de bario cuya masa atómica sea igual a 137,34?
6. Explique por qué, cuando se produce el choque central de un neutrón con un protón, el primero cede toda su energía, mientras que si choca con un núcleo de nitrógeno, sólo cede una parte de la misma.

## 12.9. Estructura del núcleo atómico. Fuerzas nucleares

**MODELO DEL NÚCLEO FORMADO POR PROTONES Y NEUTRONES:** Después de que en los experimentos de Chadwick fue descubierto el neutrón, el físico soviético D. D. IVANENKO y el científico alemán W. HEISENBERG propusieron, en 1932, el modelo nuclear de protones y neutrones. Este modelo fue confirmado por investigaciones posteriores de las transformaciones nucleares y en la actualidad es indiscutible.

Según dicho modelo, los núcleos están formados por dos tipos de partículas elementales: protones y neutrones.

Como el átomo en conjunto es eléctricamente neutro y la carga del protón es igual al módulo de la carga del electrón, el número de protones que hay en el núcleo es igual al número de electrones que hay en la envoltura del átomo. Por

consecuente, el número de protones del núcleo es igual al número atómico  $Z$  del elemento en la tabla de Mendeléiev.

La suma del número de protones  $Z$  y del número de neutrones  $N$  que hay en el núcleo se llama número de masa o másico y se designa con la letra  $A$ :

$$A = Z + N. \quad (12.3)$$

Las masas del protón y del neutrón son aproximadamente iguales y cada una de ellas es más o menos igual a la unidad de masa atómica. La masa de los electrones que hay en el átomo es mucho menor que la masa del núcleo. Por eso el número de masa del núcleo es igual a la masa atómica relativa del elemento redondeada hasta un número entero. Los números de masa se pueden determinar midiendo la masa de los núcleos con aparatos no muy exactos.

Los isótopos son núcleos con el mismo valor de  $Z$ , pero con distintos números de masa  $A$ , es decir, con distinto número de neutrones  $N$ .

**FUERZAS NUCLEARES.** Como los núcleos son bastante estables, los protones y los neutrones tienen que ser mantenidos dentro del núcleo por algunas fuerzas, que deben ser muy grandes. ¿Qué fuerzas son éstas? Puede decirse de antemano que no son gravitatorias, porque éstas son demasiado débiles. La estabilidad del núcleo tampoco puede explicarse por las fuerzas electromagnéticas, ya que entre las partículas con carga de igual signo, como son los protones, actúa la repulsión eléctrica. Y los neutrones carecen de carga eléctrica.

Es decir, entre las partículas nucleares - protones y neutrones (que con frecuencia reciben el nombre de *nucleones*) - actúan fuerzas especiales. Éstas son las llamadas *fuerzas nucleares*. ¿Qué propiedades fundamentales tienen las fuerzas nucleares?

Estas fuerzas son, aproximadamente, 100 veces más intensas que las electromagnéticas. En la naturaleza no existen otras fuerzas más poderosas que éstas. Por eso las interacciones de las partículas nucleares suelen llamarse *interacciones fuertes*.

Las interacciones fuertes no se reducen sólo a las de los nucleones en el núcleo. Éste es un tipo especial de interacciones propio de la mayoría de las partículas elementales a la vez que las interacciones electromagnéticas.

Otra particularidad importante de las fuerzas nucleares es que actúan a corta distancia. Las fuerzas electromagnéticas disminuyen con relativa lentitud a medida que aumenta la distancia. Las nucleares sólo se manifiestan de un modo apreciable a distancias iguales en orden de magnitud a las dimensiones del núcleo (de  $10^{-12}$  a  $10^{-13}$  cm). Esto ya lo demostraron los experimentos de Rutherford sobre la dispersión de las partículas  $\alpha$  por los núcleos atómicos. Las fuerzas nucleares son algo así como "hércules de brazos cortos". Aún no existe una teoría cuantitativa acabada de las fuerzas nucleares, aunque durante los últimos 10 ó 15 años se han conseguido importantes éxitos en la construcción de la misma.

## 12.10. Energía de enlace de los núcleos atómicos

Un papel muy importante en toda la física nuclear desempeña el concepto de *energía de enlace del núcleo*.

Se entiende por energía de enlace del núcleo la energía necesaria para la DESINTEGRACIÓN TOTAL DEL NÚCLEO en nucleones separados. Basándose en la ley de conservación de la energía se puede afirmar también que la energía de enlace es igual a la energía que se desprende al formar el núcleo a partir de las partículas separadas. La energía de enlace de los núcleos atómicos es muy grande. ¿Cómo se puede hallar esta energía?

En la actualidad no es posible calcular la energía de enlace teóricamente, de un modo semejante a como se determina la de los electrones en el átomo. No obstante, la energía de enlace de un átomo cualquiera puede hallarse midiendo con exactitud su masa. En este caso los cálculos correspondientes se hacen aplicando solamente la relación de Einstein entre la masa y la energía:

$$E = mc^2. \quad (12.4)$$

Las medidas exactas de las masas de los núcleos han demostrado que la masa en reposo del núcleo  $M_{\text{núc}}$  es siempre menor que la suma de las masas en reposo de los protones y neutrones que la constituyen:

$$M_{\text{núc}} < Zm_p + Nm_n. \quad (12.5)$$

Existe, como suele decirse, un defecto de masa: la diferencia de masa

$$\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_{\text{núc}}$$

es positiva. En particular, en el helio la masa del núcleo es un 0,75% menor que la suma de las masas de los dos protones y los dos neutrones. Respectivamente, para un mol de helio  $\Delta M = 0,03$  g.

La disminución de la masa al formarse el núcleo con los nucleones significa que al mismo tiempo disminuye la energía de este sistema de nucleones en la magnitud de la energía de enlace  $E_{\text{ent}}$ :

$$E_{\text{ent}} = \Delta Mc^2 = (Zm_p + Nm_n - M_{\text{núc}})c^2. \quad (12.6)$$

Pero, ¿a dónde van a parar en este caso la energía  $E_{\text{ent}}$  y la masa  $\Delta M$ ?

Al formarse los núcleos con las partículas, estas últimas, a expensas de la acción de las fuerzas nucleares a distancias pequeñas, se lanzan unas hacia otras con enorme aceleración. Los cuantos  $\gamma$  emitidos en estas condiciones tienen precisamente la energía  $E_{\text{ent}}$  y la masa

$$\Delta M = \frac{E_{\text{ent}}}{c^2}.$$

Sobre lo enorme que es la energía de enlace puede dar una idea el ejemplo siguiente: la formación de 4 g de helio va acompañada del desprendimiento de una energía igual a la que produce la combustión de 1,5 ó 2 vagones de carbón de piedra.

Una información importante sobre las propiedades de los núcleos la proporciona la gráfica de la *energía de enlace específica* en función del número de masa  $A$ .

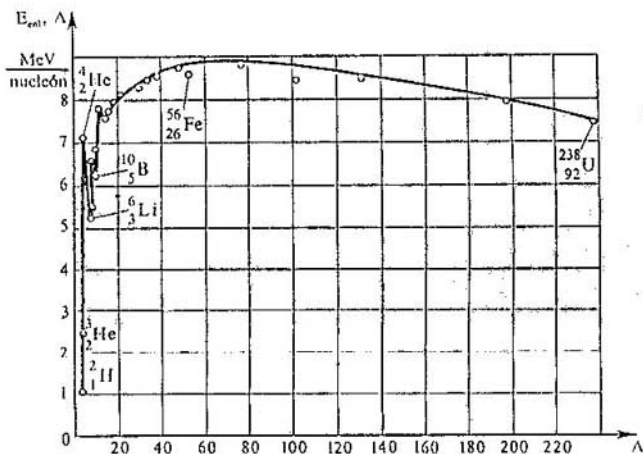


Fig. 249

Se da el nombre de energía de enlace específica a la energía de enlace correspondiente a un nucleón del núcleo. Esta energía se determina por vía experimental.

En la fig. 249 se ve bien que exceptuando los núcleos más ligeros, la energía de enlace específica es aproximadamente constante e igual a 8 MeV/nucleón. Conviene advertir que la energía de enlace del electrón con el núcleo en el átomo de hidrógeno, igual a la energía de ionización, es casi un millón de veces menor que dicha magnitud.

La curva de la fig. 249 tiene un máximo débilmente expresado. La energía de enlace específica máxima (8,6 MeV/nucleón) la tienen los elementos cuyos números de masa van desde 50 hasta 60, es decir, el hierro y los elementos próximos a él por el número de orden. Los núcleos de estos elementos son los más estables.

La disminución de la energía de enlace específica en los elementos ligeros se explica por los efectos superficiales. Los nucleones que se encuentran en la superficie del núcleo interaccionan con un número menor de nucleones vecinos que los que están dentro del mismo, ya que las fuerzas nucleares son de corto alcance. Por eso la energía de enlace de los nucleones en la superficie es menor que la de los nucleones dentro del núcleo. Cuanto menor sea el núcleo, tanto mayor será la parte del número total de sus nucleones que se encuentre en la superficie. A esto se debe que, en promedio, la energía de enlace por nucleón sea menor en los núcleos ligeros.

En los núcleos pesados la energía de enlace específica disminuye a causa de que, al aumentar Z, crece la energía coulombiana de repulsión de los protones. Las fuerzas de Coulomb tienden a romper el núcleo.



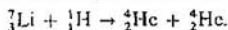
## 12.11. Reacciones nucleares

Se llaman reacciones nucleares las variaciones que experimentan los núcleos atómicos cuando interaccionan con partículas elementales o unos con otros. En el § 12.8 ya se dieron a conocer algunos ejemplos de reacciones nucleares.

Estas reacciones se producen cuando las partículas se aproximan mucho al núcleo y entran en la esfera de acción de las fuerzas nucleares. Las partículas con carga de igual signo se repelen. Por eso la aproximación de las partículas con carga positiva a los núcleos (o de los núcleos entre sí) sólo es posible si a estas partículas (o núcleos) se les comunica una gran energía cinética. Esta energía se transmite a los protones, deuterones, partículas  $\alpha$  y otros núcleos más pesados valiéndose de los aceleradores de partículas elementales e iones.

Para efectuar las reacciones nucleares este método es mucho más eficaz que el empleo de los núcleos de helio que emiten los elementos radiactivos. EN PRIMER LUGAR, en los aceleradores se puede comunicar a las partículas energías del orden de  $10^5$  MeV, es decir, mucho mayores que las que tienen las partículas  $\alpha$  (cuya energía máxima es de 9 MeV). EN SEGUNDO LUGAR, se pueden utilizar protones, que en el proceso de la desintegración radiactiva no aparecen (esto es conveniente porque su carga es dos veces menor que la de las partículas  $\alpha$  y, por lo tanto, también es dos veces menor la fuerza de repulsión que por parte de los núcleos actúa sobre ellos). EN TERCER LUGAR, se pueden acelerar núcleos más pesados que el de helio.

La primera reacción nuclear con protones rápidos fue efectuada en 1932. En ella se consiguió desintegrar el litio en dos partículas  $\alpha$ :



Como se ve en la fotografía de las trayectorias en la cámara de niebla (fig. 250), los núcleos de helio son lanzados en sentidos opuestos a lo largo de una misma recta, de acuerdo con la ley de conservación del impulso (el impulso del protón es mucho menor que el de las partículas  $\alpha$  que surgen).

RENDIMIENTO ENERGÉTICO DE LAS REACCIONES NUCLEARES. En la reacción nuclear que acabamos de describir la energía



Fig. 250

cinética de los dos núcleos de helio formados resulta ser 7,3 MeV mayor que la energía cinética del protón que interviene en la reacción. La transformación de los núcleos va acompañada de la variación de su energía interna (energía de enlace). En la reacción considerada la energía de enlace específica es mayor en los núcleos de helio que en el núcleo de litio. Por eso parte de la energía interna del núcleo de litio se transforma en energía cinética de las partículas  $\alpha$  emitidas.

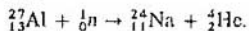
La variación de la energía de enlace de los núcleos significa que la energía total en reposo de las partículas y los núcleos que intervienen en las reacciones no permanece invariable. En efecto, la energía en reposo del núcleo  $M_{\text{nuc}}c^2$ , según la fórmula (12.6), se expresa directamente por medio de la energía de enlace. De acuerdo con la ley de conservación de la energía, la variación de la energía cinética en el proceso de la reacción nuclear es igual a la variación de la energía en reposo de los núcleos y partículas que intervienen en la reacción.

Se llama *rendimiento energético de una reacción nuclear* la diferencia entre la energía en reposo de los núcleos y partículas antes de la reacción y después de ella. De acuerdo con lo dicho antes, el rendimiento energético de una reacción nuclear es también igual a la variación de la energía cinética de las partículas que intervienen en la reacción.

Si la energía cinética de los núcleos y las partículas después de la reacción es mayor que antes de ella, se dice que se desprende energía. En el caso contrario la reacción se cumple con absorción de energía. Este tipo de reacción es el que se produce precisamente cuando se bombardea el nitrógeno con partículas  $\alpha$  (véase el § 12.8). Una parte de la energía cinética (aproximadamente  $1,2 \cdot 10^6$  eV) se transforma en el proceso de esta reacción en energía interna del núcleo recién formado.

La energía que se desprende en las reacciones nucleares puede ser enorme. Pero utilizarla efectuando choques de partículas (o núcleos) aceleradas con núcleos-blancos en reposo es prácticamente imposible, porque la mayor parte de las partículas aceleradas pasa junto a los blancos sin producir reacción.

REACCIONES NUCLEARES CON NEUTRONES. El descubrimiento del neutrón marcó un viraje radical en la investigación de las reacciones nucleares. Como los neutrones no tienen carga, penetran sin dificultad en los núcleos atómicos y hacen que éstos se transformen. Por ejemplo, se observa la reacción siguiente:

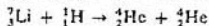


El gran físico italiano ENRICO FERMI fue el primero que empezó a estudiar las reacciones producidas por los neutrones. Él descubrió que las transmutaciones nucleares pueden producirse no sólo los neutrones rápidos, sino también los lentos. En la mayoría de los casos los neutrones lentos son incluso más eficaces que los rápidos. Por eso conviene decelerar previamente los neutrones rápidos. La retardación de los neutrones hasta velocidades térmicas se consigue en el agua ordinaria. Este efecto se explica porque en el agua hay gran número de núcleos de hidrógeno, o protones, cuya masa es casi igual que la de los neutrones. Cuando chocan esferas de igual masa tiene lugar la más intensa transmisión de energía cinética. En el choque central de un

neutrón con un protón en reposo, el neutrón cede al protón toda su energía cinética.

¿ ?

1. ¿Qué fuerzas actúan dentro del núcleo?
2. ¿A qué se llama energía de enlace del núcleo? ¿Cómo se determina la energía de enlace?
3. Explique, usando la fig. 249, por qué la reacción



transcurre no con absorción de calor, sino con desprendimiento.

4. ¿A qué se llama rendimiento energético de una reacción nuclear?
5. ¿Qué diferencia fundamental existe entre las reacciones nucleares provocadas por neutrones y las producidas por partículas cargadas?

## 12.12. Fisión de los núcleos de uranio

Escindirse en partes sólo pueden los núcleos de algunos elementos pesados. Durante la fisión los núcleos emiten dos o tres neutrones y rayos  $\gamma$ . Al mismo tiempo se desprende una gran cantidad de energía.

**DESCUBRIMIENTO DE LA FISIÓN DEL URANIO.** La fisión de los núcleos de uranio fue descubierta en 1938 por los científicos alemanes O. HAHN y F. STRASSMANN. Éstos establecieron que bombardeando el uranio con neutrones surgen elementos de la parte media del sistema periódico: bario, criptón y otros. Sin embargo, la interpretación correcta de este hecho, precisamente como fisión del núcleo de uranio después de capturar un neutrón, fue dada a principios de 1939 por el físico inglés O. FRISCH en colaboración con el físico austriaco L. MEITNER.

La fisión del núcleo es posible en virtud de que la masa en reposo del núcleo pesado es mayor que la suma de las masas en reposo de los fragmentos que se producen al escindirle aquél. Por eso se desprende una cantidad de energía equivalente a la disminución de la masa en reposo que acompaña la fisión. Pero la masa total se conserva, ya que la masa de los fragmentos moviéndose a gran velocidad es mayor que su masa en reposo.

La posibilidad de la fisión de los núcleos se explica también basándose en la gráfica de la energía de enlace específica en función del número de masa  $A$  (véase la fig. 249). La energía de enlace específica de los núcleos de los átomos que ocupan en el sistema periódico los últimos puestos ( $A \approx 200$ ) es, aproximadamente, 1 MeV menor que la energía de enlace específica en los núcleos de los elementos que se encuentran en el centro del sistema periódico ( $A \approx 100$ ). Por eso el proceso de fisión de los núcleos pesados en núcleos de elementos de la parte media del sistema periódico es "conveniente desde el punto de vista energético". Después de la fisión el sistema pasa a un estado en el cual la energía interna es mínima. Porque cuanto mayor sea la energía de enlace del núcleo, tanto mayor será la energía que debe desprenderse al formarse los núcleos y, por lo tanto, tanto menor será la energía interna del sistema formado.

Al escindir el núcleo la energía de enlace por nucleón aumenta en 1 MeV y la energía total que se desprende debe ser enorme (del orden de 200 MeV). En

Fig. 252

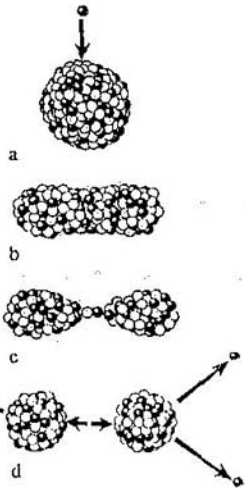


Fig. 251



ninguna otra reacción nuclear (que no sea de fisión) se desprenden cantidades de energía tan grandes.

Las medidas directas de la energía que se desprende durante la fisión del núcleo de uranio  ${}_{92}^{235}\text{U}$  confirmaron los razonamientos antes expuestos y dieron la magnitud de  $\approx 200$  MeV. La mayor parte de esta energía (168 MeV) corresponde a la energía cinética de los fragmentos. En la fig. 251 se ven las trayectorias de los fragmentos de fisión del uranio en la cámara de niebla.

La energía que se desprende durante la fisión del núcleo es de origen electrostático y no nuclear. La gran energía cinética de los fragmentos se debe a su repulsión coulombiana.

**MECANISMO DE LA FISIÓN NUCLEAR.** El proceso de la fisión del núcleo del átomo se puede explicar basándose en el modelo nuclear de la gota líquida. Según este modelo, la concentración de nucleones se asemeja a una gotita de líquido cargada (fig. 252, a). Las fuerzas nucleares entre los nucleones son de corto alcance, lo mismo que las fuerzas entre las moléculas del líquido. A la vez que las grandes fuerzas de repulsión electrostática entre los protones, que tienden a romper el núcleo, actúan las aún mayores fuerzas nucleares de atracción. Éstas impiden que el núcleo se desintegre.

El núcleo del uranio 235 tiene forma esférica. Cuando absorbe un neutrón de más, el núcleo se excita y empieza a deformarse y a adoptar una forma alargada (fig. 252, b). El núcleo sigue alargándose hasta que las fuerzas de repulsión entre sus dos mitades prevalecen sobre las fuerzas de cohesión que actúan en el cuello (fig. 252, c). Después el núcleo se escinde en dos partes (fig. 252, d). Bajo la acción de las fuerzas de repulsión coulombianas estos fragmentos son lanzados con una velocidad igual a  $1/30$  de la velocidad de la luz.

**EMISIÓN DE NEUTRONES DURANTE EL PROCESO DE FISIÓN.**  
Un factor fundamental de la fisión nuclear es la emisión durante dicho proceso de dos a tres neutrones. En virtud de esto precisamente resultó posible la utilización práctica de la energía intranuclear.

El hecho de la emisión de los neutrones libres se puede comprender si se parte de los siguientes razonamientos. Se sabe que la razón del número de neutrones al número de protones en los núcleos estables aumenta a medida que crece el número atómico. Por eso en los fragmentos que resultan de la fisión el número relativo de neutrones es mayor que el permisible para los núcleos de los átomos que se hallan en el centro de la tabla de Mendeléiev. En consecuencia se liberan varios neutrones durante la fisión. Su energía tiene distintos valores, desde varios millones de eV hasta los más pequeños, próximos a cero.

La fisión se produce por lo general en fragmentos de masa diferente. Estos fragmentos son muy radiactivos, porque contienen una cantidad excesiva de neutrones. Como resultado de una serie de desintegraciones  $\beta$  sucesivas se obtienen en definitiva isótopos estables.

Para terminar indicaremos que existe también la *fisión espontánea* de los núcleos de uranio. Ésta fue descubierta por los físicos soviéticos G. N. FLÉROV y K. A. PETRZHAK en 1940. El periodo medio para la fisión espontánea es igual a  $10^{16}$  años. Esto es dos millones de veces mayor que el periodo medio para la desintegración  $\alpha$  del uranio.

## 12.13. Reacciones nucleares en cadena

En la fisión del núcleo de uranio se liberan dos o tres neutrones. Esto da la posibilidad de efectuar la *reacción en cadena de fisión del uranio*.

Cualquiera de los neutrones que emite el núcleo en el proceso de fisión puede, a su vez, provocar la fisión del núcleo vecino, que también emite neutrones capaces de originar la fisión siguiente. Como resultado el número de núcleos que se escinden aumenta con mucha rapidez. Se produce la reacción en cadena.

La reacción en cadena va acompañada del desprendimiento de una cantidad enorme de energía. Cada núcleo escindido desprende cerca de 200 MeV. La fisión total de los núcleos que hay en 1 g de uranio produce  $2,3 \cdot 10^4$  kW · h de energía. Esto equivale a la energía que se obtiene de la combustión de 3 t de carbón ó 2,5 t de petróleo.

Pero la reacción en cadena no puede efectuarse utilizando cualesquiera núcleos, escindibles bajo la influencia de los neutrones. En virtud de una serie de causas, de los núcleos que se encuentran en la naturaleza sólo sirven los del isótopo del uranio cuyo número de masa es 235, es decir, el  ${}_{92}^{235}\text{U}$ .

**ISÓTOPOS DEL URANIO.** El uranio natural está formado principalmente por dos isótopos: el  ${}_{92}^{235}\text{U}$  y el  ${}_{92}^{238}\text{U}$ . Pero el primero sólo constituye la 1/140 parte del más abundante, que es el  ${}_{92}^{238}\text{U}$ .

Los núcleos del isótopo  ${}_{92}^{235}\text{U}$  se escinden tanto bajo la influencia de los neutrones rápidos como de los lentos. Los núcleos del  ${}_{92}^{238}\text{U}$  sólo se escinden por la acción de los neutrones con energías mayores de 1 MeV. Esta energía la tiene, aproximadamente, el 60% de los neutrones que surgen durante la fisión.

Pero, por lo general, sólo un neutrón de cada cinco hace que se escinda el  $^{238}_{92}\text{U}$ . Los demás neutrones son capturados por este isótopo sin que se produzca su fisión. Por lo tanto, la reacción en cadena basada en la utilización del isótopo  $^{238}_{92}\text{U}$  puro es imposible.

**FACTOR DE MULTIPLICACIÓN NEUTRÓNICA.** Para que se desarrolle la reacción en cadena no es preciso que cada neutrón origine la fisión de un núcleo. Sólo es necesario que el número medio de neutrones liberados en la masa de uranio dada no disminuya con el tiempo.

Esta condición se cumplirá si el *factor de multiplicación neutrónica*  $k$  es mayor o igual que la unidad. Se llama factor de multiplicación neutrónica la razón del número de neutrones de cada "generación" al número de neutrones de la "generación" anterior. Se entiende por cambio de generaciones la fisión de núcleos en la cual son absorbidos los neutrones de la "generación" vieja y se generan neutrones nuevos.

Si  $k \geq 1$ , el número de neutrones aumenta con el tiempo o permanece constante y la reacción en cadena continúa. Cuando  $k < 1$ , el número de neutrones disminuye y la reacción en cadena es imposible.

El factor de multiplicación neutrónica viene determinado por las cuatro causas siguientes:

1) la captura de neutrones lentos por los núcleos de  $^{235}_{92}\text{U}$  seguida de la fisión y de la captura de neutrones rápidos por los núcleos de  $^{235}_{92}\text{U}$  y  $^{238}_{92}\text{U}$ , seguida también de fisión;

2) la captura de neutrones por los núcleos de uranio sin que se produzca la fisión;

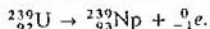
3) la captura de neutrones por los productos de la fisión, por la sustancia moderadora (de ella se hablará más adelante) y por los elementos estructurales de la instalación;

4) el escape de neutrones de la sustancia fisiónable hacia fuera.

Sólo el primer proceso va acompañado del crecimiento del número de neutrones (en lo fundamental por cuenta de la fisión del núcleo  $^{235}_{92}\text{U}$ ). Los demás procesos son deficitarios. La reacción en cadena en el isótopo  $^{238}_{92}\text{U}$  es imposible, porque en este caso  $k < 1$  (el número de neutrones que absorben los núcleos sin escindir se es mayor que el de los que se forman de nuevo a costa de la fisión).

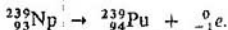
Para que la reacción en cadena transcurra de un modo estacionario el factor de multiplicación neutrónica debe ser igual a la unidad. Esta igualdad hay que mantenerla con gran exactitud. Si  $k = 1,01$  se produce ya casi instantáneamente la explosión.

**FORMACIÓN DEL PLUTONIO.** Tiene mucha importancia la captura de neutrones, sin que se produzca la fisión, por los núcleos del isótopo del uranio  $^{238}_{92}\text{U}$ . Después de la captura se forma el isótopo radiactivo  $^{239}_{92}\text{U}$ , cuyo período medio es de 23 min. La desintegración transcurre con emisión de un electrón y la aparición del primer elemento transuránico, el *neptunio*:



El neptunio, a su vez, es radiactivo  $\beta$  con período medio de cerca de dos días. En el proceso de desintegración del neptunio se forma el elemento

transuránico siguiente, el plutonio:



El plutonio es relativamente estable, ya que su periodo medio es grande (del orden de 24 000 años). La propiedad más importante del plutonio consiste en que puede escindirse bajo la influencia de los neutrones lentos, lo mismo que el isótopo  ${}_{92}^{235}\text{U}$ . Por eso con el plutonio también se puede efectuar una reacción en cadena que conlleva el desprendimiento de una enorme cantidad de energía.

## 12.14. Reactor nuclear

*Se llama reactor nuclear (o atómico) el aparato en el cual se efectúa la reacción controlada de fisión de los núcleos.*

Los núcleos de uranio, sobre todo los del isótopo  ${}_{92}^{235}\text{U}$ , son los que más eficazmente capturan neutrones lentos. La probabilidad de la captura de neutrones lentos, seguida de fisión, es centenares de veces mayor que la de los neutrones rápidos. Por eso en los reactores nucleares que funcionan con uranio natural se utilizan moderadores de neutrones para elevar el factor de multiplicación neutrónica. El proceso que tiene lugar en el reactor nuclear se representa esquemáticamente en la fig. 253.

ELEMENTOS FUNDAMENTALES DE UN REACTOR NUCLEAR. En la fig. 254 se da el esquema energético de una instalación con reactor nuclear.

Los elementos fundamentales del reactor nuclear son: el combustible nuclear ( ${}_{92}^{235}\text{U}$ ,  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ ,  ${}_{92}^{238}\text{U}$  y otros), el moderador de neutrones (agua pesada o común, grafito y otros), el agente transmisor del calor para extraer la energía

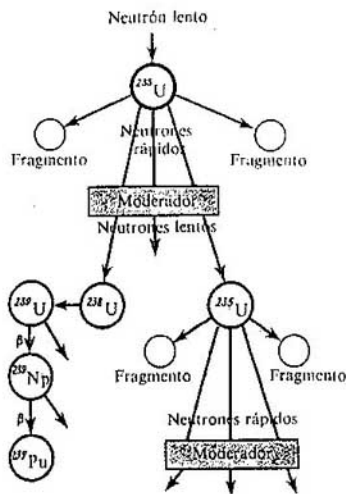


Fig. 253

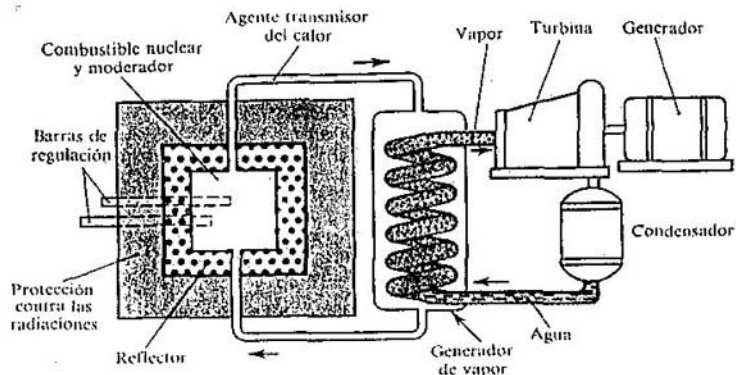


Fig. 254

que se origina durante el funcionamiento del reactor (agua, sodio líquido y otros), y el dispositivo para regular la velocidad de la reacción (barras contenedoras de cadmio o boro, sustancias buenas absorbentes de neutrones, que se introducen en el núcleo del reactor).

Por fuera el reactor se rodea de una envoltura protectora (blindaje) que impide el escape de rayos  $\gamma$  y de neutrones. Esta envoltura es de hormigón armado.

La mejor sustancia moderadora es el *agua pesada* (véase el § 12.7). El agua común captura neutrones y se convierte en agua pesada. También es buen moderador el grafito, cuyos núcleos no absorben neutrones.

**MASA CRÍTICA.** El factor de multiplicación  $k$  puede hacerse igual a la unidad solamente si las dimensiones del reactor y, respectivamente, la masa de uranio, superan cierto valor crítico. Se llama *masa crítica* la cantidad mínima de material fisionable con la cual puede transcurrir la reacción nuclear en cadena.

Si las dimensiones son pequeñas, el escape de neutrones a través de la superficie de la zona activa del reactor (en la cual se encuentran las barras con el uranio) es demasiado grande.

A medida que se aumentan las dimensiones del sistema, el número de núcleos que participan en la fisión crece proporcionalmente al volumen, mientras que el número de neutrones que se pierden a causa del escape aumenta proporcionalmente al área de la superficie. Por eso, aumentando el sistema, se puede conseguir un valor del factor de multiplicación  $k \geq 1$ . El sistema tendrá las dimensiones críticas si el número de neutrones que se pierden a causa de su captura y del escape es igual al número de neutrones que se obtienen en el proceso de fisión. En este caso  $k = 1$ . Las dimensiones críticas y, respectivamente, la masa crítica, vienen determinadas por el tipo de combustible nuclear, por el moderador y por las peculiaridades estructurales del reactor.

Para el uranio  $^{235}_{92}\text{U}$  puro (sin moderador) en forma de esfera, la masa crítica





Enrico Fermi (1901-1954), eminente físico italiano. Hizo una gran aportación al desarrollo de la física teórica y experimental moderna. En 1938 emigró a EE.UU. Creó, al mismo tiempo que Dirac, la teoría cuántica estadística de los electrones y de otras partículas (estadística de Fermi-Dirac). Construyó la teoría cuantitativa de la desintegración  $\beta$ , prototipo de la teoría cuántica moderna de la interacción de las partículas elementales. Hizo una serie de descubrimientos fundamentales en la física nuclear: descubrió la radiactividad artificial producida por la irradiación de una sustancia con neutrones, el frenado de los neutrones lentos, y otros inventos. Bajo la dirección de Fermi, en 1942, fue realizada por primera vez la reacción nuclear controlada.

es aproximadamente igual a 50 kg. El radio de la esfera es entonces igual a  $\sim 9$  cm (el uranio es una sustancia muy pesada). Utilizando moderadores de neutrones y una envoltura de berilio reflectora de ellos, se ha conseguido disminuir la masa crítica hasta 250 g.

El control del reactor se efectúa por medio de barras que contienen cadmio o boro. Cuando estas barras están fuera del núcleo del reactor  $k > 1$ , y cuando están totalmente dentro de él,  $k < 1$ . Haciendo entrar las barras en el núcleo activo se puede detener en cualquier instante la reacción en cadena.

**REACTORES DE NEUTRONES RÁPIDOS.** Se han construido reactores de neutrones rápidos sin moderador. Como la probabilidad de la fisión provocada por los neutrones rápidos es pequeña, estos reactores no pueden funcionar con uranio natural. La reacción sólo se puede mantener en una mezcla enriquecida que contiene, por lo menos, un 15% de isótopo  $^{235}_{92}\text{U}$ . La ventaja de los reactores de neutrones rápidos consiste en que durante su funcionamiento se forma una cantidad importante de plutonio, que luego se utiliza como combustible nuclear. Estos reactores se llaman *reproductores*, porque reproducen el material fisiónable. Se construyen reactores con *relación de reproducción* hasta 1,5. Esto significa que en el reactor, al escindir-se 1 kg de isótopo  $^{235}_{92}\text{U}$  se obtiene hasta 1,5 kg de plutonio.

En los reactores corrientes la relación de reproducción llega a 0,6 ó 0,7.

**PRIMEROS REACTORES NUCLEARES.** La reacción de fisión en cadena del uranio fue realizada por primera vez en EE.UU. La llevó a cabo un grupo de científicos dirigido por ENRICO FERMI en diciembre de 1942.

En la Unión Soviética el primer reactor nuclear fue puesto a punto el 25 de diciembre de 1946 por una colectividad de físicos encabezada por el destacado científico Ígor Vasilievich KURCHÁTOV.

Igor Vasilievich Kurchátov (1903-1960), eminente físico y organizador científico soviético, tres veces héroe del trabajo socialista. Desde 1943 encabezó los trabajos científicos relacionados con el problema atómico. Bajo su dirección fue creado el primer reactor nuclear de Europa (1946) y la primera bomba atómica soviética (1949).

Los primeros trabajos de Kurchátov estuvieron dedicados a la investigación de los dieléctricos (ferroeléctricos), de las reacciones nucleares producidas por los neutrones y de la radiactividad artificial. Descubrió la isomería de los isótopos radiactivos artificiales, es decir, la existencia de estados excitados de los núcleos con período de vida relativamente grande.



En la actualidad existen varios tipos de reactores que difieren entre sí tanto por su potencia como por el fin a que se destinan. Los que ofrecen mejores perspectivas son los reactores de neutrones rápidos reproductores.

## 12.15. Reacciones termonucleares

La masa en reposo del núcleo de uranio es mayor que la suma de las masas en reposo de los fragmentos en que dicho núcleo se escinde. En los núcleos ligeros esta cuestión se plantea al revés. Así, la masa en reposo del núcleo de helio es mucho menor que la suma de las masas en reposo de los dos núcleos de hidrógeno pesado, en que puede escindirse el núcleo de aquí.

Esto significa que cuando se funden núcleos ligeros la masa en reposo disminuye y, por consiguiente, debe desprenderse una gran cantidad de energía. Este tipo de reacciones de fusión de núcleos ligeros sólo puede transcurrir a temperaturas muy altas. Por eso reciben el nombre de *termonucleares*.

Reacciones termonucleares son las reacciones de fusión de núcleos ligeros a temperaturas muy altas.

Para la fusión de los núcleos es necesario que éstos se aproximen entre sí a una distancia de cerca de  $10^{-12}$  cm, es decir, que entren en la esfera de acción de las fuerzas nucleares. A este acercamiento se opone la repulsión coulombiana de los núcleos, que sólo puede ser vencida a expensas de una gran energía cinética del movimiento térmico de los núcleos.

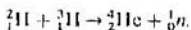
La energía que se desprende en las reacciones termonucleares, referida a un nucleón, es mayor que la energía específica que se desprende en las reacciones de fisión en cadena de los núcleos. Así, al fundirse el hidrógeno pesado (*deuterio*)

con el isótopo superpesado del hidrógeno (*tritio*), se desprenden cerca de 3,5 MeV por nucleón. En la fisión del uranio, en cambio, sólo se desprende, aproximadamente, 1 MeV de energía por nucleón.

Las reacciones termonucleares desempeñan el papel decisivo en la evolución del Universo. La energía que irradian el Sol y las estrellas es de origen termonuclear.

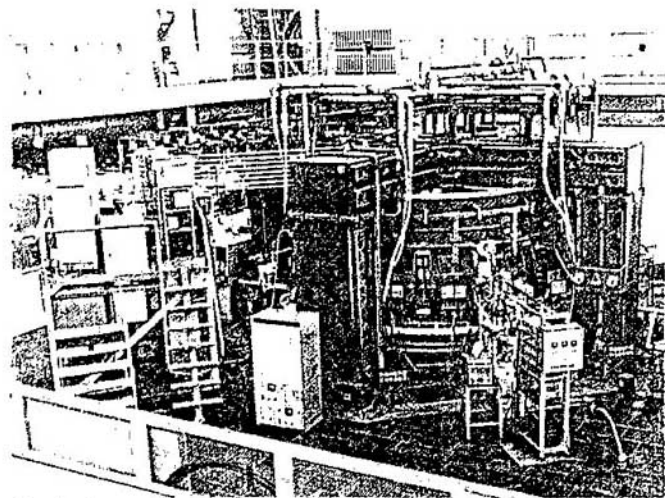
Según las ideas modernas, en su estado temprano de desarrollo una estrella está constituida principalmente por hidrógeno. La temperatura dentro de la estrella es tan grande que en ella tienen lugar reacciones de fusión de los protones y de formación de helio. Después, al fundirse los núcleos de helio se forman los elementos más pesados. Todas estas reacciones van acompañadas de un desprendimiento de energía que asegura la radiación de luz por las estrellas durante millares de millones de años.

La realización de las *reacciones termonucleares controladas* en la Tierra ofrece a la humanidad una nueva fuente de energía prácticamente inagotable. La reacción más esperanzadora en este sentido es la de fusión del deuterio con el tritio:



En esta reacción se desprenden 17,6 MeV de energía. Como el tritio no existe en la naturaleza, debe ser producido en el mismo reactor termonuclear a partir del litio.

Desde el punto de vista económico esta reacción puede ser ventajosa, según



Instalación experimental Tokamak-10 destinada a investigar las condiciones en que se han de realizar las reacciones termonucleares controladas.

los cálculos, únicamente si las sustancias que reaccionan se calientan hasta temperaturas del orden de centenares de millones de grados, siendo grande la densidad de aquéllas (de  $10^{14}$  a  $10^{15}$  partículas por  $1 \text{ cm}^3$ ). Estas temperaturas pueden conseguirse en principio creando en el plasma potentes descargas eléctricas. El principal obstáculo en este camino es tener que confinar el plasma a esta temperatura tan alta, dentro de la instalación, durante un tiempo igual a  $0,1 \dots 1 \text{ s}$ .

Para esto no sirve ningún tipo de paredes, ya que a estas temperaturas se convertirían en vapor inmediatamente. El único método posible de confinar el plasma de alta temperatura en un espacio limitado es el de los campos magnéticos muy intensos. Pero hasta ahora no se ha logrado resolver este problema a causa de la inestabilidad del plasma. La inestabilidad hace que las partículas cargadas se dispersen a través de las "paredes" magnéticas.

Hoy se tiene la seguridad de que dentro de los 10 ó 20 años próximos se conseguirá crear los reactores termonucleares. Los científicos soviéticos son los que han logrado mayores éxitos en la creación de reacciones termonucleares controladas. Estos trabajos se comenzaron bajo la dirección de los académicos L. A. ARTSIMÓVICH y M. A. LEONTÓVICH y los continúan discípulos suyos.

Por ahora sólo se ha conseguido realizar la *reacción de síntesis no controlada* de tipo explosivo en la bomba de hidrógeno (o termonuclear).

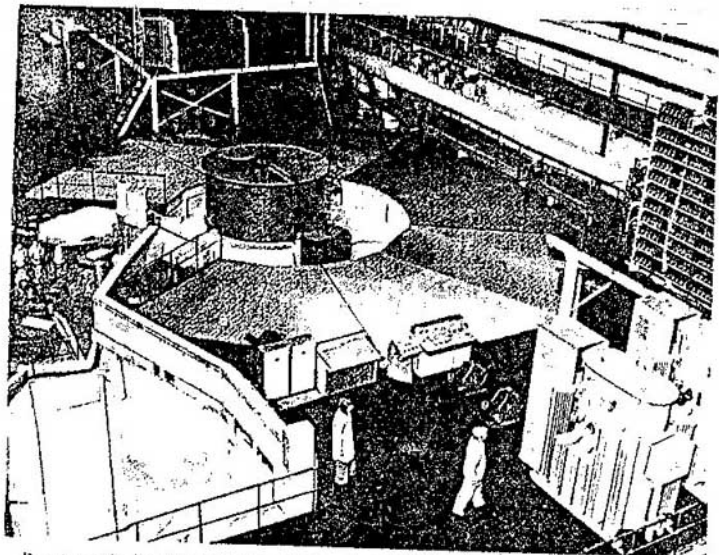
## 12.16. Utilización de la energía nuclear

LOGROS Y PERSPECTIVAS DE DESARROLLO DE LA ENERGÉTICA NUCLEAR EN LA URSS. El empleo de la energía nuclear para transformarla en eléctrica se llevó a cabo por primera vez en la URSS en 1954. En la ciudad de Óbninsk empezó a funcionar la primera central eléctrica atómica (CEA), cuya potencia era de 5000 kW. La energía desprendida en el reactor nuclear se utilizó para transformar agua en vapor, el cual, a su vez, hacía girar una turbina acoplada a un generador.

Por este mismo principio funcionan hoy las CEA inauguradas durante los últimos veinte años: la Novovorónezhskaya, las de Leningrado, Kursk, Chernobil y península de Kola. Los reactores de estas centrales tienen de 500 a 1000 MW de potencia.

Está en vías de cumplimiento el plan de construcción de CEA preferentemente en la parte europea del país. Esto se explica por las ventajas que tienen las CEA en comparación con las centrales eléctricas térmicas, que funcionan con combustible orgánico. Los reactores nucleares no consumen combustible orgánico deficitario ni recargan los ferrocarriles con transportes de carbón. Las centrales eléctricas atómicas no gastan oxígeno atmosférico ni ensucian el medio con cenizas y productos de combustión. Estas ventajas tienen especial importancia en la parte europea de la URSS, donde los recursos hidroenergéticos y de combustible orgánico son insuficientes para asegurar el crecimiento necesario de la potencia energética.

En los reactores de neutrones lentos (térmicos) sólo se aprovecha el 1 ó 2 por ciento del uranio. La utilización total de éste se logra en los reactores de neutrones rápidos, en los cuales se produce al mismo tiempo nuevo combustible nuclear, en forma de plutonio. En 1980, en la CEA Bieloyárskaya empezó



Reactor atómico de neutrones rápidos, de 600 MW de potencia, instalado en la central eléctrica atómica Bilibinskaya, cerca de Sverdlovsk.



El primer rompehielos atómico del mundo, el "Lenin", en los hielos del Océano Glaciar Ártico.

a funcionar el primer reactor del mundo de neutrones rápidos de 600 MW de potencia.

En adelante la construcción en la URSS de CEA tipo, de 4000 a 6000 MW, se hará en serie y su potencia total en la primera etapa del cumplimiento del plan deberá alcanzar 100 GW.

**ARMA NUCLEAR.** La reacción en cadena no controlada, con gran factor de multiplicación neutrónico, se efectuó en la bomba atómica.

Para que el desprendimiento de energía sea casi instantáneo (explosión), la reacción debe efectuarse con neutrones rápidos (sin moderador). De material explosivo sirve el uranio puro  $^{235}_{92}\text{U}$  o el plutonio  $^{239}_{94}\text{Pu}$ .

La explosión sólo puede producirse si las dimensiones del material fisionable son mayores que las críticas. Esto se consigue juntando rápidamente dos trozos de material fisionable de dimensiones menores que la crítica, o comprimiendo un trozo hasta tales dimensiones con las cuales el escape de neutrones a través de la superficie disminuya tanto que las dimensiones del trozo resulten superiores a las críticas. Lo uno y lo otro se realiza por medio de materiales explosivos ordinarios.

Cuando la bomba hace explosión la temperatura alcanza millones de kelvines. A esta temperatura la presión aumenta bruscamente y se origina una onda explosiva de gran potencia. Al mismo tiempo se produce una irradiación muy intensa. Los productos de la reacción en cadena que se liberan al explotar la bomba son muy radiactivos y peligrosos para los organismos vivos.

Los EE.UU. utilizaron bombas atómicas contra Japón al final de la segunda guerra mundial. En 1945 fueron lanzadas éstas sobre las ciudades japonesas de Hiroshima y Nagasaki. Estos actos de destrucción en masa de seres humanos no fueron dictados por necesidades militares, puesto que en aquel tiempo la capitulación del Japón era ya inminente.

En la bomba termonuclear (de hidrógeno) sirve de fuente de la alta temperatura necesaria para la síntesis termonuclear la explosión de una bomba atómica (de uranio o plutonio) colocada dentro de ella. Las posibilidades técnicas de aumentar la energía de la explosión de estas bombas no tienen límite alguno.

## 12.17. Obtención de isótopos radiactivos y sus aplicaciones

### ELEMENTOS INEXISTENTES EN LA NATURALEZA.

Como ya se ha dicho, por medio de las reacciones nucleares se han obtenido isótopos radiactivos de todos los elementos químicos, que sólo existen en la naturaleza en estado estable. Los elementos cuyos números son 43, 61, 85 y 87 carecen totalmente de isótopos estables y fueron obtenidos por primera vez artificialmente. Así, por ejemplo, el elemento con número de orden  $Z = 43$ , denominado *tecnecio*, tiene el isótopo de vida más larga, con período de semidesintegración de cerca de un millón de años.

Valiéndose de las reacciones nucleares y de la radiactividad artificial se han conseguido también los elementos transuránicos. El *neptunio* y el *plutonio* se han dado ya a conocer. Además de ellos se han obtenido los elementos

siguientes: *americio* ( $Z = 95$ ), *curio* ( $Z = 96$ ), *berquellio* ( $Z = 97$ ), *californio* ( $Z = 98$ ), *einsteinio* ( $Z = 99$ ), *fermio* ( $Z = 100$ ), *mendelevio* ( $Z = 101$ ), *nobelio* ( $Z = 102$ ), *lawrencio* ( $Z = 103$ ), *kurchatovio* ( $Z = 104$ ) y *nielsbohrio* ( $Z = 105$ ). El kurchatovio, el nielsbohrio y los elementos 106 y 107, que hasta ahora no tienen nombre, fueron sintetizados por primera vez en los laboratorios de Dubna, en la URSS.

**ÁTOMOS MARCADOS.** En la actualidad tiene cada vez más importancia, tanto en la ciencia como en la industria, el empleo de isótopos radiactivos de distintos elementos químicos. El método más importante es el de los átomos marcados o trazadores. Este método se basa en que las propiedades químicas de los isótopos radiactivos no se diferencian de las propiedades de los isótopos no radiactivos de los mismos elementos.

Los isótopos radiactivos son muy fáciles de detectar por su radiación. La radiactividad es una marca particular con ayuda de la cual se puede observar el comportamiento del elemento en las diversas reacciones químicas y en las transformaciones físicas de las sustancias. Este método se ha convertido en uno de los más eficaces para resolver gran número de problemas de biología, fisiología, medicina, etc. Con él se ha podido esclarecer una serie de cuestiones que por otros métodos es poco probable que hubieran podido resolverse.

**LOS ISÓTOPOS RADIATIVOS COMO FUENTE DE RADIACIÓN.** Los isótopos radiactivos se utilizan mucho en la ciencia, en la medicina y en la técnica como fuentes compactas de radiación de gran energía. Principalmente se utiliza el cobalto radiactivo  $^{60}\text{Co}$  y otros isótopos en calidad de fuentes de rayos  $\gamma$ .

**OBTENCIÓN DE LOS ISÓTOPOS RADIATIVOS.** Los isótopos radiactivos se preparan en los reactores nucleares y en los aceleradores de partículas elementales. En la actualidad una gran rama de la industria se dedica a producir isótopos. En toda la industria atómica lo que quizá tenga más valor para la humanidad es la obtención y utilización de los isótopos radiactivos.

**LOS ISÓTOPOS RADIATIVOS EN BIOLOGÍA Y MEDICINA.** Una de las investigaciones más importantes hechas con ayuda de átomos marcados fue el ESTUDIO DEL METABOLISMO. Con él se demostró que el organismo está sujeto a una renovación casi total en períodos de tiempo relativamente pequeños. Los átomos que lo componen son sustituidos por otros nuevos.

El hierro, como demostró la investigación isotópica de la sangre, constituye la única excepción a dicha regla. Éste entra en la composición de la hemoglobina de los glóbulos rojos. La introducción de átomos radiactivos de hierro  $^{59}_{26}\text{Fe}$  en los alimentos puso de manifiesto que estos átomos casi no se incorporan a la sangre. Únicamente cuando las reservas de hierro del organismo se están agotando, dicho elemento empieza a ser asimilado.

Los átomos trazadores también se utilizan mucho en la agronomía. Por ejemplo, para determinar cuál de los abonos fosfatados es mejor asimilado por las plantas, se marcan los fertilizantes con fósforo radiactivo  $^{32}_{15}\text{P}$ . Sometiendo las plantas a investigación radiactiva se puede hallar la cantidad de fósforo asimilado por ellas de las diferentes clases de abonos.

En aquellos casos en que no existen isótopos radiactivos de vida suficientemente larga, como, por ejemplo, en el oxígeno y en el nitrógeno, se cambia la composición isotópica de los elementos estables. Así, añadiendo al

oxígeno un exceso de isótopo  $^{18}\text{O}$  se estableció que el oxígeno libre, que se desprende por fotosíntesis, es el que antes entraba en la composición del agua, y no en la del anhídrido carbónico.

Los isótopos radiactivos se utilizan en MEDICINA tanto para la diagnosis como con fines terapéuticos.

El sodio radiactivo inyectado en pequeñas cantidades en la sangre se emplea para estudiar la circulación de ésta.

El yodo se deposita intensamente en la glándula tiroides, sobre todo en caso de hipertiroidismo o enfermedad de Basedow. Observando con un contador de partículas cómo se deposita el yodo radiactivo, se puede hacer rápidamente el diagnóstico. Grandes dosis de yodo radiactivo provocan la destrucción parcial de los tejidos que se desarrollan de modo anómalo. Por eso el yodo radiactivo se utiliza para curar la enfermedad de Basedow.

La intensa radiación y del cobalto se utiliza para curar enfermedades cancerosas (bomba de isótopos de cobalto).

**LOS ISÓTOPOS RADIATIVOS EN LA INDUSTRIA.** La utilización de los isótopos radiactivos en la industria no es menos amplia. Uno de los ejemplos de esto puede ser el siguiente procedimiento para controlar el desgaste de los segmentos de los émbolos en los motores de combustión interna. Irradiando los segmentos con neutrones se provocan en ellos reacciones nucleares y se hacen radiactivos. Al funcionar el motor las partículas que se desprenden de los segmentos van a parar al aceite lubricante. Analizando el nivel de radiactividad de dicho aceite al cabo de cierto tiempo de estar funcionando el motor, se halla el desgaste de los segmentos.

Los isótopos radiactivos permiten formarse una idea de la difusión de los metales, de los procesos que tienen lugar en los altos hornos, etc. La potente radiación y de los preparados radiactivos se utiliza para investigar la estructura interna de las piezas metálicas de fundición con el fin de detectar los defectos que tengan.

**LOS ISÓTOPOS RADIATIVOS EN LA AGRICULTURA.** Los isótopos radiactivos se emplean cada vez más en la agricultura. La irradiación de las semillas (del algodón, de la berza, de los rábanos, etc.) con pequeñas dosis de rayos  $\gamma$  de preparados radiactivos hace que aumente notablemente la cosecha.

Las dosis grandes de radiación provocan mutaciones en las plantas y en los microorganismos, lo que en algunos casos hace que aparezcan variedades con nuevas propiedades valiosas (radioselección). Así se han obtenido nuevas especies de trigo, habichuelas y otros cultivos y microorganismos muy productivos con destino a la industria de antibióticos. También se emplean los rayos  $\gamma$  de los isótopos radiactivos para combatir los insectos perniciosos y para conservar productos alimenticios.

**LOS ISÓTOPOS RADIATIVOS EN LA ARQUEOLOGÍA.** Para determinar la edad de objetos antiguos de procedencia orgánica (maderas, carbón vegetal, tejidos u otros semejantes) se aplica el método del carbono radiactivo. En los vegetales existe siempre el isótopo radiactivo  $\beta$  del carbono  $^{14}\text{C}$ , cuyo periodo de semidesintegración  $T = 5700$  años. Este isótopo se forma, en pequeña cantidad, en la atmósfera terrestre por la acción de los neutrones sobre el nitrógeno. Los neutrones proceden de las reacciones nucleares que



provocan las partículas rápidas que llegan del cosmos (rayos cósmicos) a la atmósfera. El carbono radiactivo, combinándose con el oxígeno, forma anhídrido carbónico, el cual es absorbido por los vegetales y, al alimentarse con ellos, ingerido por los animales. Un gramo de carbono de las muestras de un bosque joven emite alrededor de quince partículas  $\beta$  por segundo.

Cuando el organismo muere deja de reponer su carbono radiactivo. Pero la cantidad de este isótopo que existe en él va disminuyendo a causa de la radiactividad. Determinando el contenido, en tanto por ciento, de carbono radiactivo que hay en los restos orgánicos se puede hallar su edad, si se encuentra entre los límites de 1000 a 50 000, e incluso hasta 100 000 años. Por este procedimiento se ha podido conocer la edad de las momias egipcias, de los restos de hogueras prehistóricas, etc.

## 12.18. Acción biológica de las radiaciones radiactivas

La radiación de las sustancias radiactivas ejerce una acción muy intensa sobre los organismos vivos. Una irradiación relativamente débil, que al ser absorbida totalmente sólo eleve la temperatura del cuerpo  $0,001^{\circ}\text{C}$ , altera ya la actividad vital de las células.

La célula viva es un mecanismo complejo incapaz de proseguir su actividad normal incluso si algunas de sus partes sufren pequeños daños. Hasta las irradiaciones débiles son capaces de causar importantes daños a las células y acarrear enfermedades peligrosas (síndrome radiactivo). Si la irradiación es muy intensa mata a los organismos vivos. La peligrosidad de las radiaciones se agrava porque no producen sensaciones dolorosas ni aún en el caso de dosis letales.

El mecanismo de acción de las radiaciones que afecta los objetos biológicos no ha sido aún suficientemente estudiado. Pero está claro que se reduce a la ionización de los átomos y las moléculas y esto hace que cambie su actividad química. Las células más sensibles a la radiación de los núcleos son aquellas que se dividen con más frecuencia. Por eso las radiaciones afectan en primer lugar la médula de los huesos, por lo que se altera el proceso de formación de la sangre. También son afectadas las células del aparato digestivo y de otros órganos.

La irradiación influye mucho en la herencia. En la mayoría de los casos esta influencia es negativa.

Pero en algunos casos la irradiación de los organismos vivos puede ser provechosa. Las células de los tumores malignos (cancerosos) se multiplican con rapidez y por eso son más sensibles a la irradiación que las normales. En esto se basa el tratamiento de los tumores cancerosos con los rayos  $\gamma$  de preparados radiactivos, que para este fin son más eficaces que los rayos X.

**DOSIS DE RADIACIÓN.** La acción de las radiaciones sobre los organismos vivos se caracteriza por la dosis de radiación. Se llama *dosis de exposición a la radiación*  $D_0$  la medida de la ionización del aire que se produce bajo la acción de una radiación dada. En el SI la dosis de radiación se mide EN CULOMBIOS POR KILOGRAMO (C/kg).

Si la carga total de los iones de un mismo signo formados por la radiación en 1 kg de aire es igual a 1 C, la dosis de radiación es igual a 1 C/kg.

La acción que ejercen sobre el organismo las radiaciones de distinta naturaleza, a igualdad de la dosis  $D_0$ , no es la misma. Por eso para apreciar la peligrosidad de una radiación se introduce el factor  $K$  de actividad biológica relativa. Para los rayos X,  $\gamma$  y los electrones,  $K = 1$ ; para los neutrones lentos  $K = 5$ ; para los neutrones rápidos y las partículas  $\alpha$ ,  $K = 10$  y así sucesivamente. En la práctica lo más importante es conocer la llamada *dosis biológica de irradiación*  $D_b$ , que se determina como sigue:

$$D_b = KD_0.$$

El fondo natural de radiaciones (rayos cósmicos, radiactividad del medio ambiente y del cuerpo humano) constituye una dosis biológica anual de cerca de  $2,5 \cdot 10^{-5}$  C/kg. La Comisión internacional de defensa radiactiva ha establecido para los individuos que trabajan con radiaciones la dosis anual máxima permisible de  $1,3 \cdot 10^{-3}$  C/kg. Una dosis biológica de 0,15 C/kg percibida durante un corto espacio de tiempo es mortal.

#### PROTECCIÓN DE LOS ORGANISMOS CONTRA LA RADIACIÓN.

Cuando se trabaja con una fuente de radiaciones cualquiera (isótopos radiactivos, reactores, etc.) hay que tomar medidas de seguridad para proteger a todo el personal que pueda encontrarse en la zona de acción de las radiaciones.

La medida de seguridad más fácil es alejar el personal de la fuente de radiación una distancia suficientemente grande. Incluso sin tener en cuenta su absorción por el aire, la intensidad de la radiación disminuye en proporción inversa al cuadrado de la distancia hasta la fuente. Por eso las ampollas que contienen preparados radiactivos no deben cogerse con la mano. Para esto se deben utilizar pinzas especiales de mango largo.

En aquellos casos en que no es posible un alejamiento suficiente del foco de radiación se emplean como defensas barreras de materiales absorbentes.

La protección contra los rayos  $\gamma$  y los neutrones es más difícil a causa de su gran penetrabilidad. El mejor absorbente de rayos  $\gamma$  es el plomo. El boro y el cadmio absorben bien los neutrones lentos. Los neutrones rápidos se frenan previamente utilizando grafito.

¿ ?

1. ¿De qué depende el valor del factor de multiplicación neutrónica?
2. ¿Para qué se emplean en el reactor nuclear los moderadores de neutrones?
3. ¿Qué es la masa crítica?
4. ¿Por qué la reacción de fusión de los núcleos ligeros sólo se produce a temperaturas muy altas?
5. ¿Cómo se explica, desde el punto de vista de la ley de conservación de la energía, el que se desprenda energía tanto en caso de fisión de núcleos pesados, como cuando se funden núcleos ligeros?
6. ¿Qué son los átomos marcados y cómo se utilizan?
7. ¿A qué se llama dosis de radiación?

Ejercicio

14

1. Como resultado de una serie sucesiva de desintegraciones radiactivas el uranio  ${}^{238}_{92}\text{U}$  se transforma en plomo  ${}^{206}_{82}\text{Pb}$ . ¿Cuántas transiciones  $\alpha$  y cuántas transiciones  $\beta$  experimenta?
2. El período de semidesintegración del radio  $T = 1600$  años. ¿A qué es igual la vida media del núcleo de radio?
3. ¿Cuántas veces disminuye el número de átomos de uno de los isótopos

del radón en 1,91 días? El periodo medio de este isótopo del radón  $T = 3,82$  días.

- Utilizando la tabla de Mendeléiev, determinar el número de protones y de neutrones que hay en los núcleos de flúor, argón, bromo, cesio y oro.
- ¿A qué es igual la energía de enlace del núcleo de hidrógeno pesado (deuterón)? La masa atómica relativa del deuterón  $m_D = 2,0141$ , la del protón,  $m_p = 1,00728$  y la del neutrón  $m_n = 1,00866$ ; la masa del átomo de carbono  $m_c = 1,995 \cdot 10^{-26}$  kg.
- Bombardando núcleos de boro  ${}^{11}_3\text{B}$  con protones se obtiene berilio  ${}^4_2\text{Be}$ . ¿Qué otro núcleo se forma en esta reacción?
- Como resultado de la fisión del núcleo  ${}^{235}_{92}\text{U}$  por captura de un neutrón se forman los núcleos  ${}^{142}_{56}\text{Ba}$  y  ${}^{91}_{36}\text{Kr}$  y tres neutrones libres. La energía de enlace específica de los núcleos de bario es 8,38 MeV, la de los de criptón, 8,55 MeV y la de los de uranio 7,59 MeV. ¿A qué es igual la energía que se desprende durante la fisión de un núcleo de uranio?

## BREVE RESUMEN DEL CAPÍTULO 12

La física nuclear estudia la estructura y las transformaciones de los núcleos.

Para registrar y estudiar los choques y las transmutaciones de los núcleos atómicos y de las partículas elementales se utilizan aparatos especiales. Entre ellos figuran el contador de Geiger, la cámara de niebla, la cámara de burbujas y las emulsiones fotográficas.

A finales del siglo pasado A. BECQUEREL descubrió el fenómeno de la radiactividad. Elementos químicos como el uranio, el torio y otros emiten espontáneamente (sin influencia exterior) rayos  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ . La naturaleza de estos rayos es distinta: los rayos  $\gamma$  son ondas electromagnéticas de pequeña longitud (de  $10^{-8}$  a  $10^{-11}$  cm); los rayos  $\beta$  son flujos de electrones, y los rayos  $\alpha$ , flujos de núcleos de átomos de helio.

Rutherford estableció que la desintegración radiactiva es una transformación espontánea de los núcleos atómicos acompañada de la emisión de diversas partículas. Según la ley de la desintegración radiactiva, para cada sustancia radiactiva existe un intervalo de tiempo determinado durante el cual su actividad se reduce a la mitad. Este intervalo de tiempo se llama periodo de semidesintegración o periodo medio. En dependencia de la sustancia, el periodo medio varía dentro de límites muy amplios: desde millares de millones de años hasta fracciones de segundo.

Rutherford fue el primero en efectuar la transformación artificial de núcleos atómicos, bombardeándolos con partículas  $\alpha$  emitidas por sustancias radiactivas. J. Chadwick, haciendo experimentos semejantes, descubrió una nueva partícula elemental, el neutrón. La carga del neutrón es nula y su masa es aproximadamente igual que la del protón (sólo la supera en una cantidad insignificante).

El físico alemán W. HEISENBERG, e independientemente de él el físico soviético D.D. IVANENKO, propusieron el modelo de núcleo atómico de protones y neutrones. De acuerdo con este modelo, el núcleo está formado por protones y neutrones. El número de masa  $A$  del núcleo es igual a la suma del

número de protones  $Z$  y el número de neutrones  $N$ :

$$A = Z + N.$$

Los núcleos que tienen el mismo número de protones  $Z$  pero diferente número de neutrones  $N$  se llaman isótopos. Sus propiedades químicas son idénticas. Los protones y los neutrones son retenidos en el núcleo por poderosas fuerzas de corto alcance. Estas fuerzas se llaman nucleares.

Un concepto importantísimo para toda la física nuclear es el de energía de enlace. La energía de enlace  $E_{\text{enl}}$  es igual a la energía necesaria para dividir el núcleo en nucleones independientes:

$$E_{\text{enl}} = (Zm_p + Nm_n - M_{\text{núcleo}})c^2,$$

donde  $m_p$ ,  $m_n$  y  $M_{\text{núcleo}}$  son, respectivamente, las masas en reposo del protón, del neutrón y del núcleo. La energía de enlace de los núcleos es millones de veces mayor que la energía de ionización de los átomos.

Los cambios que experimentan los núcleos, cuando interactúan entre sí (o con las partículas elementales), se llaman reacciones nucleares. En estas reacciones se produce desprendimiento o absorción de energía. La energía cinética de los núcleos y de las partículas, que son productos de la reacción nuclear, puede ser distinta de la energía cinética de los mismos iniciales, debido a que al transformarse los núcleos varía su energía interna.

La mayoría de las reacciones nucleares se observa cuando los núcleos chocan con partículas elementales cargadas o con núcleos ligeros de gran energía. Esta energía la adquieren en los aceleradores de partículas elementales o de iones. Los neutrones no son repelidos por los núcleos y por eso pueden provocar reacciones nucleares aunque sus energías sean pequeñas.

Los núcleos de uranio, torio y otros elementos pesados pueden escindirse bajo la acción de los neutrones. En este caso en cada acto de fisión se desprende una energía del orden de 200 MeV. Los núcleos, al escindirse, emiten dos o tres neutrones. Esto da la posibilidad de efectuar la reacción en cadena, controlada, en los reactores nucleares. La reacción de fisión de los núcleos no controlada se utiliza en la bomba atómica.

Cuando chocan átomos ligeros, éstos pueden fundirse con desprendimiento de energía. Estas reacciones nucleares sólo pueden producirse a altas temperaturas y, por eso, reciben el nombre de termonucleares. A expensas de las reacciones termonucleares, el Sol y las estrellas emiten energía durante millares de millones de años. Reacciones termonucleares no controladas se efectúan en la bomba de hidrógeno.

La primera central eléctrica atómica del mundo fue construida en la URSS. En este mismo país se desarrolla impetuosamente la construcción de centrales eléctricas nucleares de gran potencia, sobre todo en su parte europea, donde los recursos de combustible orgánico son limitados. La reacción termonuclear controlada no se ha conseguido todavía.

Los isótopos radiactivos, preparados con ayuda de los reactores nucleares y de los aceleradores de partículas elementales, se emplean mucho en la ciencia, en la medicina, en la agricultura y en la industria.

Las radiaciones radiactivas son muy peligrosas para los organismos vivos. Cuando se trabaja con ellas es necesario tomar medidas de seguridad especiales.

### 13.1. ¿Qué es una partícula elemental?

Durante el curso de física se ha hablado en varias ocasiones de la existencia en la naturaleza de partículas llamadas *elementales*. De ellas ya son más o menos conocidas el electrón, el fotón, el protón y el neutrón. Pero, ¿qué es una partícula elemental?

Cuando el filósofo griego DEMÓCRITO llamó átomos a las partículas más simples, indivisibles (se recordará que la palabra griega ÁTOMO significa INDIVISIBLE), probablemente le parecía todo, en principio, no muy complejo. Los diversos objetos, las plantas y los animales están constituidos por partículas invariables e indivisibles. Las transformaciones que se observan en el mundo son simples transposiciones de los átomos. En el mundo todo fluye y cambia, excepto los mismos átomos, que permanecen inmutables.

Pero a finales del siglo XIX se descubrió la estructura compleja de los átomos y fue introducido el electrón como parte componente del átomo. Más tarde, ya en el siglo XX, fueron descubiertos el protón y el neutrón, partículas que entran en la composición del núcleo atómico. Al principio todas estas partículas fueron consideradas exactamente del mismo modo que Demócrito consideró los átomos: se suponían indivisibles y primeras antes inmutables, ladrillos fundamentales del universo.

Sin embargo, la situación de atrayente claridad duró poco. Todo resultó ser mucho más complicado: se puso de manifiesto que no existen partículas invariables. La propia palabra *elemental* tiene doble sentido. Por una parte, ELEMENTAL significa sin duda lo más simple. Por otra, se entiende por elemental algo que es fundamental, que sirve de base a las cosas (precisamente en este sentido ahora las *partículas subatómicas*<sup>1)</sup> se denominan elementales).

Considerar que las partículas elementales que hoy conocemos son semejantes a los átomos invariables de Demócrito es imposible por el simple hecho siguiente. Ninguna de las partículas es inmortal. La mayoría de las partículas, llamadas ahora elementales, no puede vivir más de dos millonésimas de segundo, incluso en ausencia de acción exterior alguna. El neutrón libre (es decir, fuera del núcleo atómico) tiene una vida media de 15 min.

Únicamente el fotón, el electrón, el protón y el neutrino conservarían su invariabilidad, si cada una de estas partículas fuera sola en todo el mundo.

Pero los electrones y los protones tienen unos compañeros muy peligrosos, los positrones y los antiprotones, al chocar con los cuales estas partículas se destruyen mutuamente y se forman otras nuevas.

<sup>1)</sup> *Partículas subatómicas* son aquellas cor. las cuales están formados los átomos.

El fotón emitido por la lámpara de mesa no tiene más de  $10^{-8}$  s de vida. Éste es el tiempo que necesita para llegar a la página del libro y ser absorbido por el papel.

Solamente el neutrino es casi inmortal, debido a que sus interacciones con otras partículas son extraordinariamente débiles. Pero también él parece cuando se encuentra con ellas, aunque estas colisiones son extremadamente raras.

Así, pues, en su búsqueda de lo inmutable en nuestro mundo variable, los científicos se han encontrado no con una "base granítica", sino con "arena movediza".

Todas las partículas elementales se transforman unas en otras y estas transformaciones mutuas son el hecho principal de su existencia.

La idea de la invariabilidad de las partículas elementales resultó ser inconsistente. Pero la de su indivisibilidad se conserva.

Las partículas elementales no se pueden dividir más, pero por sus propiedades son inagotables. El carácter inagotable de las propiedades del electrón fue indicado por V. I. Lenin inmediatamente después del descubrimiento de aquél.

He aquí lo que hace pensar así. Supongamos que se nos plantea el deseo natural de investigar, por ejemplo, si el electrón está formado por otras partículas subelementales<sup>1)</sup>. ¿Qué hay que hacer para intentar dividir el electrón? Sólo es concebible un procedimiento. El mismo que utiliza un niño cuando quiere saber lo que hay dentro de un juguete de plástico, darle un golpe fuerte.

Como es natural, al electrón no se le puede dar un martillazo. En vez de esto hay que utilizar otro electrón lanzado a enorme velocidad o cualquier otra partícula elemental que se mueva a gran velocidad.

Los aceleradores modernos comunican a las partículas cargadas una velocidad cercana a la de la luz.

¿Qué ocurre cuando chocan partículas de energía ultraalta? Estas partículas no se dividen en algo que pueda llamarse sus partes componentes. Generan nuevas partículas de las que ya figuran en la lista de las partículas elementales. Cuanto mayor es la energía de las partículas que chocan, tanto mayor es la cantidad de las que se generan y mayor su peso. Esto es posible en virtud de que al aumentar la velocidad crece la masa de las partículas. De un solo par de partículas cualesquiera con masa acrecentada se pueden obtener, en principio, todas las partículas conocidas hasta hoy.

En la fig. 255 se ve el resultado del choque de un núcleo de carbono, de 60 GeV de energía (raya gruesa superior), con un núcleo de plata de la emulsión fotográfica. El núcleo se rompe en fragmentos que salen lanzados en sentidos distintos. Al mismo tiempo se forman muchas partículas elementales nuevas, piones. Reacciones semejantes a ésta, por choque con núcleos relativistas obtenidos en un acelerador, se efectuaron por primera vez en el mundo, en 1976, en el laboratorio de altas energías del Instituto Unificado de Investigaciones Nucleares de Dubná, en la URSS, bajo la dirección del académico A. M. BALDIN. Los núcleos exentos de envoltura electrónica se obtuvieron ionizando los átomos de carbono con un rayo láser.

<sup>1)</sup> Se sobrentiende que son las partículas con las cuales estarían formadas las elementales que hoy se conocen.

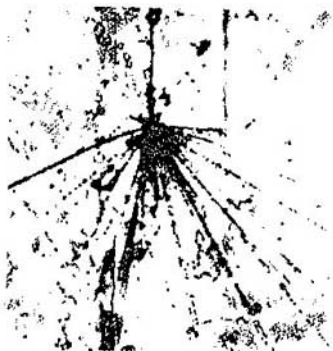


Fig. 255

Es posible que en los choques de partículas, con energías hasta ahora inalcanzadas, se generen algunas partículas nuevas aún desconocidas. Pero esto no cambia la esencia de la cuestión. Las nuevas partículas que se formen en los choques no pueden ser consideradas como partes componentes de las partículas "precursoras", ya que las partículas "hijas", si se aceleran, pueden, sin cambiar de naturaleza, sólo con aumentar su masa, generar a su vez por choque varias partículas exactamente iguales a las que fueron sus "progenitoras" y muchas otras al mismo tiempo.

Según las ideas modernas, son partículas elementales las partículas primarias, indivisibles, de que está constituida toda la materia. Pero la indivisibilidad de las partículas elementales no significa que carezcan de estructura interna (de esta cuestión se tratará al final del capítulo).

## 13.2. Descubrimiento del positrón. Antipartículas

La existencia del sosia o doble del electrón, *positrón*, fue predicha teóricamente por el físico inglés P. DIRACK en 1931. Al mismo tiempo predijo que si un positrón y un electrón se encuentran, ambas partículas **DESAPARECEN** (se *aniquilan*) engendrando fotones de gran energía. También puede ocurrir el proceso inverso, la **FORMACIÓN** del *par electrón-positrón*, por ejemplo, al chocar un fotón de energía suficientemente grande (su masa debe ser mayor que la suma de las masas en reposo de las partículas que nacen) con un núcleo.

Dos años después fue descubierto el positrón por medio de una cámara de niebla situada en un campo magnético. La dirección en que se desviaba la trayectoria de la partícula indicaba el signo de su carga. Por el radio de curvatura y la energía de la partícula se determinó la relación de su carga a su masa. La magnitud de esta relación resultó ser la misma que en el caso del electrón. En la fig. 256 se ve la primera fotografía demostradora de la existencia del positrón. La partícula iba de abajo a arriba y, después de atravesar una placa de

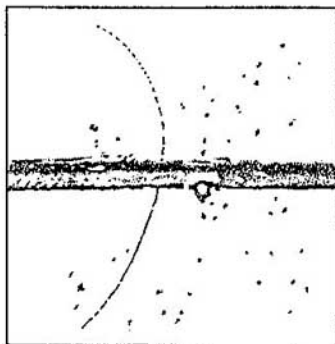
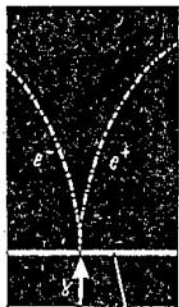


Fig. 256



Placa de plomo

Fig. 257

plomo, perdió parte de su energía. Por eso la curvatura de su trayectoria aumentó.

El proceso de formación de un par electrón-positrón por un cuanto y en una placa de plomo se ve en la fotografía de la fig. 257. En la cámara de niebla sometida al campo magnético el par deja la huella característica en forma de bifurcación arqueada.

La desaparición de unas partículas y la aparición de otras en las reacciones entre partículas elementales es precisamente una transformación y no una simple combinación nueva de las partes componentes de las antiguas partículas. Esto se observa con especial claridad en la aniquilación de los *pares electrón-positrón*. Ambas partículas tienen una masa en reposo determinada y cargas eléctricas. Los fotones que se forman carecen de carga y de masa en reposo, ya que no pueden existir en estado de reposo.

En su tiempo el descubrimiento de la formación y aniquilación de los pares electrón-positrón produjo verdadera sensación en la ciencia. Hasta entonces nadie había supuesto que el electrón, la más antigua de las partículas y principalísimo material de construcción de los átomos, podía no ser eterno. Más tarde se hallaron sosias o dobles-antipartículas-de todas las partículas. Las antipartículas se contraponen a las partículas porque al encontrarse una partícula cualquiera con la antipartícula correspondiente se produce su aniquilación. Ambas partículas desaparecen, transformándose en cuantos de radiación o en otras partículas.

Es relativamente reciente el descubrimiento del antiprotón y el antineutrón. La carga eléctrica del antiprotón es negativa. Ahora se sabe bien que la formación de los *pares partícula-antipartícula* y su aniquilación no es una propiedad exclusiva de los electrones y positrones.

Los átomos cuyos núcleos están constituidos por antinucleones y su envoltura por positrones, forman la antimateria. En 1969 se obtuvo en la URSS, por primera vez en el mundo, el *antihelio*.

Cuando la antimateria y la materia se aniquilan, la energía en reposo (véase



el § 8.7) se transforma en energía cinética de las partículas de radiación que se forman.

La energía en reposo es el depósito más grande y concentrado de energía del Universo.

Esta energía sólo se libera totalmente durante la aniquilación, convirtiéndose en otras formas de la energía. Por eso la antimateria es la fuente de energía más moderna, el combustible de más calorías. Hoy es difícil predecir si la humanidad será capaz alguna vez de utilizar este "combustible".

### 13.3. Desintegración del neutrón. Descubrimiento del neutrino

NATURALEZA DE LA DESINTEGRACIÓN  $\beta$ . Durante la desintegración  $\beta$  del núcleo salen electrones. Pero en el núcleo no los hay. ¿De dónde proceden entonces? Una vez emitido el electrón por el núcleo, la carga de éste y, por consiguiente, el número de protones, aumenta una unidad. El número de masa del núcleo no varía. Por lo tanto, el número de neutrones disminuye una unidad. Esto significa que dentro de los núcleos radiactivos  $\beta$  el neutrón es capaz de desintegrarse en un protón y un electrón. El protón queda en el núcleo, y el electrón sale para afuera. Los neutrones sólo son estables en los núcleos estables.

Pero he aquí una cosa extraña. Núcleos totalmente idénticos emiten electrones de distinta energía. Y los núcleos que se forman en este caso son también idénticos, independientemente de cual fuera la energía del electrón emitido. Esto, al parecer, contradice la ley de conservación de la energía, la más fundamental de las leyes de la física. Resulta que la energía del núcleo inicial no es igual a la suma de las energías del núcleo final y del electrón.

HIPÓTESIS DE PAULI. El físico suizo W. PAULI supuso que, a la vez que el protón y el electrón, al desintegrarse el neutrón se forma cierta partícula "invisible" que se lleva la energía que falta. Esta partícula no la registran los aparatos porque no es portadora de carga eléctrica. Esto quiere decir que es incapaz de ionizar átomos y desintegrar núcleos, o sea, que no puede causar efectos por los cuales pueda juzgarse sobre su aparición.

Claro que sería absurdo afirmar que una partícula, por muy insólita que sea, no interacciona absolutamente con nada. Lo contrario sería introducir esta partícula en la física para disimular la renuncia a la ley de conservación de la energía. Significaría que la energía, junto con la partícula, desaparece irremediamente y para siempre. Por eso supuso Pauli que la hipotética partícula simplemente reacciona de una forma muy débil con la sustancia y por eso puede pasar a través de un gran espesor de ésta sin ponerse de manifiesto.

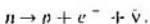
Fermi dio a esta partícula el nombre de *neutrino*, diminutivo de neutrón. Su masa en reposo, como suponía Pauli, resultó ser nula<sup>1)</sup>. El sentido de estas palabras es sencillo: neutrinos en reposo no existen. En cuanto aparecen se mueven ya con la velocidad de 300 000 km/s. Se calculó cómo interaccionan los

<sup>1)</sup> En 1980 se conoció la noticia del descubrimiento de una masa en reposo muy pequeña del neutrino. Por ahora este resultado no puede considerarse establecido indudablemente.

neutrinos con la sustancia en una capa de determinado espesor. En el sentido de poder descubrir esta partícula experimentalmente, el resultado fue poco consolador. La esfera terrestre es para el neutrino más transparente que el mejor vidrio para la luz.

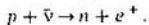
**DESINTEGRACIÓN DEL NEUTRÓN LIBRE.** El papel del neutrino no se reduce a explicar la desintegración  $\beta$  de los núcleos. Muchas partículas elementales en estado libre se desintegran espontáneamente con emisión de un neutrino. En primer lugar se comporta así el neutrón. Éste sólo adquiere estabilidad en los núcleos, a expensas de las interacciones con los otros nucleones. Pero libre el neutrón vive nada más que 15 min en promedio. Esto fue demostrado por vía experimental únicamente después de haber sido construidos los reactores nucleares que producen flujos potentes de neutrones.

Lo mismo que otras partículas, el neutrino (cuyo símbolo es  $\nu$ ) tiene antipartícula, llamada antineutrino (su símbolo es  $\bar{\nu}$ ). Durante la desintegración del neutrón en un protón y un electrón es emitido precisamente un antineutrino:



La energía del neutrón es siempre mayor que la suma de las energías del protón y el electrón. La energía sobrante se la lleva el antineutrino.

**DESCUBRIMIENTO EXPERIMENTAL DEL NEUTRINO.** A pesar de parecer inatrapable, el neutrino (o más exactamente, el antineutrino), después de 26 años de "existencia fantasmal" en las revistas científicas, fue descubierto experimentalmente. La teoría predijo que si un antineutrino chocaba con un protón se formaría un positrón y un neutrón.



La probabilidad de este proceso es muy pequeña a causa del extraordinario poder de penetración del antineutrino. Pero si los antineutrinos son muchos cabe la esperanza de poder descubrirlos. Una cantidad enorme de antineutrinos se produce durante el funcionamiento de un reactor nuclear, ya que al desintegrarse los átomos de uranio se forma una multitud de fragmentos radiactivos  $\beta$  con periodo de vida pequeño. Precisamente junto a un reactor (el experimento fue hecho en 1956 en EE.UU.) se enterró un cajón con paredes de plomo y parafina. En el cajón había 200 l de agua, que contenía cadmio, rodeada de una capa de centellador líquido (cerca de 300 l). El centellador lanzaba destellos cuando a través de él pasaban cuantos  $\gamma$ .

El positrón aparecido cuando un antineutrino chocaba con uno de los protones de las moléculas de agua (punto *A* en la fig. 258), se aniquilaba inmediatamente con uno de los electrones (punto *B*), dando dos cuantos  $\gamma$ . Los cuantos gamma producían destellos del centellador, los cuales se registraban por aparatos especiales. El neutrón formado en esta reacción, después de cierto "vagabundeo", era capturado por un núcleo de cadmio (punto *C*). Este núcleo emitía varios cuantos  $\gamma$ , lo que servía de señal de haberse producido la reacción provocada por el neutrón recién formado. La aparición primero de dos cuantos lanzados en sentidos distintos y después, al cabo de un pequeño intervalo de tiempo, de varios cuantos  $\gamma$  más, confirmó la existencia del antineutrino. Ésta

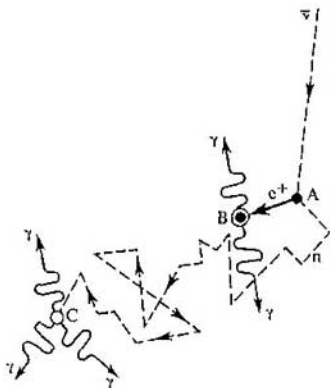


Fig. 258

quedó establecida con el grado de certeza posible en las investigaciones que atañen al mundo de las partículas elementales.

**ESENCIA DE LA DESINTEGRACIÓN DE LAS PARTÍCULAS ELEMENTALES.** Advertiremos para terminar, que la desintegración del neutrón y de las demás partículas elementales consiste en una transformación en el mundo de dichas partículas y no una descomposición de un sistema complejo en sus partes componentes.

La relación entre las partículas "hijas" y la partícula "progenitora" no se parece en nada a la relación entre una vasija rota y la vasija entera. En el caso de la desintegración del neutrón, por ejemplo, esto es evidente: como el antineutrino sólo puede existir moviéndose en línea recta a la velocidad de la luz, no puede encontrarse dentro del neutrón. El protón y el electrón que aparecen al desintegrarse el neutrón pueden formar un sistema estable. Pero éste será el bien conocido y perfectamente estudiado átomo de hidrógeno, y no el neutrón.

Lo mismo ocurre con otras partículas que sólo viven un intervalo de tiempo determinado. La desintegración de una partícula no es indicio de que ésta no sea elemental. El neutrón, a pesar de su inestabilidad, se considera partícula elemental, mientras que el núcleo del átomo del hidrógeno pesado (*deuterón*), aunque sea estable, está formado, sin duda alguna, por un neutrón y un protón.

## 13.4. ¿Cuántas partículas elementales existen?

Las dudas acerca de si todas las partículas que ahora se llaman elementales justifican plenamente este nombre son muy grandes. El fundamento para estas dudas es sencillo: son demasiadas partículas.

El descubrimiento de una partícula elemental nueva siempre ha constituido y continúa constituyendo un destacado triunfo de la ciencia. Pero hace ya mucho tiempo que a cada nuevo triunfo comenzó a mezclarse una parte de impaciencia. Los triunfos se han ido sucediendo unos a otros literalmente.

Fue descubierto el grupo de las llamadas partículas "extrañas": mesones  $K$  e hiperones con masas mayores que las de los nucleones. En los años 70 se añadió el grupo de partículas "con encanto", cuyo número cuántico "charm" es distinto de cero, con masas aún mayores. Además se han descubierto unas partículas de corta existencia, cuyo período de vida es del orden de  $10^{-22}$  a  $10^{-23}$  s. Estas partículas recibieron el nombre de resonancias y su número pasa de doscientas.

Si se excluyen las resonancias de corta vida y las recién descubiertas partículas "con encanto", también de corto período de vida, obtenemos la tabla de 39 partículas elementales que se da en la pág. 336.

En dicha tabla todas las partículas están divididas en grupos y (excepto el mesón  $\tau$ ) dispuestas según el orden del incremento de la masa.

La tabla la abre el fotón. Éste, en solitario, forma el grupo primero.

El grupo siguiente lo constituyen las partículas ligeras, leptones. En él figuran doce partículas (incluidas las antipartículas). Hay tres tipos de neutrinos: el neutrino electrónico, que se forma junto con los electrones; el neutrino muónico, que lo hace junto con los mesones  $\mu$ , y el neutrino mesónico  $\tau$ , que aparece junto con los mesones  $\tau$ . Después viene el electrón, el mesón  $\mu$  y, finalmente, el mesón  $\tau$ , descubierto en 1975. Aunque el mesón  $\tau$  tiene una masa muy grande, se ha incluido en el grupo de los leptones porque todas sus demás propiedades se parecen a las de éstos. La propiedad fundamental que lo asemeja a los demás leptones es la de que esta partícula, lo mismo que los otros leptones, no toma parte en las interacciones fuertes. En cuanto al neutrino mesónico  $\tau$ , aún no se ha descubierto experimentalmente, pero su existencia no suscita dudas.

Siguen después los mesones. Este grupo está formado por ocho partículas. Las más ligeras de ellas son los mesones  $\pi$ : positivos, negativos y neutros. Sus masas respectivas son iguales a 264 ( $\pi^0$ ) y 273 ( $\pi^+$  y  $\pi^-$ ) masas electrónicas. Los piones son cuantos de campo nuclear, de un modo semejante a como los fotones son cuantos de campo electromagnético. Existen además cuatro mesones  $K$  y un mesón  $\eta^0$ .

El último grupo, el de los bariones, es el más extenso. Lo forman 18 de las 39 partículas. Los más ligeros de los bariones son los nucleones (protones y neutrones). Les siguen los llamados hiperones. Cierra la tabla la partícula  $\Omega^-$  (omega menos), descubierta en 1964. Su masa es 3273 veces mayor que la del electrón.

LOS QUARKS Y LOS LEPTONES COMO PARTÍCULAS VERDADERAMENTE ELEMENTALES. La existencia de tan gran número de partículas hace pensar que no todas ellas son elementales en igual medida.

Ya en 1963 M. GELL-MANN y G. ZWEIG propusieron un modelo según el cual todas las partículas que participan en las interacciones fuertes (nucleares) están formadas por partículas más fundamentales (o primarias) que denominaron quarks (españolizado, cuarques). Excepto los fotones y los leptones, todas las partículas descubiertas son compuestas.

Inicialmente se introdujo la hipótesis de que existen tres cuarques (y, respectivamente, tres anticuarques). Los cuarques deben tener cargas eléctricas fraccionarias. Se designan con las letras  $u$ ,  $d$  y  $s$ . Los primeros, cuarques  $u$ ,

tienen la carga  $+2/3e$ ; los cuarques  $d$  y  $s$  tienen la misma carga, igual a  $-1/3e$  (donde  $e$  es el módulo de la carga del electrón). El protón consta de dos cuarques  $u$  y un cuarque  $d$ ; los piones son combinaciones *cuarque-anticuarque* y así sucesivamente. Las partículas extrañas (kaones e hiperones) contienen el cuarque más pesado, el  $s$ , llamado "extraño".

Se ha predicho la existencia de un cuarto cuarque, el denominado *cuarque c*, con *charm* no nulo. Más tarde fueron descubiertas por vía experimental partículas que contienen este cuarque. La masa del cuarque  $c$  es mayor que la del cuarque  $s$ .

Los experimentos de dispersión de neutrinos y electrones de energías ultraaltas por los nucleones han confirmado la estructura "cuárcuica" tanto de los protones como de los neutrones. Pero desintegrar los nucleones en cuarques no ha sido posible.

Los cuarques se han buscado y se buscan aún entre las rocas continentales, en los sedimentos en el fondo del océano y en el suelo lunar. Pero cuarques libres no se han encontrado.

Por lo visto las fuerzas que actúan entre los cuarques no disminuyen con la distancia, como todas las demás fuerzas, sino que aumentan. Si esto es así, nunca se conseguirá desintegrar los nucleones y otras partículas en cuarques. El protón y otras partículas tienen estructura compleja, pero dividir las en partes es imposible.

Según las ideas modernas todos los leptones, lo mismo que los cuarques, carecen de estructura interna. En este sentido los leptones y los cuarques pueden considerarse partículas verdaderamente elementales. Aparte de las antipartículas, hasta ahora se han descubierto seis leptones. Cuarques se han descubierto cinco. El quinto es el llamado cuarque  $b$ , y su masa es mayor que la del cuarque  $c$ . Se supone que existe un sexto cuarque, de masa mayor aún que la del cuarque  $b$ . El análisis teórico lleva a la conclusión de que debe existir la simetría "cuarco-leptónica": toda la materia está construida con seis leptones y seis cuarques diferentes. Junto con sus antipartículas, estas partículas verdaderamente elementales serán en total 24.

A ellas debe añadirse el cuanto de campo electromagnético o fotón y el cuanto del campo que efectúa la interacción entre los cuarques. Las partículas de este campo se llaman *gluones*. Los gluones aún no se han descubierto experimentalmente. También deben existir cuantos del campo de las interacciones débiles o *bosones vectoriales*. Éstos tampoco han sido descubiertos hasta ahora.

Así, pues, el cuadro de la estructura de la materia en su nivel más profundo ha resultado ser muy complejo. La teoría de las fuerzas "intercuárcuicas" no está acabada aún. Es posible que en el futuro se descubran aún cuarques y leptones de mayor masa.

No obstante, puede decirse que durante los últimos años se han logrado éxitos enormes en la física de las partículas elementales. Se ha descubierto una serie de nuevas partículas, se ha establecido la estructura "cuárcuica" de las partículas que interaccionan fuertemente. También tiene importancia el haberse iniciado la creación de una teoría única de todas las fuerzas de la naturaleza. Las interacciones electromagnéticas y débiles ya han sido incluidas dentro del marco de la teoría única.

¿ ?

1. El electrón es la partícula más ligera entre las cargadas. ¿Cuál de las leyes de conservación que usted conoce prohíbe la transformación del mismo en fotones?
2. Al aniquilarse un electrón y un positrón lentos se forman dos cuantos  $\gamma$ . ¿Bajo qué ángulo entre sí salen lanzados?
3. ¿Cuál es la frecuencia de los cuantos  $\gamma$  que se forman en las condiciones indicadas en la pregunta anterior?
4. ¿Por qué el neutrón libre se desintegra en un protón, un electrón y un antineutrino, mientras que el protón libre no puede desintegrarse en un neutrón, un positrón y un neutrino?
5. ¿Se puede observar en la cámara de niebla la traza de una partícula cargada, cuyo periodo de vida sea de  $10^{-23}$  s?
6. ¿Qué es un quark (o cuarque)?

### BREVE RESUMEN DEL CAPÍTULO 13

Las partículas elementales son las partículas primarias, indivisibles de que está hecha toda la materia.

Pero las partículas elementales no permanecen invariables. Todas las partículas elementales son capaces de transformarse unas en otras y estas transformaciones mutuas son el hecho más importante de su existencia.

La mayoría de las partículas elementales son inestables y con el tiempo se transforman espontáneamente en otras partículas; excepciones de esto son el fotón, el electrón, el protón y el neutrino.

Todas las partículas tienen socias o antipartículas. Por ejemplo, respecto del electrón, la antipartícula es el positrón. La partícula y la antipartícula tienen la misma masa, pero sus cargas tienen signos contrarios. Cuando una partícula se encuentra con su antipartícula ambas desaparecen (se aniquilan) transformándose en otras partículas. La aniquilación del positrón y el electrón va acompañada de la formación de dos (o tres) cuantos gamma.

El desarrollo de la técnica de registro de las partículas elementales y la creación de reactores nucleares dio la posibilidad de descubrir experimentalmente el neutrino. Esta partícula interactúa muy débilmente con la sustancia. Fue predicha, basándose en la ley de conservación de la energía, 26 años antes de ser descubierta. Se ha demostrado empíricamente la existencia de distintos tipos de neutrino.

El número de partículas elementales descubiertas en los años 70 es de varias decenas. Además se reveló la existencia de más de doscientas partículas de corta vida, denominadas resonancias (su periodo de vida es del orden de  $10^{-23}$  s).

En relación con esto se ha propuesto una hipótesis según la cual la mayoría de las partículas elementales están formadas por partículas más fundamentales, denominadas quarks o cuarques. Los cuarques se han descubierto dentro de los protones y neutrones al observar la dispersión de los electrones y neutrinos de grandes energías por los nucleones. Pero en estado libre los cuarques no se han descubierto y es probable que sea imposible desintegrar los nucleones y otras partículas en cuarques.

En la actualidad se construye con éxito la teoría única de las distintas interacciones. Ya se han reunido dentro del marco de una teoría las interacciones electromagnéticas y las débiles.

Tabla de las partículas elementales

|          | Nombre de la partícula    | Símbolo             |                    | Masa<br>(en masas<br>de electrón) | Carga<br>eléctrica    | Vida media, s   |                       |
|----------|---------------------------|---------------------|--------------------|-----------------------------------|-----------------------|---|-----------------------|
|          |                           | Partícula           | Anti-<br>partícula |                                   |                       |   |                       |
| Leptones | Fotón                     | $\gamma$            | $\gamma$           | 0                                 | 0                     | Estable   |                       |
|          | Neutrino electrónico      | $\nu_e$             | $\bar{\nu}_e$      | 0                                 | 0                     | Estable   |                       |
|          | Neutrino $\mu$ -mesónico  | $\nu_\mu$           | $\bar{\nu}_\mu$    | 0                                 | 0                     | Estable   |                       |
|          | Neutrino $\tau$ -mesónico | $\nu_\tau$          | $\bar{\nu}_\tau$   | 0                                 | 0                     | Estable   |                       |
|          | Electrón                  | $e^-$               | $e^+$              | 1                                 | -1                    | Estable   |                       |
|          | Mesón mu                  | $\mu^-$             | $\mu^+$            | 206,7                             | -1                    | $2,2 \cdot 10^{-6}$   |                       |
|          | Mesón tau                 | $\tau^-$            | $\tau^+$           | 3528                              | 0                     | $3,5 \cdot 10^{-12}$  |                       |
| Mesones  | Mesones pi (piones)       | $\pi^0$             | $\pi^0$            | 264,1                             | 0                     | $0,8 \cdot 10^{-16}$  |                       |
|          |                           | $\pi^+$             | $\pi^-$            | 273,1                             | 1                     | $2,6 \cdot 10^{-8}$   |                       |
|          | Mesones K (kaones)        | $K^+$               | $K^-$              | 966,4                             | 1                     | $1,23 \cdot 10^{-8}$  |                       |
|          |                           | $K^0$               | $\bar{K}^0$        | 974,1                             | 0                     | $K_S^0 - 0,86 \cdot 10^{-10}$<br>$K_L^0 - 5,38 \cdot 10^{-8}$ |                       |
|          | $\eta^0$ -mesón           | $\eta^0$            | $\eta^0$           | 1074                              | 0                     | $10^{-17}$  |                       |
| Bariones | Nucleones                 | Protón              | $p$                | $\bar{p}$                         | 1836,1                | 1   | Estable               |
|          |                           | Neutrón             | $n$                | $\bar{n}$                         | 1836,6                | 0   | $10^3$                |
|          | Hipercleones              | Hipercleones lambda | $\Lambda$          | $\bar{\Lambda}^0$                 | 2184,1                | 0   | $2,5 \cdot 10^{-10}$  |
|          |                           | Hipercleones sigma  | $\Sigma^+$         | $\bar{\Sigma}^+$                  | 2327,6                | 1   | $0,8 \cdot 10^{-10}$  |
|          |                           |                     | $\Sigma^0$         | $\bar{\Sigma}^0$                  | 2333,6                | 0   | $10^{-14}$            |
|          |                           |                     | $\Sigma^-$         | $\bar{\Sigma}^-$                  | 2343,1                | -1  | $1,49 \cdot 10^{-10}$ |
|          |                           | Hipercleones xi     | $\Xi^0$            | $\bar{\Xi}^0$                     | 2572,8                | 0   | $3,03 \cdot 10^{-10}$ |
| $\Xi^-$  | $\bar{\Xi}^-$             |                     | 2585,6             | -1                                | $1,66 \cdot 10^{-10}$ |   |                       |
|          | Partícula omega menos     | $\Omega^-$          | $\bar{\Omega}^-$   | 3273                              | -1                    | $1,3 \cdot 10^{-10}$  |                       |

# Importancia de la física para explicar el mundo y el desarrollo de las fuerzas productivas de la sociedad

## 14.1. Interpretación física del mundo como un todo único

Hemos terminado el curso de física. Durante él cada cual ha podido conocer en mayor o menor grado los resultados del enorme esfuerzo de investigación de las diversas formas del movimiento de la materia, la estructura y las propiedades de los cuerpos materiales, realizado durante muchos siglos por los científicos de todo el mundo.

Por la física conocemos las leyes más generales de la naturaleza, que rigen los procesos que se desarrollan en el mundo que nos rodea y en el Universo en conjunto.

La física tiene por objeto describir las leyes generales de la naturaleza y explicar, basándose en ellas, los procesos concretos. A medida que se iba avanzando hacia este fin, ante los científicos paulatinamente se dibujaba el majestuoso e intrincado cuadro de la unidad de la naturaleza. El mundo no es un conjunto de hechos dispersos, independientes unos de otros, sino de manifestaciones diversas y múltiples de un todo único.

**INTERPRETACIÓN MECÁNICA DEL MUNDO.** A muchas generaciones de científicos admiró, y sigue admirando, la majestuosa y acabada interpretación del mundo creada sobre la base de la mecánica de Newton. Según Newton todo el mundo está formado por "partículas sólidas, pesadas, impenetrables y móviles". Estas "partículas primarias, son absolutamente rígidas: incomparablemente más rígidas que los cuerpos formados por ellas, y tan duras que nunca se desgastan ni se hacen añicos". Se diferencian unas de otras cuantitativamente, por sus masas. Toda la magnificencia, toda la diversidad cualitativa del mundo es resultado de las diferencias del movimiento de las partículas. La esencia intrínseca de las partículas queda en segundo plano.

De base para esta interpretación unitaria del mundo sirvió el carácter universal de las leyes del movimiento de los cuerpos descubiertas por Newton. A estas leyes se subordinan con asombrosa exactitud tanto los enormes cuerpos celestes como los diminutos granitos de arena que arrastra el viento. Incluso el viento — movimiento de partículas invisibles de aire — cumple estas mismas leyes. Durante mucho tiempo los hombres de ciencia estuvieron convencidos de que las únicas leyes fundamentales de la naturaleza eran las de la mecánica de Newton. Así, el científico francés J. LAGRANGE consideró a Newton como "el más feliz de los hombres, porque sólo una vez y sólo un hombre está predestinado a estructurar una interpretación cabal del mundo".



Pero la simple interpretación mecánica del mundo resultó ser inconsistente. Al estudiar los procesos electromagnéticos se aclaró que éstos no se subordinan a la mecánica de Newton. Maxwell descubrió un nuevo tipo de leyes fundamentales que no se reducen a la mecánica de Newton, las leyes del comportamiento del campo electromagnético.

**INTERPRETACIÓN ELECTROMAGNÉTICA DEL MUNDO.** En la mecánica de Newton se suponía que los cuerpos actúan entre sí directamente a través del vacío y que estas interacciones se realizan instantáneamente (teoría de la acción a distancia). Después de la creación de la electrodinámica cambiaron esencialmente las ideas acerca de las fuerzas. Cada uno de los cuerpos que interactúan crea un campo electromagnético que, con velocidad finita, se propaga en el espacio. La interacción se efectúa por medio de este campo (teoría de la acción próxima).

Las fuerzas electromagnéticas están extraordinariamente extendidas en la naturaleza. Actúan en el núcleo atómico, en el átomo, en la molécula, entre las moléculas aisladas y en los cuerpos macroscópicos. Esto ocurre porque en la composición de todos los átomos entran partículas eléctricamente cargadas. La acción de las fuerzas electromagnéticas se manifiesta a distancias muy pequeñas (núcleo) y a distancias cósmicas (radiación electromagnética de las estrellas).

El desarrollo de la electrodinámica condujo a intentar dar una *interpretación electromagnética única del mundo*. De acuerdo con ella todos los sucesos que ocurren en el mundo están regidos por las leyes de las interacciones electromagnéticas.

La interpretación electromagnética del mundo llegó a su punto culminante al crearse la teoría especial de la relatividad. Entonces se comprendió la importancia fundamental del carácter finito de la velocidad de propagación de las interacciones electromagnéticas, se creó una nueva teoría del espacio y el tiempo, se hallaron las ecuaciones relativistas del movimiento que sustituyen a las de Newton cuando las velocidades son grandes.

Si en la época en que florecía la interpretación mecánica del mundo se intentó reducir los fenómenos electromagnéticos a procesos mecánicos en un medio especial (el éter universal), ahora se tendía a lo contrario, es decir, a deducir las leyes del movimiento de las partículas a partir de la teoría electromagnética. Se trató de considerar las partículas de sustancia como "concentraciones" del campo electromagnético.

Pero no se consiguió reducir todos los procesos de la naturaleza a fenómenos electromagnéticos. Las leyes del movimiento de las partículas y la ley de la interacción gravitatoria no se pueden deducir de la teoría del campo electromagnético. Además, se descubrieron las partículas eléctricamente neutras y nuevos tipos de interacciones. La naturaleza resultó ser más compleja que se suponía al principio: ni una ley única del movimiento, ni una fuerza única son capaces de abarcar toda la diversidad de procesos que se desarrollan en el mundo.

**UNICIDAD DE LA ESTRUCTURA DE LA MATERIA.** El mundo es tan diverso que, indudablemente, todos los cuerpos no pueden estar formados por partículas de un mismo tipo. Pero, aunque parezca asombroso, la sustancia de las estrellas es exactamente la misma que la sustancia de que está constituida la Tierra. Los átomos que componen todos los cuerpos del Universo son

exactamente iguales. Los organismos vivos están formados por los mismos átomos que los inanimados.

Todos los átomos tienen la misma estructura y están formados por partículas elementales de tres tipos. Tienen núcleos de protones y neutrones, rodeados de electrones. La interacción entre los núcleos y los electrones se efectúa por el campo electromagnético, cuyos cuantos son los fotones.

La interacción entre los protones y los neutrones en el núcleo se realiza, en cambio, fundamentalmente por medio de los mesones  $\pi$ , que son cuantos del campo nuclear. Cuando se desintegran los neutrones aparecen neutrinos. Además de éstas se han descubierto otras muchas partículas elementales. Pero únicamente cuando interactúan partículas, cuyas energías son muy grandes, aquéllas empiezan a desempeñar un papel apreciable.

En la primera mitad del siglo XX se descubrió un hecho fundamental: todas las partículas elementales son capaces de transformarse unas en otras.

Después del descubrimiento de las partículas elementales y sus transformaciones, el primer plano de la interpretación unitaria del mundo pasó a ocuparlo la UNICIDAD DE LA ESTRUCTURA DE LA NATURALEZA. En la base de esta unicidad se encuentra la materialidad de todas las partículas elementales. Las distintas partículas elementales son formas diferentes concretas de existencia de la materia.

**INTERPRETACIÓN FÍSICA MODERNA DEL MUNDO.** La unidad esencial del mundo no se agota con la unicidad de la estructura de la materia. Se manifiesta también en las leyes del movimiento de las partículas y de sus interacciones.

A pesar de la extraordinaria diversidad de las interacciones de los cuerpos entre sí, en la naturaleza sólo existen, de acuerdo con los datos actuales, cuatro tipos de fuerzas: *gravitatorias, electromagnéticas, nucleares y débiles*. Las últimas se revelan principalmente en las transformaciones de las partículas elementales unas en otras. Con manifestaciones de estos cuatro tipos de fuerzas nos encontramos en los espacios ilimitados del Universo, en cualquier cuerpo de la Tierra (incluidos los organismos vivos), en los átomos y núcleos atómicos y en todas las transformaciones de partículas elementales.

El cambio revolucionario de las ideas clásicas en la interpretación física del mundo se produjo después del descubrimiento de las propiedades cuánticas de la materia. Con la aparición de la física cuántica, que describe el movimiento de las micropartículas, empezaron a columbrarse los nuevos elementos de la interpretación del mundo como un todo único.

La división de la materia en sustancia, con estructura continua, y campo discontinuo ha perdido su sentido absoluto. Cada campo tiene sus cuantos: el campo electromagnético, los fotones; el nuclear, los mesones  $\pi$  y así sucesivamente. A su vez, todas las partículas tienen propiedades ondulatorias. La dualidad corpuscular-ondulatoria es propia de todas las formas de la materia.

La descripción de las propiedades, al parecer contradictorias, corpusculares y ondulatorias dentro del marco de una teoría única fue posible en virtud de que las leyes del movimiento de todas las micropartículas sin excepción tienen carácter ESTADÍSTICO (PROBABILÍSTICO). Este hecho hace imposible predecir unívocamente el comportamiento de los microobjetos.

Los principios de la teoría cuántica son totalmente generales, aplicables para definir el movimiento de todas las partículas, las interacciones entre ellas y sus transformaciones mutuas.

Así, pues, la física moderna nos muestra sin duda alguna los rasgos de la unidad esencial de la naturaleza. Pero, a pesar de todo, es mucho, y quizá hasta la esencia misma de la unidad del mundo, lo que aún no se ha logrado captar. Se desconoce por qué existen tantas partículas elementales diferentes, por qué tienen tales o cuales valores de masa, carga y otras características. Hasta ahora todas estas magnitudes se determinan experimentalmente.

No obstante, cada vez se va viendo más claramente la relación entre los distintos tipos de interacciones. Ya se han unido dentro del marco de una misma teoría las interacciones electromagnéticas y las interacciones débiles. Se conoce la estructura de la mayoría de las partículas elementales. Es muy probable que la física de las partículas elementales esté en el umbral de grandes descubrimientos.

"Aquí se ocultan secretos tan profundos e ideas tan elevadas que, a pesar de los esfuerzos de centenares de agudísimos pensadores que trabajaron miles de años, aún no se ha logrado penetrar en ellos y la alegría de las búsquedas y los descubrimientos creadores aún sigue existiendo". Estas palabras dichas por Galileo hace tres siglos y medio no han envejecido en absoluto.

**CONCEPCIÓN CIENTÍFICA DEL MUNDO.** Las leyes fundamentales establecidas por la física, por su complejidad y comunidad, sobrepasan mucho los hechos con los cuales comienza la investigación de cualesquiera fenómenos. Pero son tan fidedignas y objetivas como los conocimientos sobre los fenómenos simples que se observan directamente. Estas leyes no se infringen nunca, cualesquiera que sean las condiciones.

Cada vez son más las gentes que comprenden que las leyes objetivas que sigue la naturaleza excluyen los milagros y que el conocimiento de estas leyes acrecienta el poder del hombre sobre la naturaleza.

En el pasado la sociedad humana ligaba sus normas de conducta principalmente con la creencia en lo sobrenatural, en la religión. Esta última implica la idea de que las posibilidades del hombre son limitadas o de la existencia de la voluntad divina, que dirige la vida de los hombres hacia un fin determinado. Puede afirmarse que los adelantos de la ciencia en la explicación de la naturaleza socava este sistema de razonamientos.

## **14.2. La física y la revolución científico-técnica<sup>1)</sup>**

En la actualidad continúa desarrollándose la gran revolución científico-técnica que comenzó hace cerca de un cuarto de siglo. Con ella se han producido profundos cambios cualitativos en muchas ramas de la ciencia y de la técnica. Una de las ciencias más antiguas, la astronomía, experimenta la revolución debida a la salida del hombre al espacio cósmico. La aparición de la biología molecular y la genética han revolucionado la biología, y la creación de la llamada química grande ha sido posible gracias a la

---

<sup>1)</sup> El autor de este párrafo es V.A. Leshkóvtsev.

revolución de la ciencia química. Procesos análogos tienen lugar en la geología, meteorología y en muchas otras ciencias modernas.

Profundos cambios cualitativos se producen también en nuestros días en todas las ramas principales de la técnica. En la energética la revolución está vinculada, en particular, con el paso de las centrales eléctricas térmicas, que funcionan con combustible orgánico, a las centrales eléctricas atómicas. En la rama que se ocupa de materiales nuevos viene condicionada por la creación de la industria de los materiales artificiales, con propiedades extraordinarias, muy importantes desde el punto de vista práctico. La mecanización y automatización compleja conducen a una inevitable revolución en la industria y la agricultura. El transporte, la construcción y las comunicaciones se transforman en ramas esencialmente nuevas y mucho más productivas y perfectas de la técnica moderna.

La revolución científico-técnica ha cambiado radicalmente el papel de la ciencia en la vida de la sociedad. La ciencia se ha convertido en una fuerza productiva directa. De ahora en adelante la suerte de la producción de los bienes materiales que la humanidad necesita va a depender directamente de los adelantos de la ciencia.

La revolución científico-técnica impone inevitablemente a la humanidad una grandiosa reconstrucción y perfeccionamiento de todas las esferas de la producción.

Al mismo tiempo la revolución científico-técnica hace que el problema de la defensa del medio ambiente cobre extraordinaria actualidad.

Entre las ciencias naturales modernas, la física es una de las más destacadas. Ella ejerce una enorme influencia sobre otras ramas de la ciencia, de la técnica y de la producción. He aquí algunos ejemplos de dicha influencia.

Durante milenios los astrónomos sólo tuvieron la información sobre los fenómenos celestes que les proporcionaba la luz visible. Puede decirse que estudiaban dichos fenómenos a través de una estrecha rendija del extenso espectro de las radiaciones electromagnéticas. Hace tres decenios, en virtud del desarrollo de la radiofísica surgió la radioastronomía, que ensanchó extraordinariamente nuestros conocimientos del Universo. Ella nos ayudó a conocer la existencia de muchos objetos cósmicos antes ignorados. En fuente adicional de conocimientos astronómicos se ha convertido la parte de la escala de las ondas electromagnéticas que se encuentra en la gama de ondas hertzianas.

Una riquísima información científica aportan del cosmos otros tipos de radiación electromagnética que no llegan a la superficie de la Tierra, porque son absorbidas por la atmósfera. Con la salida del hombre al espacio cósmico han nacido nuevas especialidades de la astronomía que cambian su carácter, tales como la astronomía ultravioleta e infrarroja, la astronomía de rayos X y la astronomía de rayos gamma. Se ha ensanchado enormemente la posibilidad de estudiar los rayos cósmicos primarios que inciden sobre el límite de la atmósfera terrestre. En el transcurso de esta revolución los astrónomos han conseguido por primera vez poder investigar todos los tipos de partículas y radiaciones que llegan del espacio cósmico. El volumen de la información científica obtenida por los astrónomos durante los últimos decenios supera mucho el de la información conseguida durante toda la historia anterior de la

astronomía. Los métodos de investigación y los aparatos registradores que se utilizan con este fin han sido tomados del arsenal de la física moderna; la antigua astronomía se transforma así en la nueva astrofísica.

Se están creando las bases de la astronomía neutrónica, que aportará a los científicos información acerca de los procesos que tienen lugar en las entrañas de los cuerpos celestes, por ejemplo, en las profundidades de nuestro Sol. La creación de la astronomía neutrónica sólo ha sido posible gracias a los éxitos alcanzados por la física de los núcleos atómicos y de las partículas elementales.

La revolución en la biología se suele relacionar con la aparición de la biología molecular y la genética, que estudian los procesos vitales a nivel molecular. Los medios y métodos fundamentales que utiliza la biología molecular para detectar, aislar y estudiar sus objetos (microscopios electrónicos y protónicos, análisis estructural por rayos X, electronografía, análisis neutrónico, átomos trazadores, ultracentrifugadoras, etc.) también han sido tomados de la física. Sin estos medios nacidos en los laboratorios físicos, los biólogos no hubieran podido penetrar en un nivel cualitativamente nuevo de investigación de los procesos que se desarrollan en los organismos vivos. Así, pues, la utilización de los métodos físicos ha tenido una importancia definitiva en la creación y desarrollo de la biología molecular y de la genética.

Un papel muy importante desempeña la física moderna en la reconstrucción de la química, la geología, la oceanología y otras ciencias naturales.

La física se encuentra también en los orígenes de las transformaciones revolucionarias de todas las ramas de la técnica. Sobre la base de sus logros se reconstruyen la energética, las comunicaciones, el transporte, la construcción y la producción industrial y agrícola.

La revolución en la energética ha sido provocada por el surgimiento de la energía atómica. Las reservas de energía que se encuentran en el combustible atómico superan mucho las aún no gastadas de combustible convencional. El carbón, el petróleo y el gas natural se han convertido en nuestros días en materia prima fundamental para la gran industria química. Quemarlos en grandes cantidades es producir un daño irreparable a esta importante rama de la producción moderna. Por eso es muy conveniente utilizar para los fines energéticos combustible atómico (uranio, torio). Esas son las ventajas principales de la energía atómica.

Las centrales eléctricas termonucleares están llamadas a liberar la humanidad en el futuro de su preocupación por las fuentes de energía. Como ya se sabe, los fundamentos científicos de la energía atómica y termonuclear se apoyan totalmente en los logros obtenidos por la física de los núcleos atómicos.

La técnica del futuro se creará no a base de materiales acabados de origen natural, que ya en nuestros días no pueden garantizar su seguridad y larga duración, sino con materiales sintéticos de propiedades preestablecidas. En la creación de esos materiales, junto a la gran química, van a desempeñar un papel cada vez más importante los métodos físicos de influir sobre la sustancia (haces electrónicos, iónicos y láser; campos magnéticos superintensos; presiones y temperaturas ultraaltas; ultrasonido, etc). En ellos se funda la posibilidad de obtener materiales con características extremas y de crear métodos nuevos en principio de tratamiento de las sustancias, que cambiarán radicalmente la tecnología de las industrias modernas.

# Trabajos de laboratorio

## 1. Determinación de la aceleración de caída libre por medio de un péndulo

APARATOS Y MATERIALES: una bolita taladrada, hilo, un soporte con sujetador y anillo, un reloj con segundero y una cinta métrica.

*Indicaciones sobre cómo hacer el trabajo*

1. Colocar el soporte sobre la mesa, junto a su borde. Fijar el anillo con el sujetador en el extremo superior del soporte y colgar de aquél la bolita suspendida del hilo. Ésta debe quedar a 1 ó 2 cm de distancia del suelo.
2. Hacer que el péndulo oscile, desviando la bolita hacia un lado de 5 a 8 cm y soltándola.
3. Contar el número  $n$  de periodos que realiza durante un tiempo  $t$  igual a 1 ó 1,5 min.
4. Medir con la cinta métrica la longitud  $l$  del péndulo.
5. Aplicando la fórmula del período de las oscilaciones del péndulo

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

calcular la aceleración de caída libre  $g$ .

6. Apreciar el error.

## 2. Determinación del índice de refracción del vidrio, valiéndose de una lámina de caras plano-paralelas

APARATOS Y MATERIALES: una lámpara de pie, una batería de acumuladores, un interruptor, una lámina de vidrio con dos caras planas y paralelas, una pantalla con rendija, una escuadra, un transportador, papel blanco y conductores de conexión.

*Indicaciones sobre cómo realizar el trabajo*

1. Montar el circuito eléctrico, conectando la lámpara con la batería a través del interruptor.
2. Colocar delante de la lámpara la pantalla con rendija y detrás de ésta la hoja de papel blanco.
3. Cerrar el circuito y obtener una estrecha franja de luz brillante (rayo de luz) sobre el papel.
4. Colocar transversalmente a la franja de luz la lámina de vidrio.
5. Dibujar con lápiz sobre el papel unas rayas a lo largo de las caras refractoras e indicar el principio  $A$  y el fin  $B$  del rayo incidente y el punto  $C$  de emergencia del rayo de la lámina de vidrio (fig. 259).
6. Abrir el circuito y quitar la lámina.

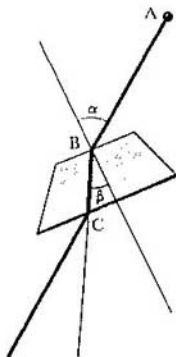


Fig. 259

7. Dibujar los rayos incidente y refractado y la perpendicular a la lámina en el punto de incidencia.
8. Medir los ángulos de incidencia  $\alpha$  y de refracción  $\beta$  con el transportador.
9. Calcular el índice de refracción por la fórmula

$$n = \frac{\text{sen } \alpha}{\text{sen } \beta}.$$

10. Repetir el experimento con otros ángulos de incidencia y comparar los resultados.

### 3. Determinación de la distancia focal y la potencia óptica de una lente convergente

APARATOS Y MATERIALES: una lámpara de pie, una batería de acumuladores, un interruptor, una cinta métrica, una lente convergente de foco largo, una pantalla blanca con rendija, una regla guía y conductores de conexión.

*Indicaciones sobre cómo hacer el trabajo*

1. Montar el circuito eléctrico, conectando la lámpara con la batería a través del interruptor.
2. Colocar la lámpara junto a un borde de la mesa y la pantalla junto al borde opuesto. Entre ellas situar la lente.
3. Encender la lámpara y correr la lente a lo largo de la regla hasta conseguir que sobre la pantalla se forme una imagen clara del filamento luminoso de la lámpara.
4. Medir la distancia desde la lámpara hasta la lente y desde ésta hasta la pantalla.
5. Aplicando la fórmula de la lente delgada

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f} + \frac{1}{d},$$

calcular la distancia focal  $F$  de la lente y su potencia óptica  $D$ .

6. Colocar la lámpara a una distancia arbitraria  $d_1$  de la lente.

7. Conociendo la distancia focal  $F$ , calcular por la fórmula

$$f_1 = \frac{d_1 F}{d_1 - F}$$

la distancia  $f_1$  a que debe encontrarse la imagen.

8. Comprobar experimentalmente el resultado obtenido.

9. Repetir este último experimento colocando la lámpara a la distancia  $d_2 = 2F$  de la lente.

## 4. Observación de la interferencia y la difracción de la luz

APARATOS Y MATERIALES: 2 láminas de vidrio, una lámpara con filamento de incandescencia recto (una para toda la clase), un

pie de rey.

*Indicaciones sobre cómo hacer el trabajo*

PARA OBSERVAR LA INTERFERENCIA

1. Limpiar bien las láminas de vidrio, juntarlas y apretarlas con los dedos.

2. Observar las láminas a la luz refleja sobre fondo oscuro (deben colocarse de tal forma que sobre la superficie del vidrio no se originen reflejos demasiado brillantes de las ventanas o de las paredes blancas).

3. En determinados puntos de contacto de las láminas observar las franjas irisadas brillantes de forma anular o irregular.

4. Observar cómo varía la forma y la posición de las franjas de interferencia obtenidas al cambiar la fuerza con que se aprietan las láminas.

5. Procurar ver la figura de interferencia a la luz transmitida.

PARA OBSERVAR LA DIFRACCIÓN

1. Regular la boca del pie de rey de forma que entre sus picos quede una rendija de 0,5 mm de anchura.

2. Colocar esta rendija verticalmente lo más cerca posible del ojo.

3. Mirando a través de ella el filamento luminoso de la lámpara, colocado también verticalmente, observar a ambos lados de él las franjas irisadas (espectros de difracción).

4. Variando la anchura de la rendija desde 0,5 mm hasta 0,8 mm, apreciar cómo influye esto en los espectros de difracción.

## 5. Observación de los espectros continuo y de rayas

APARATOS Y MATERIALES: un aparato de proyección, tubos de vidrio con hidrógeno, neón o helio, un inductor de alto voltaje, una batería de acumuladores, un soporte, conductores de conexión (todos estos aparatos son comunes para toda la clase), una placa de vidrio con caras oblicuas que formen 45° y 60° (una para cada alumno).

*Indicaciones sobre cómo hacer el trabajo*

1. Colocar la placa de vidrio horizontalmente delante del ojo. Observar a través de las caras que forman el ángulo de 45° la franja vertical clara que en



la pantalla reproduce la imagen de la rendija regulable del aparato de proyección.

2. Destacar los colores fundamentales del espectro continuo obtenido y escribirlos en el orden en que se observan.

3. Repetir el experimento mirando la franja a través de la cara que forma el ángulo de  $60^\circ$ . Escribir la diferencia de forma de los espectros.

4. Observar los espectros de rayas del hidrógeno, helio o neón, mirando los tubos espectrales luminosos a través de las caras de la placa de vidrio. Anotar las rayas más brillantes de los espectros.

## 6. Estudio de las trayectorias de las partículas cargadas por sus fotografías

APARATOS Y MATERIALES: fotografía de las trayectorias (fig. 260), una hoja de papel transparente (papel de calco), una escuadra graduada en milímetros y un lápiz.

*Indicaciones sobre cómo hacer el trabajo*

En la foto se ven las trayectorias de las partículas en una cámara de niebla sometida a un campo magnético (*I* es la trayectoria del protón)<sup>1)</sup>. Las líneas de inducción del campo magnético son perpendiculares al plano de la fotografía. Las velocidades iniciales de ambas partículas son iguales y perpendiculares al borde de la foto.

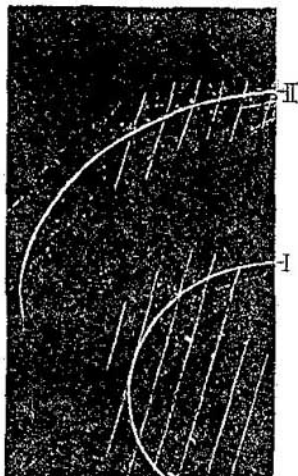


Fig. 260

<sup>1)</sup> Las rectas delgadas son los alambritos metálicos a los cuales se comunica la tensión para limpiar la cámara de iones antes de comenzar la observación de las trayectorias.

1. Determinar la dirección (sentido) del vector inducción del campo magnético.

2. Explicar por qué las partes de las trayectorias de las partículas son arcos de circunferencias.

3. Explicar por qué en diferentes partes de una misma trayectoria los radios de los arcos son distintos.

4. Explicar qué diferencia hay entre las dos trayectorias de la foto. ¿A qué se debe esta diferencia?

5. Colocar sobre la fotografía la hoja de papel transparente y copiar en ella con cuidado la trayectoria I y el borde derecho de la foto.

6. Determinar el radio de curvatura de la trayectoria en su parte inicial. Para eso hay que dibujar la cuerda de dicha parte inicial y levantar por su centro una perpendicular. Hallar el centro del arco de circunferencia y medir el radio.

7. Determinar lo mismo para la trayectoria II.

8. Utilizando la fórmula (véase el libro "Física 3")

$$\frac{q}{m} = \frac{v}{BR},$$

comparar las cargas específicas<sup>2)</sup> de ambas partículas.

9. ¿A qué partícula pertenece la trayectoria II?

---

<sup>2)</sup> La carga específica de una partícula es la razón  $q/m$  de la carga  $q$  a su masa  $m$ .

## Respuestas a los ejercicios

Ejercicio 1. 1.  $\approx 15,8 \text{ N/m}$ . 2.  $\approx 20 \text{ s}$ . 3.  $9 \text{ cm}$ ;  $25 \text{ cm}$ . 4. Aumenta 2,4 veces. 5. La segunda bolita. 6.  $0,4 \text{ m}$ . 7.  $\approx 31,4 \text{ cm/s}$ ;  $\approx -15,7 \text{ cm/s}$ . 8.  $\approx 9 \text{ rad/s}$ ;  $3,2 \cdot 10^{-3} \text{ J}$ ;  $\approx 17,9 \text{ cm/s}$ . 9.  $T = 2\pi\sqrt{R/g}$ . 10.  $19,2 \text{ km/h}$ . 11.  $0,1 \text{ m}$ .

Ejercicio 2. 1.  $5 \cdot 10^{-3} \text{ J}$ . 2.  $\approx 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ ;  $\approx 2,51 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ . 3. De  $16 \text{ mH}$  a  $10 \text{ mH}$ . 4.  $\approx 0,63 \text{ V}$ . 5.  $\approx 0,63 \text{ V}$ . 6.  $\approx 0,28 \text{ A}$ . 7.  $15 \mu\text{F}$ .

Ejercicio 3. 1. Los aislamientos entre las láminas deben ser perpendiculares al eje del árbol. 2. La f.e.m. será máxima cuando el plano del cuadro (espira) sea paralelo a las líneas de inducción magnética. 4. Se puede, por ejemplo, enrollar encima de uno de los arrollamientos un devanado adicional con número de espiras conocido y medir la tensión en sus extremos, suministrando al otro arrollamiento una tensión conocida. 5. El transformador puede quemarse, ya que la resistencia de su arrollamiento a la corriente continua es mucho menor que a la alterna. 6. La resistencia de una espira es muy pequeña. En la espira se produce una corriente inducida muy grande. La gran cantidad de calor que se desprende destruye el transformador. 7. 24 pares. 8.  $1/10$ ;  $22/7$ ;  $35/6$  y  $300/11$ .

Ejercicio 4. 1.  $660 \text{ m}$ . 2.  $\approx 5000 \text{ m/s}$ . 3.  $1435 \text{ m/s}$ . 4.  $180^\circ$ . 5. Aumenta 4,2 veces aproximadamente. 6.  $340 \text{ Hz}$ .

Ejercicio 5. 1. No, ya que en el sistema de referencia, con respecto al cual es nula la velocidad del movimiento ordenado de los electrones, los iones de la red se mueven y crean un campo magnético. 2. No. 3. Para longitudes de onda desde  $\lambda_1 \approx 92 \text{ m}$  hasta  $\lambda_2 \approx 565 \text{ m}$ . 4. Como la antena es horizontal, el vector intensidad del campo eléctrico también será horizontal. Por consiguiente, el vector inducción magnética será vertical. 5. En la Luna no hay ionosfera.

Ejercicio 6. 1. El haz luminoso no se verá. 2. El eclipse de Sol se verá como parcial: la Luna oculta una parte del disco solar. 3. Este fenómeno se debe a la propagación rectilínea de la luz a través del pequeño agujero del postigo de la ventana. 4. Las dimensiones de la penumbra dependen de la distancia desde el obstáculo opaco hasta la pantalla. Cuando la distancia es pequeña (pies) la penumbra es pequeña, y cuando es grande (cabeza) la penumbra es también grande. Si el farol fuera una fuente puntual de luz, las sombras de la cabeza y de los pies se verían igual de nítidas. 5. De  $1,2 \text{ m}$  a  $1 \text{ m}$ . 6. A la distancia de  $1,6 \text{ m}$  del foco  $I_1$ . No variará. 7.  $\approx 27 \text{ lx}$ ;  $\approx 25,6 \text{ lx}$ .

Ejercicio 7. 2.  $x = 2l \sin \alpha = 10$  cm. 4.  $l/2$ . El borde inferior del espejo debe distar del suelo la mitad de la distancia desde los ojos hasta el mismo. El borde superior debe encontrarse a una altura menor que la estatura de la persona en una magnitud igual a la mitad de la distancia desde los ojos hasta la coronilla. 5. El espejo plano proporciona una reflexión dirigida, por lo que cada espectador sólo verá una parte pequeña, intensamente iluminada, del fotograma.

Ejercicio 8. 1. 0,55; 1,24. 2. 1,4 cm. 3. Hacia el lado del vértice del ángulo refringente del prisma. 4. No saldrá. 5.  $n = 2$ .

Ejercicio 9. 1. 12 cm. 2. La imagen seguirá siendo igual de nítida, pero su iluminación disminuirá. 4. El índice de refracción del agua se aproxima mucho al de la sustancia de los ojos, por eso los rayos que llegan al ojo casi no se refractan y, por lo tanto, el ojo se hace muy hipermétrope. 7. 0,3 m. 8. 1) Divergente, virtual; 2) convergente, virtual. 10.  $\Gamma = 7$ . 11. A la distancia  $F/2$ . 13.  $-2,25$  dptr.

Ejercicio 10. 1.  $\approx k \cdot 528$  r.p.s. (donde  $k = 1, 2, 3, \dots$ ). 2.  $5,26 \cdot 10^{-7}$  m; 225 200 km/s;  $2,98 \cdot 10^7$  m; 223 200 km/s. 3. La mancha será brillante. 4.  $\approx 5,2 \cdot 10^{-7}$  m.

Ejercicio 11. 1. Desde el punto de vista del observador que está en tierra, en el punto B (detrás del tren) el rayo cayó antes. 2. La velocidad del electrón es 10 cm/s menor que la de la luz, aproximadamente. 3.  $\approx 0,23 \cdot 10^{-11}$  kg.

Ejercicio 12. 2.  $\approx 1,5$  3.  $4 \cdot 10^{-19}$  J. 4.  $\approx 2,5 \cdot 10^{-7}$  m. 5.  $\approx 5 \cdot 10^{14}$  Hz. 6.  $\approx 3,8 \cdot 10^{-19}$  J. 7.  $\approx 1,325 \cdot 10^{-27}$  kg·m/s.

Ejercicio 13. 1.  $r_k/r_n = 25$ ;  $E_k/E_n = 1/25$ . 2.  $\approx 2 \cdot 10^6$  m/s;  $\approx 10^{23}$  m/s<sup>2</sup>. 3.  $\approx 6,9 \cdot 10^{-14}$  m. 5.  $\approx 4,87 \cdot 10^{-7}$  m. 7.  $\approx 3,65 \cdot 10^{-7}$  m.

Ejercicio 14. 1. Ocho transformaciones  $\alpha$  y seis transformaciones  $\beta$ . 2.  $\approx 2240$  años. 3. 1,41 veces. 4.  $\approx 1,72$  MeV. 5.  $\approx 200$  MeV.

# Índice alfabético de nombres y materias

- Acomodación del ojo 183  
Altura del sonido 106  
Amplitud 21  
Análisis espectral 243-245  
Ángulo límite de reflexión total 167  
Ángulo visual 183  
Anillos de Newton 199  
Antipartícula 328  
Aparato espectral 239, 240  
*Artimónich, L. A.* 317  
Átomos marcados (trazadores) 320  
Aumento de una lente, angular 185  
    , lineal 179  
Autooscilaciones 37, 38, 70
- Básov, N. G.* 279  
*Baldin, A. M.* 327  
*Balmer, J.* 275  
*Becquerel, A. A.* 289-291  
*Bohr, N.* 268-271
- Cámara de burbujas 288  
    - niebla 287  
Capacitancia 60  
Célula fotoeléctrica 260  
Cinescopio 142  
Circuito oscilante 47  
    -- abierto 125  
Comunicación radiofónica 131  
Constante de Planck 252  
Contador de Geiger 286  
Cuanto 252
- Chadwick, J.* 268, 301  
*Cherenkov, P. A.* 238
- Defectoscopia de rayos X 249  
Desintegración del neutrón 331  
Detección 134  
Deuterio 299  
Diferencia de fase 26  
Difracción de la luz 207  
    -- las ondas 115, 116  
    -- los rayos X 248  
Dispersión de la luz 195, 196, 199  
*Dirack, P.* 328  
Distancia focal 175  
Dosis de radiación 322
- Efecto fotoeléctrico 254-258  
*Einstein, A.* 223, 234, 257
- Eje óptico principal 172  
    -- secundario 172, 178  
Energía de enlace 304  
    --- específica 304  
    -- ionización 275  
    - en reposo 235  
Espectro 196  
    - continuo 241  
    - de bandas 243  
    -- rayas 242  
Experimento de Fizeau 192  
    -- Hertz 127  
        , Michelson 222  
    -- Rutherford 267, 291  
    -- Young 207  
Experimentos de Franck y Hertz 276
- Fabrikant, V. A.* 279  
Factor de multiplicación neutrónica 311, 313  
Fase de las oscilaciones 25  
*Fermi, E.* 307, 314  
Figura de difracción 209  
    -- interferencia 112  
*Fizeau, H. L.* 192  
*Flerov, G. N.* 310  
Flujo luminoso 151  
Foco principal 174  
Fórmula de la lente delgada 178  
    -- Thomson 51  
Fotones 258, 259  
Fotorrelé 260  
Fotosíntesis 263  
*Franck, J.* 276  
Frecuencia angular (cíclica) 23  
    - de las oscilaciones 23  
    -- portadora 132  
    -- propia (natural) 23  
*Fresnel, A.* 116, 208  
*Frisch, O.* 308  
Fuente puntual de luz 152  
Fuerzas nucleares 303
- Gell-Mann, M.* 333  
Generadores de inducción 78  
*Glaser, v.* 288  
Guía de luz 168
- Hahn, C.* 308  
*Heisenberg, W.* 302  
*Hertz, G.* 276

- Hertz, H. 124, 216, 222, 254  
 Hipótesis de Maxwell 120  
 - Pauli 330  
 - Planck 253  
 Huygens, Ch. 24, 113, 114
- Iconoscopio 142  
 Iluminación 153  
 Imagen real 173  
 - virtual 159, 173, 178  
 Índice de refracción de la luz 164, 195  
 Intensidad de la corriente, amplitud 56  
 ----, valor eficaz 58  
 ----, instantáneo 56  
 - luz 153  
 - del sonido 106  
 Interacción electromagnética 122  
 - fuerte 303  
 Interferencia de la luz 197  
 -- ondas 109, 110  
 Isótopos 298, 299  
 Ivanenko, D. D. 302
- Joliot-Curie, F. 301  
 Joliot-Curie, I. 301
- Kapitsa, P. L. 268, 288  
 Kurchatov, I. L. 315
- Láseres 279-282  
 Lane, M. 248  
 Lebedev, P. N. 262  
 Lenin, V. I. 89, 327  
 Lente 171  
 - convergente 173  
 - delgada 172  
 - divergente 175  
 Leontovich, M. A. 317  
 Leptones 333  
 Ley de composición de las velocidades,  
 relativista 228  
 -- desplazamiento 295, 296  
 -- la desintegración radiactiva 296-298  
 -- propagación rectilínea de la luz  
 150  
 ---- reflexión de la luz 158  
 ---- las ondas 114  
 ---- refracción de la luz 162, 193  
 Leyes del efecto fotoeléctrico 254-256  
 Longitud de onda 97  
 --- luminosa 200  
 Lorentz, H. 222  
 Luminiscencia 237-239  
 Lupa 185  
 Luz monocromática 239  
 - natural 214  
 - planopolarizada 215
- Mandelshtam, L. I. 132  
 Marconi, G. 131  
 Masa crítica 313  
 - en reposo 235  
 Maxwell, J. C. 119, 147, 216, 221, 252  
 Meitner, Lise 308  
 Mesones 333  
 Microscopio 185, 186  
 Michelson, A. A. 193, 218, 222  
 Mijáilov, A. A. 25  
 Misovski, L. V. 289  
 Modelo de átomo de Bohr 273-275  
 ---- Thomson 267  
 --- planetario 268  
 - nuclear de la gota de líquido 309  
 - protones y neutrones 302, 303  
 Modulación 132, 133  
 Morley, E. 223
- Neutrino 327, 330, 331  
 Neutrón 301, 302, 330  
 Núcleo atómico 269, 285  
 Nucleones 303
- Ondas coherentes 112, 198  
 - longitudinales 93  
 - transversales 93  
 Oscilaciones amortiguadas 30  
 - armónicas 21, 52  
 - forzadas 31, 45  
 - libres 13, 46  
 Oscilador de Hertz 125  
 -- lámpara 70
- Par electrón-positrón 328  
 Partículas elementales 285, 326  
 Partículas subelementales 327  
 Pauli, W. 330  
 Péndulo simple (matemático) 17  
 Período de las oscilaciones 23  
 -- semidesintegración 296  
 -- una red de difracción 211  
 Petzchak, K. A. 310  
 Planck, M. 253  
 Plano focal 175, 178  
 Polarización de la luz 212-215  
 Polaroides 215  
 Popov, A. S. 129-131  
 Positrón 328  
 Postulados de Bohr 271-273  
 -- la teoría de la relatividad 223  
 Potencia óptica de una lente 175  
 Presión de la luz 261  
 Principio de Huygens 113  
 - la relatividad 223  
 Prágorov, A. M. 279

## Quarks (cuarques) 333

Radiación inducida 279

-- infrarroja 245

-- ultravioleta 245

Radiactividad 289

Radiocomunicación 131

Radiolocalización 139

Rayo 99

Rayos alfa 291-293

-- beta 291-293

-- gamma 291-293

-- X 246-249

Reacciones nucleares 306

-- en cadena 310

  termonucleares 315

Reactancia inductiva 63

Reactor nuclear 312-315

Red de difracción 211

Reflexión de la luz 158

--- total 166 168

Refracción de la luz 162

Regla de enantización 274

Relación de transformación 82

-- entre la masa y la energía 233

Relatividad de la simultaneidad 225

-- las distancias 227

-- los intervalos de tiempo 227

Resistencia eléctrica, óhmica 56

Resonancia 32, 34, 65

Roemer, O. 191

Roentgen, W. K. 247

Rutherford, E. 267-271, 291

Sincrofasotrópico 231

Skłodowska-Curie, Marie 290

Skobeltsin, D. V. 288

Soddy, F. 294, 298

Sonar (hidrolocalizador) 108

Stoltétov, A. G. 255

Strassmann, F. 308

Superficie de onda 99

Televisión 141

Teoría de la luz, corpuscular 146

----, ondulatoria 146

--- relatividad 221

-- del efecto fotoeléctrico 256-258

Thomson, J. J. 267

Timiriázev, K. A. 263

Townes, Ch. 279

Trabajo de extracción (o salida) 257

Transformador 81

Triodo 68

Tritio 299

Tubo de rayos X 249

Ultrasonido 107

Umbral rojo fotoeléctrico 257

Umov, N. A. 94

Usaguin, I. F. 81

Vavilov, S. I. 239, 259

Velocidad de la luz 191-193

-- onda 97

-- del sonido 103

Viodeoseñal (señal de imagen) 142

Yáblochkov, P. N. 81

Young, T. 198, 207

Zhdánov, A. P. 289

Zweig, S. 333