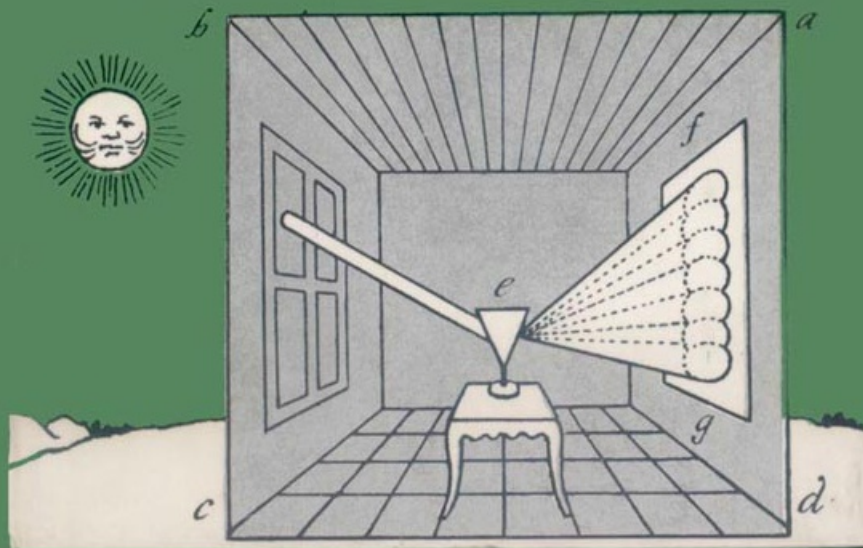


Física para Todos Libro 4

A. I. Kitaigorodski

Fotones y Núcleos



Prefacio

Con este libro, el cuarto, de la Serie «Física para todos» terminamos el examen de los fundamentos de física.

¿Qué se entiende por esta palabra indefinida «fundamentos»? Ante todo se trata de las leyes principales sobre las que descansa todo el edificio de la física. Su cantidad no es muy grande, de modo que incluso podemos enumerarlas: Las leyes del movimiento de la mecánica clásica; las leyes de la termodinámica; las leyes contenidas en las ecuaciones de Maxwell que rigen las cargas, las corrientes y las ondas electromagnéticas; las leyes de la física cuántica y la teoría de la relatividad. Las leyes de la física, al igual que de todas las ciencias naturales, revisten carácter empírico. Llegamos a ellas por medio de la observación y experimentación. El experimento permite establecer una multitud de hechos primarios; la estructuración de la sustancia a partir de átomos y moléculas, el modelo nuclear del átomo, el aspecto corpuscular-ondulatorio de la materia... Tanto la cantidad de leyes principales, como la de hechos y conceptos básicos necesarios para su descripción no es muy grande, en todo caso, es reducida.

Durante los últimos decenios la física se extendió en tal medida que las personas que trabajan en sus diferentes ramas dejan de comprender unas a otras apenas la conversación rebasa los marcos de aquello que las vincula en una sola familia, o sea, rebasa los límites de las leyes y conceptos que forman la base de todos los apartados de la física. Algunos capítulos de la física se han entrelazado estrechamente con la técnica, con otras ramas de las ciencias naturales, con la medicina y hasta con las ciencias humanitarias. No es de extrañar que se hayan conformado como disciplinas independientes.

Es poco probable que alguien discuta que a la exposición de las ramas de la física aplicada debe preceder el examen de las principales leyes y los hechos de esta ciencia. Pero es igualmente evidente que los diferentes autores, en dependencia de su gusto individual y la estrecha especialidad, cada uno a su manera, seleccionarán y compondrán el material necesario para construir la base de la física. Y dejemos al lector que juzgue sobre una de las posibles variantes de exposición de estas bases. En los prólogos a los primeros fascículos ya hemos hablado sobre el círculo de

lectores de la serie «Física para Todos». Estos libros están destinados a los representantes de todas las profesiones los cuales desean recordar la física, formar una idea acerca de su estado, el influjo que ejerce sobre el progreso científico-técnico, así como su significado para la formación de la concepción materialista del mundo. Muchas páginas de la serie despertarán el interés de los maestros de la física, como así mismo de los alumnos que sienten afición a esta disciplina. Cabe pensar que los lectores a quienes «infunden pavor» las formulas algebraicas también encontrarán en estos libros algunas cosas interesantes para ellos.

Se sobrentiende que dicha serie de libros no prevé que alguien, valiéndose de la misma, estudie física. Para esta finalidad existen libros de texto.

Según el parecer del autor, el libro «Fotones y núcleos» debe enseñar a los lectores como actúan las leyes del campo electromagnético y de la física cuántica al analizar el comportamiento de las ondas electromagnéticas de diferente longitud. Antes de pasar a la conversación sobre los núcleos atómicos, el lector se enterará de las nociones de la mecánica ondulatoria y de la teoría especial de la relatividad. Y después de exponer los principales hechos referentes a la estructura del núcleo atómico abordaremos el tema, que inquieta la humanidad, acerca de las fuentes de energía en la Tierra. Finalmente, consumaremos nuestra narración con un breve relato sobre la Universo. El pequeño volumen del libro no da la posibilidad de detenernos en muchos temas tradicionales. Lo viejo se vio obligado a ceder su puesto a lo nuevo.

A. I. Kitaigorodski

Capítulo 1

Radiación electromagnética blanda

Contenido:

- *Intercambio de energía por medio de radiación*
- *Radiación de los cuerpos incandescentes*
- *Teoría de la radiación térmica*
- *Espectros ópticos*
- *Radiación de los láseres*
- *Luminiscencia*

Intercambio de energía por medio de radiación

Denominamos blanda aquella radiación electromagnética cuyas longitudes de ondas se encuentran, de una forma aproximada, en el intervalo desde 0.1 hasta 100 μm . En este caso, tenemos que estipular una cosa más. Hablando sobre la radiación blanda tendremos en cuenta las ondas electromagnéticas que se originan no debido a los procedimientos radiotécnicos. Esta estipulación es necesaria por cuanto empleando métodos puramente radiotécnicos es posible «irrumper» en el campo de la radiación blanda.

Con bastante frecuencia la radiación blanda se denomina también lumínica. Al hacer uso de este término, no se debe olvidar que la luz visible ocupa solamente un intervalo estrecho de longitudes de ondas, que para el ojo humano «medio» se encuentra dentro de los límites de 380 a 780 nm (0.38 a 0,78 μm).

Si utilizamos en adelante el término «luz» será tan sólo en el amplio sentido de la palabra, puesto que las leyes válidas para la porción visible del espectro también son ciertas para todos los demás representantes de la radiación blanda.

Cabe recordar también que la radiación con longitudes de onda más cortas que las de la luz visible, lleva el nombre de ultravioleta, y la con longitudes de onda más larga se llama infrarroja.

Ahora podemos pasar al tema del párrafo.

Como ya conocemos, existen tres métodos de intercambio de calor. Los correspondientes fenómenos llevan el nombre de conductibilidad térmica, de convección térmica y de radiación térmica. Para investigar el intercambio de energía que tiene lugar a costa de radiación térmica conviene observar cómo se comportan los cuerpos que se encuentran en el vacío (la convección se excluye) a cierta distancia unos de otros (se excluye la conductibilidad térmica o conducción de calor).

La experiencia demuestra que si dos o muchos cuerpos forman un sistema cerrado (el lector recordará que esta circunstancia significa la ausencia de intercambio de energía con los objetos que no entran en el sistema), las temperaturas de estos cuerpos se igualarán. Cada uno de los cuerpos del sistema simultáneamente hace las veces de radiador y de absorbedor. Transcurre un sinnúmero de actos de transición de los átomos y moléculas desde el nivel más alto hacia otro, bajo (en este caso se emite el fotón correspondiente), y del nivel más bajo al superior (el fotón se absorbe). En el intercambio de energía toman parte fotones de todas las energías o, lo que es lo mismo, ondas electromagnéticas de todas las longitudes.

Claro está que el cuerpo no absorbe toda la energía que en éste incide. Puede haber cuerpos que en mayor medida disipan o dejan pasar a través de ellos tales o cuales rayos. Pero semejante circunstancia no cambia el resultado final: el equilibrio térmico, de todos los modos, llega, tarde o temprano.

La condición de equilibrio térmico requiere que la relación entre la energía de absorción y la energía de emisión de la onda de una longitud determinada sea igual para todos los cuerpos. Este teorema lo demostró rigurosamente, en 1860, el físico alemán Gustavo Kirchhoff (1824 - 1887). Para las temperaturas diferentes la relación puede variar, pero si la temperatura está prefijada la relación será la misma para los fotones de energía dada.

El teorema resulta ser lo suficientemente claro. Se puede decir que ni siquiera necesita una demostración. El sentido de la ley consiste en que el número de fotones absorbidos de la clase dada (es decir, de la energía dada) para el equilibrio térmico es igual al número de fotones emitidos de la misma clase.

De aquí se infiere la siguiente regla: si el objeto absorbe intensamente cualesquiera rayos, entonces, irradia enérgicamente los mismos rayos.

Dicha regla ayuda a predecir las condiciones en que se establece el equilibrio térmico. ¿Por qué bajo la acción de los rayos solares se calentará poco el agua vertida en una botella con paredes plateadas, mientras que el agua encerrada en un frasco de vidrio negro se calentará fuertemente? La explicación es evidente; un cuerpo de color negro absorbe con intensidad los rayos, su energía se invertirá en el aumento de la temperatura y el equilibrio térmico se establecerá después de un fuerte calentamiento. En cambio, la superficie plateada es un magnífico reflector. El objeto absorbe poca energía, el calentamiento se desarrollará tan sólo a ritmo lento y el equilibrio se establecerá a una temperatura baja.

Y ahora, por decirlo así, «invierta» el experimento. Llene los dos frascos de agua caliente y métalos en el refrigerador. ¿En qué caso el enfriamiento será más rápido? Al calentamiento más rápido le corresponderá el más rápido enfriamiento. Cuando se absorbe más energía, mayor cantidad de ésta se entrega.

Son muy impresionantes los experimentos con la cerámica en color. Si el objeto es de color verde, esto significa que el casco absorbe todos los colores excepto el verde. Es que el ojo percibe aquellos rayos luminosos que se reflejan o se disipan por la sustancia. Ahora calentemos el casco hasta incandescencia. ¿Cómo lo veremos? La respuesta va está en la punta de su lengua: el casco se nos presentará de color violado ya que el violado es el color complementario a verde-amarillo. Se dice de un color que es complementario a tal o cual, si mezclados estos colores dan el blanco.

El término «Colores complementarios» lo introdujo en la ciencia todavía Newton cuando valiéndose de prisma de vidrio descompuso el color blanco en espectro.

Radiación de los cuerpos incandescentes

Se conoce bien que un trozo de metal sometido al calentamiento se pone incandescente, primero al rojo y, luego, al blanco. La mayoría de sustancias químicas no se logra caldear. Estas ya sea que se funden, o bien, se descomponen. De este modo, todo lo que exponemos a continuación se refiere, principalmente, a los metales.

La circunstancia más admirable reside en que el espectro de radiación de todos los cuerpos caldeados es poco específico. La cosa consiste en lo siguiente. De la ley

principal acerca de los niveles de energía queda claro que el espectro de radiación y el espectro de absorción del cuerpo deben coincidir. Los metales no son transparentes para toda la zona del espectro de la radiación blanda. De aquí se infiere que también deben irradiar fotones de todas las energías.

También podemos expresarnos de otra forma: el espectro continuo se origina debido a que en un sistema poliatómico, los niveles de energía de los átomos se confundieron en bandas que se recubren. En un sistema de esta índole son posibles cualesquiera transiciones de energía, o sea, cualquier diferencia de energía de los niveles m -ésimo y n -ésimo $E_m - E_n$, y, por consiguiente, también cualesquiera frecuencias de radiación y absorción. En la fig. 1.1 se representa el aspecto que tiene el espectro de un cuerpo incandescente para varias temperaturas (hemos dado las curvas teóricas válidas para el llamado cuerpo negro).

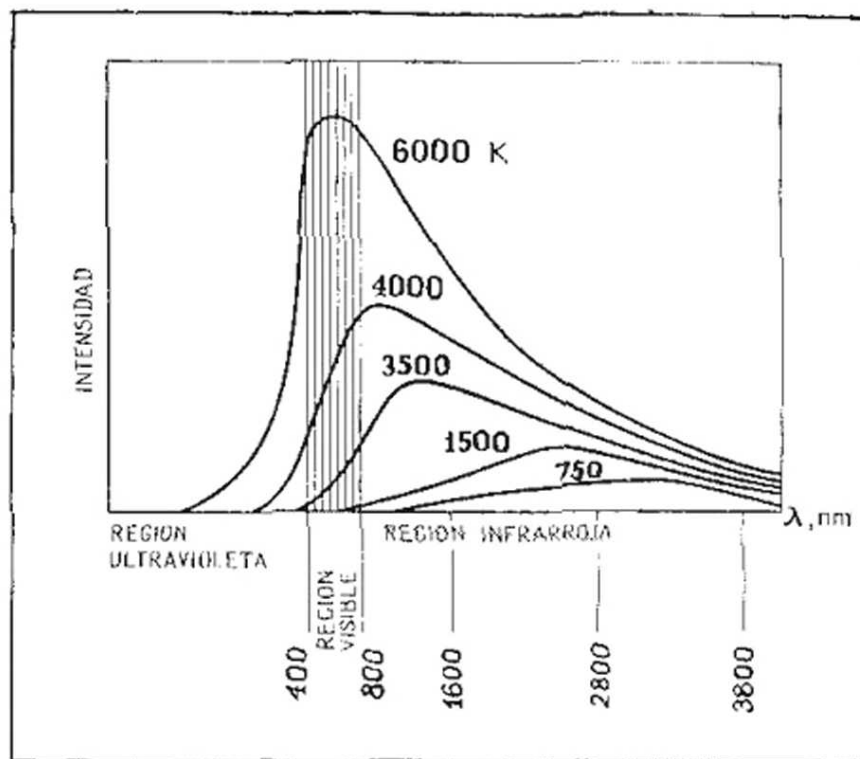


Figura 1.1

Hay que señalar que la deducción teórica de la forma de esta curva hecha por Planck en 1900 fue el primer paso en el proceso de institución de la física cuántica.

Para obtener la coincidencia entre la teoría y el experimento Planck tuvo que admitir que la radiación y la absorción de la luz se producen por porciones. Planck no se decidió a hacer el siguiente paso, precisamente, a afirmar que es completamente lícito hablar sobre las partículas de luz, o sea, fotones. Este paso lo hizo Einstein en 1905.

Y solamente en el año 1913 Bohr introdujo el concepto sobre la cuantificación de la energía.



Max Planck (1858-1947), relevante científico alemán que colocó los cimientos de la teoría cuántica. Al tratar de hallar la expresión matemática que describiera correctamente la distribución espectral de la radiación del cuerpo negro, Planck mostró que semejante formula podía obtenerse introduciendo en la teoría el “cuanto de acción”. Planck conjeturó que el cuerpo emite energía por porciones iguales al producto de cierta constante, que más tarde recibió su nombre, por la frecuencia de la luz.

En cuanto a la teoría lógica y armoniosa de la radiación térmica, su formación debe remontarse al año 1926.

Al principio, discutiremos la forma de estas curvas, sólo después hablaremos sobre la teoría. En primer término prestemos atención a que, a medida que aumenta la temperatura, se acrecienta de modo rápido el área bajo la curva. ¿Qué sentido físico tiene el área barrida por la curva de radiación? Al construir el gráfico semejante al representado en la figura, se dice que por el eje de ordenadas está marcada la intensidad de la radiación para la longitud dada de onda. ¿Pero, qué significa «para una longitud dada de onda»: se tiene en cuenta, digamos, 453 nm o 453,2 nm? O bien, ¿puede ser que 453,257859987654 nm? Espero que para el lector esté claro que, al decir «para la longitud dada de onda» se trata de un intervalo pequeño de longitudes de onda. Por ejemplo, se ponen de acuerdo que éste será un intervalo igual a 0,01 nm. De aquí deriva que el sentido físico lo tiene no la ordenada, sino una columna de 0,01 nm de base. El área de esta columna es igual a la energía radiada por las ondas cuya longitud se halla, por ejemplo, en el intervalo desde 453,25 hasta 453,26 nm. Al dividir en semejantes columnas toda el área que abarca la curva y sumar sus áreas, obtendremos la intensidad total de todo el espectro. En este ejemplo he explicado la operación que los matemáticos denominan integración. De este modo, el área bajo la curva da la intensidad total de la radiación. Resulta que ésta es proporcional al cuarto grado de la temperatura.

En la figura, objeto de nuestra discusión, se ve que con el crecimiento de la temperatura cambia no sólo el área abarcada por la curva, sino también tiene lugar el desplazamiento de su máximo a la izquierda, es decir, a la región ultravioleta.

La relación entre la longitud de onda de la luz, en micrómetros, correspondiente a la radiación (absorción) más intensa y la temperatura, en Kelvin, se da por medio de la siguiente fórmula:

$$\lambda_{\text{máx}} = \frac{2886}{T}$$

A temperaturas bajas el máximo se encuentra en la región infrarroja. Precisamente debido a esta causa la radiación infrarroja se denomina, a veces, térmica. Un hecho

notable es el que disponemos de instrumentos capaces de «percibir» la radiación térmica emitida por los cuerpos cuya temperatura es ambiental o, incluso, inferior a esta. La técnica moderna sabe «ver» en plena oscuridad. La misma capacidad la poseen algunos animales. Aquí no hay nada extraño pues los rayos infrarrojos, de principio, acusan las mismas propiedades que los visibles.

En particular, no se debe olvidar que cualquier animal es fuente de radiación. A menudo se dice que se puede «sentir» en la oscuridad la presencia de una persona. No es cosa mística. Meramente, aquel que «siente» posee una percepción aguda de los rayos térmicos.

No puedo prescindir de contar al lector una interesante historieta que demuestra que los rayos térmicos deben tenerse en cuenta incluso en aquellas ocasiones en que como fuentes de los rayos térmicos figuran cuerpos no calentados, en la acepción cotidiana de esta palabra. Varios años atrás me pidieron que diese mi opinión acerca de los experimentos realizados por un hombre que se hacía pasar por «mago» capaz de retener el movimiento de un motor a fuerza de su voluntad. Mi misión consistía en hallar para estos experimentos (a los hechiceros del siglo XX les gusta recurrir a la terminología pseudocientífica dando a estos experimentos el nombre de telecinesia) una explicación racional.

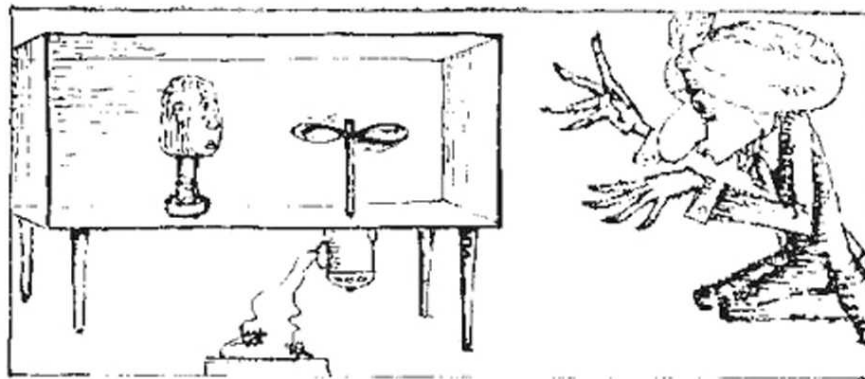


Figura 1.2

El esquema del experimento se ilustra en la fig. 1.2. En el árbol de un pequeño motor giraba una aleta y ésta, efectivamente, se paraba cuando el «mago» se sentaba al lado de la caja a la que salía este árbol. Pronto averigüé que cualquier

persona que se sentaba junto a la caja con el motor ejercía sobre la aleta el mismo influjo. No se paraba el motor como lo afirmaba el «mago», sino, precisamente, la aleta. De este modo, resultó evidente que a la fuerza de cohesión del árbol del motor con la aleta se opone cierta fuerza de otro tipo relacionada con la presencia del hombre.

Demostre que se puede hacer parar la aleta casi instantáneamente si a la pared de la caja se arrima una lámpara eléctrica. Quedó claro que el asunto reside en el calor que irradia el cuerpo humano. Dejé pasar a la caja un chorro de humo de tabaco con lo cual puse de manifiesto que dentro de la caja se engendraban flujos de aire debidos a la convección y dirigidos precisamente de tal modo que impedían la rotación de la aleta. Las mediciones precisas evidenciaron que en el lado de la caja vuelta al hombre se creaba una temperatura que superaba en un grado, aproximadamente, la del lado de la caja alejado del hombre.

Cada uno puede percibir los rayos infrarrojos que emana el cuerpo calentado hasta 60 o 70 °C, si acerca a este la palma de la mano. Por supuesto, hay que eliminar la convección térmica. El aire caliente sube, mientras que usted aproxima la palma de la mano desde abajo. En este caso se puede estar seguro de que ha percibido precisamente los rayos térmicos.

Antes de despedirnos de los rayos térmicos vamos a explicar por qué el paso desde la lámpara eléctrica de incandescencia con el filamento de carbón hacia la lámpara moderna con el filamento de wolframio resultó ser un gran progreso. El quid del asunto reside en que el filamento de carbón puede caldearse hasta la temperatura de 2100 K, mientras que el de wolframio, hasta 2500 K. ¿Cuál es la razón de que estos 400 K son tan importantes? Esta razón estriba en que la finalidad de una lámpara de incandescencia no es calentar, sino proporcionar luz. Por consiguiente hace falta lograr una situación tal que el máximo de la curva corresponda a la radiación visible. Como se ve del gráfico, sería ideal disponer de un filamento que soporte la temperatura de la superficie del Sol, o sea. 6000 K. Pero incluso el paso desde 2100 hacia 2500 K aumenta la parte de energía que recae en la radiación visible desde 0,5 hasta 1,6 %.

Teoría de la radiación térmica

Si el sistema de los cuerpos que irradian y absorben está cerrado, entonces, el «gas» de los fotones con cuya ayuda los cuerpos intercambian la energía, debe encontrarse en equilibrio con los átomos progenitores de estos fotones. El número de fotones con la energía $h\nu$ depende del hecho de cuántos átomos se encuentran en el nivel E_1 y cuántos en el nivel E_2 . Durante el equilibrio estos números son invariables.

Sin embargo, el equilibrio reviste carácter dinámico por cuanto se desarrollan, simultáneamente, tanto los procesos de excitación, como de radiación. De cierta manera, ya sea debido a la colisión con otra partícula, o bien, gracias a la absorción del fotón llegado desde fuera, el átomo o el sistema atómico se traslada a un nivel alto. En este estado de excitación, el sistema permanece cierto tiempo indefinido (que, habitualmente, se mide en fracciones de segundo), y luego, se retorna al nivel bajo. Dicho proceso lleva el nombre de radiación espontánea. El átomo se comporta como una bolita que se deja retener, con dificultad, en el vértice puntiagudo de una prominencia de perfil complejo: un soplo casi imperceptible, y el equilibrio resulta alterado. La bolita se desliza en un hoyo y, además, en la mayoría de los casos, en el más profundo, del cual esta puede sacarse tan sólo golpeándola fuertemente. Acerca del átomo que se deslizó al más bajo peldaño se dice que el mismo se encuentra en estado estable.

Cabe recordar, sin embargo, que, además de las posiciones «en el vértice» y «en el hoyo profundo» existe también una situación intermedia: la bolita puede encontrarse en un valle poco profundo de donde esta puede extraerse si no fuese con un soplo ligero, por lo menos, mediante un ligero empujón. Semejante posición se denomina *metaestable*. De este modo, además del nivel de excitación y el estable se da también un tercer tipo de nivel de energía, el metaestable.

Resumiendo, podemos decir que las transiciones tendrán lugar en ambos sentidos. Ora uno, ora otro átomo se trasladarán al nivel superior. Transcurrido un instante descenderán al nivel bajo emitiendo luz. Pero, al mismo tiempo, otros átomos recibirán energía, ascendiendo a los niveles superiores.

La ley de la conservación de la energía exige que el número de transiciones desde arriba abajo sea igual al de las transiciones desde abajo arriba. ¿Qué es lo que determina el número de transiciones hacia arriba? se trata de dos factores: en

primer término, es el número de átomos que se hallan en el piso inferior y, en segundo término, es el número de impactos que los harán ascender al piso superior. ¿Y el número de las transiciones hacia abajo? Este se determina, como es lógico, por el número de átomos ubicados en el piso superior y, al parecer, no depende de ningún otro factor. Precisamente, esta fue, al principio, la opinión de los físicos teóricos. No obstante, los cabos se les ataban mal. El número de transiciones hacia arriba dependiente de dos factores se acrecentaba con la temperatura mucho más rápidamente que el número de transiciones hacia abajo que dependía tan sólo de un factor. El modelo evidente, en apariencia, llevaba a un absurdo. Resultaba que, a la corta o a la larga, todos los átomos se empujarán al nivel superior: el sistema de átomos se encontrará en estado inestable y no habrá radiación.

Precisamente, esta deducción imposible la pesó Einstein en 1926 de las elucubraciones de sus predecesores. Por lo visto, cierta circunstancia más influía en las transiciones de los átomos desde el piso superior hacia el inferior. No había otro remedio, sino conjeturar que además de la transición espontánea al nivel bajo existía también una transición forzada.

¿Qué es la radiación forzada? he aquí de qué se trata. El sistema se halla en el nivel superior. Del nivel inferior lo separa la diferencia de energías $E_2 - E_1 = h\nu$. Resulta que si sobre el sistema incide un fotón de energía igual a $h\nu$, este obligará al sistema a pasar al nivel inferior. En este caso, el propio fotón incidente no se absorberá sino proseguirá su camino en la misma dirección acompañado de otro fotón, un fotón nuevo engendrado por el primero y completamente idéntico a éste.

No hace falta buscar lógica en esto razonamiento. Fue una revelación, una idea súbita... Y el experimento debe juzgar si es acertada. Valiéndose de la hipótesis acerca de la emisión forzada (estimulada) se consigue deducir una fórmula cuantitativa que da el gráfico de radiación en función de la longitud de onda para un cuerpo caliente. La teoría coincidía de un modo brillante con la experiencia y por esta razón justifica la hipótesis enunciada.

Es interesante que las conclusiones prácticas derivadas del hecho de existir la emisión estimulada y que llevaron al descubrimiento de los láseres, sólo se sacaron al cabo de muchos años.

Espectros ópticos

Hablando en general, cualquier cuerpo es fuente de radiación electromagnética blanca. Por medio de un espectrógrafo, o sea, de un instrumento cuya parte principal la constituye un prisma o una red de difracción, la luz se descompone en espectro. El espectro puede ser continuo, así como de bandas y de rayas. Los espectros de los cuerpos sólidos incandescentes se parecen muchísimo unos a otros. Además, tan sólo una cantidad pequeña de sustancias puede caldearse hasta luminosidad. Se sobrentiende que una cosa rara es un líquido incandescente. Una amplia información la deparan los espectros de radiación de los gases. Tales son los espectros de los rayos que llegan hacia la Tierra de las lejanas estrellas. Los rayos luminosos de materia sideral que se encuentra en estado gaseoso nos han suministrado importantísimos datos referentes a la estructura del Universo.

En las condiciones terrestres no es difícil crear espectros de radiación de los átomos. A los átomos se les obliga a emitir luz dejando pasar corriente a través del gas, o bien, calentando el gas. Cabe señalar que por medio de este método es posible estudiar únicamente los espectros de los átomos, pero no los espectros de las moléculas. Antes de que el gas se ponga luminiscente, las moléculas se desintegrarán en átomos. Esta es la razón de que si al investigador le interesan líquidos o sólidos, éste estudia los espectros de absorción. En fin de cuentas, el cuadro se determina por el sistema de niveles de energía. Las transiciones desde arriba abajo o desde abajo arriba portan datos idénticos. Hay que actuar de la forma más conveniente.

Los espectros constituidos por líneas nítidas aisladas pueden obtenerse tan sólo de un gas o de una solución diluida. En el libro 2 hemos hablado de que el comportamiento de las moléculas disueltas recuerda en muchos aspectos el de un gas. Esta tesis resulta válida también para la espectroscopia óptica. Lamentablemente, el disolvente ejerce su influencia en el carácter del espectro, pero, al comparar la forma de los espectros de las moléculas disueltas en diferentes sustancias se puede tomar en consideración dicha influencia, «sonsacando» del experimento la dactiloscopia de la molécula disuelta.

El hecho de obtener el espectro característico no significa, ni mucho menos, establecer el sistema de los niveles de energía de la molécula. No obstante, para

muchos fines prácticos esto tampoco se requiere. Si se dispone de un álbum en el cual se han recogido datos referentes a los espectros (es decir, la lista de líneas espectrales y de sus intensidades o las curvas de intensidad en función de la frecuencia) de cierta familia de sustancias químicas, entonces, tomando el espectro de la sustancia desconocida y comparando el cuadro obtenido en el experimento con los cuadros del álbum, reconocemos la sustancia de una manera completamente análoga a como por el dibujo de los surcos en el dedo se identifica un delincuente.

En los últimos tiempos el análisis espectral óptico ha obtenido un rival en la persona de radioespectroscopía. Los métodos radioespectroscópicos, por ahora (y este «por ahora», a todas luces, durará poco), son todavía inferiores a los ópticos en cuanto a su sensibilidad, pero, en cambio, superan enormemente los métodos ópticos por las posibilidades que brindan para la identificación y el análisis cuantitativo de las mezclas de sustancias.

En nuestra tarea no entra el conocimiento de los espectros concretos de las sustancias.

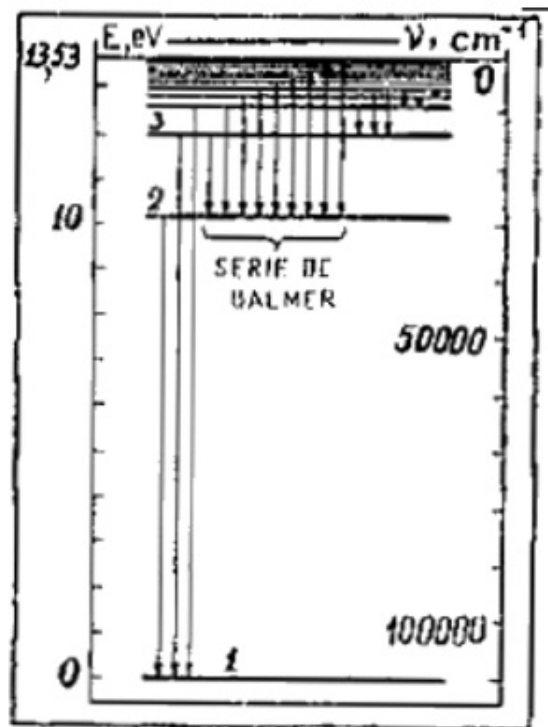


Figura 1.3

Es suficiente dar a conocer al lector el cuadro de los niveles de energía de los átomos de hidrógeno y el esquema de principio de los niveles de energía de una molécula libre.

En la fig. 1.3 está representado el sistema de los niveles de energía del hidrógeno. Quiero centrar su atención en la condensación característica de los niveles a medida que aumenta la distancia desde la raya cero.

A propósito» no conviene pensar que el cero designado en el esquema es un cero «auténtico». Se da por sentado que el átomo de hidrógeno no excitado posee una energía determinada. Pero, puesto que en los espectros se manifiestan las diferencias de energía, es cómodo realizar el cómputo desde la raya inferior.

Según sea la fuerza del «capirotazo» recibido el átomo puede subir a cualesquiera de los «pisos», permanecer un breve plazo en este estado no equilibrado y luego, mediante cualesquiera de las dos formas posibles (radiación espontánea o radiación estimulada) descender.

El espectro naciente conviene dividirlo en una sucesión de «series». Cada serie está subordinada a su nivel inferior. En la zona visible se encuentra la llamada serie de Balmer. La explicación de esta constituyó el primer triunfo de la teoría de la estructura atómica de Niels Bohr. No todas las transiciones de energía son equiprobables. Cuanto más alta es la probabilidad de la transición tanto más intensa es la línea correspondiente. También existen transiciones prohibidas.

Para los físicos teóricos resultó ser un éxito brillante el que supieron dilucidar de un modo exhaustivo, el espectro de los átomos de hidrógeno, resolviendo la célebre ecuación de la mecánica cuántica deducida en 1926 por Erwin Schrödinger.

Los campos externos influyen sobre los espectros atómicos. Las líneas se desdoblan en varias componentes por la acción del campo eléctrico (efecto Stark) y por la acción del campo magnético (efecto Zeeman). No nos proponemos explicar estos interesantes fenómenos. Advertiremos tan sólo que se logró comprender algunos de estos únicamente después de que Goudsmit y Uhlenbeck sugirieran que el electrón poseía, el espín. En el libro 3 ya hablamos cómo el espín se descubre directamente en los experimentos.

Y, por fin, la última observación concerniente al cuadro de los niveles de energía. Vemos que el límite a que se acercan los niveles se designa con el número 13,53. ¿Qué significa este número? Es la tensión de ionización. Si se multiplica la carga del electrón por la magnitud de esta tensión en voltios, obtendremos la magnitud del trabajo que se debe invertir para arrancar el electrón al núcleo, en otras palabras, para destruir el átomo de hidrógeno.



Niels Bohr (1885-1962), célebre físico danés, Creó el primer modelo cuántico del átomo, descubriendo de este modo la ley de la cuantificación de la energía. Participó activamente en la elaboración de los principios de la mecánica cuántica. Demostró la inaplicabilidad, de principio, al micromundo de los conceptos idóneos para describir el comportamiento de los cuerpos macroscópicos. Hizo una gran aportación a la teoría de la estructura del núcleo atómico

Los espectros de los átomos se engendran como resultado de transiciones electrónicas. Apenas pasamos de los átomos a la molécula, de inmediato, surge la

necesidad de tomar en consideración dos componentes más de energía. La molécula puede girar y los átomos de la molécula pueden realizar oscilaciones unos respecto a otros. Todos estos tipos de energía también se cuantifican, estos pueden tener solamente determinados valores discretos (discontinuos). De este modo, el estado energético de la molécula se define por el estado de su nube electrónica (nivel electrónico), el estado del movimiento oscilatorio (nivel vibracional) y el estado de rotación (nivel rotacional). Se debe operar con tres tipos de datos, por decirlo así, el número de la casa, del piso y del apartamento.

Pero, ¿qué desempeña el papel del piso y qué del apartamento? ¿Cuáles de los niveles de energía están separados por intervalos grandes y cuáles por pequeños?

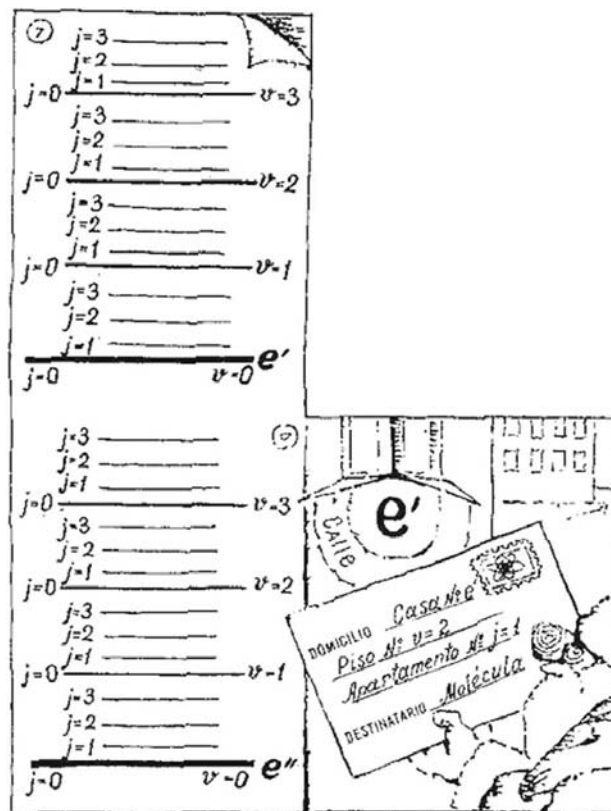


Figura 1.4

A estas preguntas contesta la fig. 1.4. En el esquema se muestran dos niveles electrónicos e' y e'' (números de las casas). Los pisos —los niveles vibracionales— están designados con la letra v , y los números de los apartamentos —niveles rotacionales— con la letra j . Es verdad que no está adoptada semejante numeración

de las casas. Como se sabe, se utiliza la numeración continua de los apartamentos, mientras que nosotros, al describir los espectros de la molécula, numeramos los apartamentos en cada piso comenzando por cero. Como ve el lector, los más pequeños son los intervalos entre los niveles rotacionales, y la mayor es la diferencia entre los niveles electrónicos (e' y e'').

Supongamos que para una molécula son posibles niveles electrónicos que se hallan a 100, 200, 300...unidades de energía; niveles vibracionales, a 10, 20, 30... unidades, y niveles rotacionales, a 1, 2, 3 ... unidades; entonces, una molécula que se encuentra en el segundo nivel electrónico, primer nivel vibracional y tercer nivel rotacional tendrá la energía de 213 unidades.

Así pues, la energía de la molécula puede prefijarse en forma

$$E = E_{el} + E_{vib} + E_{rot}$$

La frecuencia de la luz emitida o absorbida siempre corresponderá a la diferencia (signo Δ) de dos niveles, es decir,

$$\nu = \frac{1}{h} (\Delta E_{el} + \Delta E_{vib} + \Delta E_{rot})$$

Quisiera destacar aquellas transiciones en las cuales varía tan sólo una «especie» de energía. En la práctica, esto es posible sólo para las transiciones de rotación, y comprenderemos con facilidad el motivo de ello.

Comencemos a investigar la absorción de las ondas electromagnéticas por un grupo de moléculas desde las ondas más largas, es decir, desde porciones pequeñas de energía $h\nu$. La molécula no absorberá hasta que la magnitud del cuanto de energía se haga igual a la distancia entre dos niveles más cercanos. Aumentando paulatinamente la frecuencia llegaremos hasta los cuantos capaces de elevar la molécula de un peldaño «rotacional» al otro. Como demuestra la experiencia esto tendrá lugar en la zona de microondas (el límite de la banda de radiofrecuencias), o bien, expresándolo de otra forma, en la región del espectro infrarrojo lejano. Las

longitudes de ondas del orden de 0.1 a 1 mm se absorberán por las moléculas. Aparecerá un espectro netamente rotacional.

Nuevos fenómenos se originarán cuando hagamos incidir sobre la sustancia una radiación poseedora de cuantos de energía suficientes para trasladar la molécula de un nivel vibracional al otro. Sin embargo, nunca obtendremos un espectro puramente vibracional, o sea, una serie de transiciones tal en que se conserve el número del nivel rotacional. Por el contrario, las transiciones de un nivel vibracional al otro afectarán diferentes niveles rotacionales. Digamos, la transición del nivel vibracional cero (el inferior) al primero puede consistir en la subida desde el tercer nivel rotacional hacia el segundo, o desde el segundo hacia el primero, etc. De este modo se producirá el espectro vibracional-rotacional. Lo observaremos en la luz infrarroja (de 3 a 5 μm). Todas las transiciones desde un nivel vibracional hacia el otro se diferenciarán poco en lo que respecta a su energía y darán en el espectro un grupo de líneas muy próximas. Para una resolución pequeña, estas líneas se confundirán en una banda. Cada banda corresponde a una transición vibracional determinada.

Iremos a parar a una nueva región espectral, la de luz visible, cuando la energía del cuanto se haga suficiente para trasladar la molécula de un nivel electrónico al otro. Se sobreentiende que tampoco aquí son posibles tanto las transiciones puramente electrónicas, como las electrónico-vibacionales. Se originarán transiciones complejas en las cuales la transición energética viene acompañada de «mudanza» tanto de la «casa», como del «piso» y del «apartamento». Como quiera que la transición vibracional-rotacional representa una banda, resulta que el espectro de la región visible será prácticamente continuo.

Los espectros característicos de los átomos y de las moléculas durante largos años han desempeñado (y siguen desempeñando hoy en día) el modesto papel de ayudantes cuando se trataba de la determinación de la estructura química y la composición de las sustancias. Sólo hace muy poco, en la esfera de espectroscopía, se han desarrollado acontecimientos revolucionarios.

Radiación de los láseres

Los primeros treinta años de nuestro siglo transcurrieron bajo el signo de éxitos fantásticos de la física teórica. Durante estos años se descubrieron las leyes tan importantes de la naturaleza como las de la mecánica de las grandes velocidades, las de la estructura del núcleo atómico y las de la mecánica cuántica. Las cuatro décadas que siguieron a esos años demostraron éxitos no menos fenomenales en el campo de aplicación de la teoría a la práctica. En el curso de esos años la humanidad aprendió a sacar energía de los núcleos atómicos, obtuvo para su disposición los transistores semiconductores, hecho que dio lugar a un cambio radical en la radiotecnica y condujo a la creación de las máquinas electrónicas, calculadoras, y dominó la técnica del láser. Estas tres aplicaciones, hablando con propiedad, redundaron en los eventos que recibieron el nombre de revolución científico-técnica.

En este párrafo hablaremos de los láseres. Vamos a recapacitar sobre las circunstancias que no nos permiten, al obrar empleando métodos tradicionales, crear un intenso haz dirigido de luz.

La luz más potente acumulada en un haz estrecho hasta el límite, diverge y pierde su intensidad con la distancia. Y tan sólo en la novela de ciencia ficción de Alexei Tolstoi el protagonista inventa un «hiperboloide», aparato que permite generar rayos capaces de quemar, cortar y transportar a grandes distancias colosal energía. Por supuesto, es posible fabricar un espejo cóncavo que crea un haz paralelo de luz. Con este fin hay que disponer en el foco del espejo una fuente puntual. Pero la fuente puntual no es sino una abstracción matemática. Bueno, que no sea puntual, sino, simplemente, pequeña. Sin embargo, incluso en el caso de caldear la bolita hasta 6000 K (ningún material soporta temperatura más alta), obtendremos un haz de luz de intensidad mísera.

Y apenas procedamos a aumentar las dimensiones de la fuente, inmediatamente, en lugar del haz paralelo obtendremos un abanico de «hilos» luminosos, y la intensidad del rayo del proyector irá disminuyendo rápidamente con la distancia.

De este modo, resulta que el primer obstáculo en el camino de la creación de un rayo intenso es el hecho de que los átomos radian luz en todas las direcciones. Es el primer obstáculo, más no el último. Los átomos y las moléculas radian, por decirlo así, sin ponerse de acuerdo entre sí. Por esta causa, los rayos que parten de

diferentes átomos emprenden el viaje de una forma no coordinada, sin esperar unos a otros. Esta circunstancia conduce a que las radiaciones de los distintos átomos no coinciden por su fase. Y siendo así, los rayos procedentes de diferentes átomos, con frecuencia, se aniquilarán recíprocamente. Lo último, como recordará el lector, tiene lugar cuando la cresta de una onda se corresponde con la depresión de la otra.

Se logra superar todos estos obstáculos al crear, precisamente, la radiación de láser. La palabra «láser» no es sino una abreviatura de la denominación inglesa: *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, lo que significa: amplificación de la luz por medio de radiación estimulada.

La idea se forma de varios elementos. En primer lugar, recordamos que a la par de radiación espontánea existe la estimulada, como ya hemos dicho, esta forma de radiación aparece cuando el fotón de la luz se encuentra con un átomo excitado. Si la energía de excitación del átomo es exactamente igual a la del fotón, entonces, este último obliga al átomo a *des-excitarse*. El átomo pasa a un nivel más bajo radiando un fotón. Una particularidad admirable de la radiación estimulada consiste en que este fotón será idéntico a aquel que lo ha engendrado, y no sólo en lo que respecta a su energía: se pondrá en marcha teniendo la misma fase y siguiendo la misma dirección.

El segundo elemento de la idea consiste en lo siguiente. Si el sistema de los átomos que emiten una radiación se encierra en un tubo cuyos fondos se encuentran a una distancia determinada uno del otro y pueden hacer de espejos para aquellos fotones que nos interesan, estamos en condiciones de reunir poco a poco en este recipiente, a costa de los viajes de los fotones por aquí y por allá, una multitud de fotones engendrados por los átomos excitados en igual medida.

El tercer elemento de la idea reside en retener los átomos para un plazo prolongado, en la medida de lo posible, en estado excitado y a continuación, después desemejante «bombeo», obligar a todos los átomos a *des-excitarse* simultáneamente. La realización de la idea del láser, o sea, la multiplicación de un fotón y la obtención de miles de millones de fotones idénticos, indistinguibles por sus propiedades, debe llevar a la generación de un rayo de luz de una intensidad sin precedente. Un haz de esta índole se ensancharía en ínfimo grado y a la sección transversal del rayo correspondería una energía enorme.

Pero, ¿cómo conseguir este objetivo? Durante largos decenios nadie pudo sugerir idea alguna. En los años 30, V. A. Fabrikant ya promovió importantes conjeturas sobre el particular, y más tarde, los persistentes esfuerzos de los futuros laureados con el Premio Nobel, los científicos soviéticos A. M. Prójorov y N. G. Básov y el físico norteamericano Ch. Townes, condujeron a la creación de los láseres.

Supongamos que el sistema posee dos niveles de energía. La mayoría de los átomos o moléculas se encuentra en el nivel inferior. Los impactos térmicos pueden para un corto plazo trasladar la molécula al nivel superior. Pero semejante situación no puede durar un largo rato; la molécula se *des-excitará*. En este caso, la mayoría aplastante de los átomos pasará al nivel inferior y lo hará de manera espontánea. En cuanto a transiciones estimuladas al nivel inferior éstas ocurrirán raras veces, Puesto que el número de partículas excitadas es pequeño.

Ahora supongamos que se logró hallar una sustancia cuyos átomos poseen tres niveles de energía designados en la fig. 1.5 con las cifras 1, 2 y 3, respectivamente. La distancia 1 - 3 corresponde a la frecuencia de radiación de la luz verde, y la distancia 1 - 2, a la frecuencia de la luz roja. Sea que la probabilidad de transición desde el nivel 3 hacia el nivel 2 es miles de veces mayor que la frecuencia del paso del nivel 2 al nivel 1. Vamos a irradiar la sustancia con luz verde.

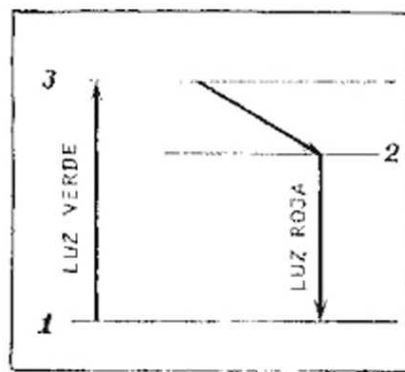


Figura 1.5

Los átomos se elevarán al tercer piso, mediante transiciones espontáneas se trasladarán al nivel 2 y se retendrán en este nivel. Dicha transición se denomina transición sin radiación (transición Anger). La energía liberada se transforma en

energía vibracional de los átomos. Continuemos fantaseando, imaginándonos que se logró trasladar la mayoría de los átomos al nivel 2. Hemos conseguido la inversión de la densidad de los átomos en los niveles, es decir, una densidad «anormal». Los niveles superiores 2 están «poblados» más densamente que los inferiores 1, fenómeno que resulta imposible cuando el proceso lo rige tan sólo el movimiento térmico.

A pesar de todo, la transición del nivel 2 al nivel más bajo 1, comienza a realizarse. El fotón correspondiente encontrará en su camino otros átomos que están en el nivel excitado 2. Semejante encuentro conducirá no a la absorción, sino a la creación de un nuevo fotón. Al primer fotón 2 - 1 casualmente formado se unirán fotones análogos de radiación estimulada.

Surge el flujo de fotones 2 - 1. Todos estos fotones serán exactamente idénticos y crearán un rayo de enorme intensidad.

Los investigadores cuyos nombres acabamos de mencionar lograron reproducir precisamente este proceso.

Desde el punto de vista histórico, primero fue creado el láser a rubí. El esquema de ecuaciones representado en la figura justamente caracteriza el rubí con impurezas de átomos de cromo.

Para crear un láser es necesario disponer de una fuente de excitación que realiza el «bombeo» del mismo, es decir, traslada los átomos al nivel superior.

En el caso de que como fuente de radiación de láser interviene un cuerpo sólido, este último se fabrica en forma de cilindro cuyas bases desempeñan el papel de espejos. Cuando se trata de líquidos o de gases se confecciona un tubo con espejos junto a la base de la columna. Al realizar el avance micrométrico de los espejos y fijar de este modo la longitud de la columna, se pueden ponerse en buenas condiciones solamente aquellos fotones cuyo número entero de longitudes de onda cabe a lo largo de la longitud de la columna. Tan sólo en este caso todas las ondas se suman.

La particularidad principal del láser consiste, tal vez, en la posibilidad de crear un flujo filiforme de radiación. Prácticamente, el rayo de láser puede tener cualquier sección transversal. Desde el punto de vista técnico esto objetivo se consigue haciendo viajar el rayo por un capilar estrecho de vidrio de una longitud lo

suficientemente grande. Los fotones que se desplazan formando un ángulo con el eje del capilar no tomarán parte en el proceso de multiplicación de los fotones. La cavidad de resonancia (o sea, los espejos reflejan los fotones ora en una dirección, ora en otra en el período de trabajo del láser en que se verifica el bombeo de los átomos) multiplica sólo los fotones de una dirección. En algunos casos, cuando la divergencia angular del haz del orden de un grado no satisface, en el camino del rayo puesto en libertad se coloca, además, una lente complementaria.

La instalación de láser, cuando se trata de la creación de grandes potencias, es una obra ingenieril compleja. En la columna se engendra el impulso primario, seguidamente este puede enviarse a los amplificadores cuyo principio de trabajo es el mismo que el de la columna primaria, pero cuyo bombeo es independiente de dicha columna. No vamos a retenernos en estos detalles.

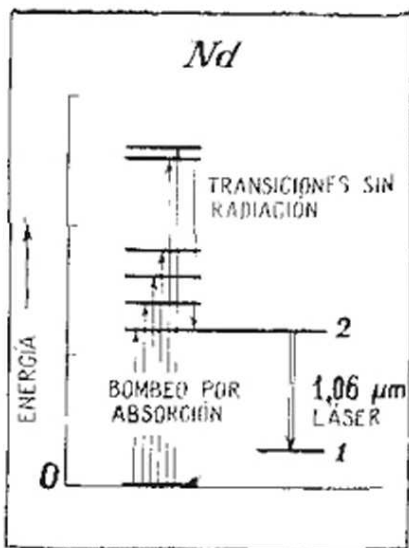


Figura 1.6

Lo que nos interesa son los principios físicos del bombeo y de la creación de la radiación de los láseres. Y estos pueden ser esencialmente distintos, como lo demuestran las figs. 1.6 - 1.8 con los esquemas de la acción de los láseres empleando los cuales se obtienen hoy en día los rayos de potencia máxima.

En la fig. 1.6 se representa el esquema del llamado láser a neodimio, fil nombro puede dar lugar a un error. El cuerpo del láser lo forma no el metal neodimio, sino

el vidrio común y corriente con impureza de neodimio. Los iones de los átomos de neodimio están distribuidos caóticamente entre los átomos de silicio y de oxígeno. El bombeo se realiza con las lámparas-relámpago. Las lámparas producen la radiación dentro de los límites de las longitudes de onda desde 0,5 hasta 0,9 μm . Aparece una banda ancha de estados de excitación. Esta banda viene representada de una forma absolutamente convencional por medio de cinco rayas. Los átomos realizan transiciones sin radiación al nivel superior de láser (en el esquema en cuestión, así como en otros dos esquemas está marcado con la cifra 2). Cada transición aporta diferente energía que se transforma en energía vibracional de toda la «rejilla» de los átomos.

La radiación de láser, es decir, la transición al nivel inferior vacío marcado con la cifra 1 tiene la longitud de onda igual a 1,06 μm .

La transición del nivel 1 al nivel principal representado por medio de la línea de trazos «no trabaja». La energía se desprende en forma de radiación no coherente.

El láser a neodimio permite obtener una potencia fantástica igual a 10^{12} W. La energía se libera en impulso» cuya duración es de 0,1 ns.

Llegó a ser su rival joven el láser que utiliza las transiciones en los átomos excitados de yodo (fig. 1.7).

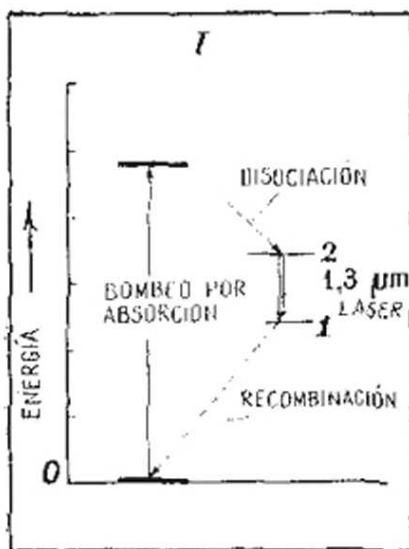


Figura 1.7

La sustancia activa es el gas C_3F_7I . También aquí para el bombeo se utilizan las lámparas-relámpago, pero los procesos físicos son distintos. Para el bombeo se hace uso de la luz ultravioleta con la longitud de onda de $0.25 \mu m$. Por impacto de esta radiación tiene lugar la disociación de las moléculas. ¡Resulta admirable el hecho de que los átomos de yodo, al desprenderse de la molécula, se presentan en estado de excitación! Como ve el lector, se trata ya de un método completamente distinto para alcanzar la inversión de la densidad de población. La transición de trabajo $2 \rightarrow 1$ conduce a la radiación de láser con la longitud de onda de $1,3 \mu m$, después de lo cual tiene lugar la reunificación del átomo de yodo con el radical molecular.

Probablemente, el lector habrá oído que se emplean ampliamente los láseres a helio y neón. Con su ayuda se obtiene un haz infrarrojo bastante fuerte con la longitud de onda de $1,13 \mu m$. Estos láseres no se cuentan entre los recordistas en cuanto a su potencia. Por esta razón ofrecemos el esquema de los niveles para otro láser que trabaja a base de la mezcla de nitrógeno y dióxido de carbono (fig. 1.8).

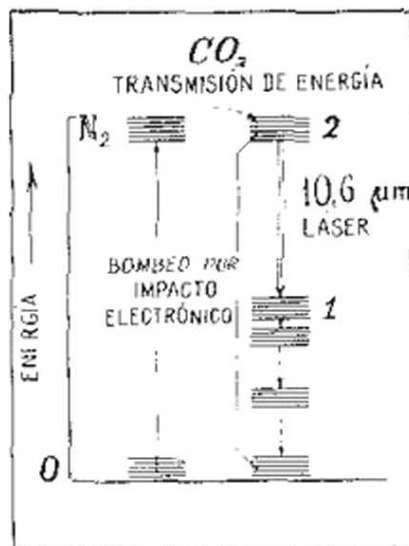


Figura 1.8

Pero antes de pasar a su descripción es necesario contestar a la pregunta natural: ¿por qué hace falta utilizar la mezcla de gases? La respuesta es como sigue: unos átomos y moléculas resultan más fáciles de excitar, y otros, más fáciles de desexcitar. De este modo, en el láser que trabaja a base de una mezcla se bombeando

energía, principalmente, las partículas de una especie, por colisiones éstas transfieren la energía a otros átomos o moléculas y estos últimos ya engendran el rayo de láser.

Están en uso sistemas que constan de más de dos gases. En particular, en el láser en que el papel básico pertenece al nitrógeno y al dióxido de carbono, es racional utilizar, además de estas dos sustancias, diferentes adiciones, incluyendo helio.

El bombeo del láser en que «trabajan» las moléculas de CO_2 se efectúa por un procedimiento que se distingue de los dos descritos. La mezcla de los gases se introduce en un tubo de descarga de gases y se suministra una tensión lo suficientemente alta como para lograr que el sistema pase al estado de plasma. Los electrones de movimiento rápido excitan oscilaciones de las moléculas de nitrógeno. El esquema representa el salto de semejante molécula al piso superior. Es importante que tensión esté aplicada a los electrodos. La energía óptima para excitar las moléculas de nitrógeno es la de cerca de 2 eV.

La molécula de nitrógeno sólo hace las veces de mediadora. Esta misma, de por sí, no da radiación y la energía recibida de los electrones la transfiere a la molécula de CO_2 trasladándola al nivel superior de láser.

Los niveles superiores de láser 2 son los «apartamentos del tercer piso» de las moléculas de CO_2 del tiempo de vida de la molécula de gas en el nivel superior de láser es de cerca de 0,001 s. No es poco, ni mucho menos y la molécula tiene una probabilidad bastante grande de encontrarse con un fotón de energía adecuada que la obligará a «hospedarse» un piso más abajo.

Cabe señalar que las transiciones «entre los apartamentos» son mucho más frecuentes que las entre «pisos». El tiempo de vida en el nivel rotacional se mide en diezmillonésimas fracciones de segundo, Esta circunstancia favorable lleva a que la población de los apartamentos de cada piso puede considerarse estable. Esta es la causa de que con la ayuda del procedimiento técnico a que nos hemos referido, o sea, creando una distancia adecuada entre los espejos, se logra aislar una transición determinada, por ejemplo, desde el apartamento sexto del tercer piso al apartamento quinto del segundo.

El diseñador del láser debe disponer de datos exhaustivos acerca del tiempo de existencia del átomo en uno u otro subnivel y de las probabilidades de la transición.

Entonces, podrá elegir la radiación óptima de la mezcla gaseosa dada. El láser que trabaja a base del dióxido de carbono se sintoniza, habitualmente, para la longitud de onda de $10,5915\ \mu\text{m}$.

Para que el láser funcione bien es necesario que las moléculas no se retengan en el nivel inferior de láser. Por decirlo así, en cuanto uno ha terminado su asunto debe ceder el lugar a otro. Bueno, siendo la presión igual a 1 mm de Hg las moléculas de dióxido de carbono experimentan 100 colisiones por segundo, despojando el nivel. Las cifras correspondientes en presencia de helio y agua son de 4000 y 100 000, respectivamente. La diferencia es enorme.

Eligiendo aditivos adecuados al dióxido de carbono se puede influir de una manera sustancial en la potencia del aparato. Parece que los especialistas consideran que precisamente un láser de esta índole merece una medalla de oro.

El láser que trabaja con CO_2 da un haz que puede enfocarse sobre un área de $0,001\ \text{cm}^2$, con la intensidad de $1000\ \text{kW/cm}^2$ para el régimen permanente y la de $1.000.000\ \text{kW/cm}^2$ para el régimen de impulso, siendo la duración del impulso igual a 1 ns.

La búsqueda de materiales apropiados para los láseres es, en cierto sentido, un arte. Hace falta poseer buena intuición, inventiva y memoria para crear un láser eficiente.

La extraordinaria intensidad y coherencia de la radiación de laser produjeron una revolución en muchos sectores de la técnica. En el último decenio la producción de los láseres se convirtió en una importantísima rama de la industria. Los láseres encuentran aplicación entre generadores de radiación que transmiten no sólo energía, sino también información, se lleva a cabo una intensiva investigación de la posibilidad de hacer uso de los láseres para realizar la reacción termonuclear. Se introdujo en la práctica el empleo del láser como escalpelo, como instrumento para efectuar las más finas operaciones quirúrgicas y como medio para separar los isótopos. En el curso de la ulterior exposición hablaremos de algunas aplicaciones de los láseres.

Luminiscencia

La radiación térmica es una propiedad universal de todos los cuerpos. El cuerpo emite rayos térmicos a cualquier temperatura comenzando por cero absoluto. El espectro térmico es continuo y se representa por medio de una curva cuyo carácter ya hemos considerado. Es cierto que se ha tomado la curva para el cuerpo negro, pero, de principio, la curva para los cuerpos coloreados se distingue en pocos aspectos de la para los cuerpos negros. La diferencia consiste tan sólo en que para los cuerpos coloreados la curva será deformada. Pero el incremento general de la energía de radiación a medida que crece la temperatura, así como el desplazamiento del máximo al lado izquierdo (si por el eje de abscisas vienen marcadas las longitudes de las ondas), son una ley general.

Cualquier radiación consiste en la transición del nivel de energía más alto al más bajo. Pero las causas de excitación de los átomos o moléculas pueden ser diversas. En el caso de radiación térmica estas son los impactos obtenidos por las partículas de la sustancia debido al movimiento térmico.

Sin embargo, ésta no es la única causa que obliga al cuerpo a emitir ondas. El fenómeno de luminiscencia cuya descripción abordamos tiene otra naturaleza. Este fenómeno se hace extender a los procesos de excitación de las moléculas no relacionados con el aumento de la temperatura del cuerpo. Pueden servir de causa de excitación de las partículas los encuentros con los haces de fotones o electrones, impactos mecánicos, el rozamiento, etc.

Prácticamente, todas las sustancias producen luminiscencia. Sin embargo, solamente algunas entre estas —los luminóforos— acusan un brillo intenso y tienen valor práctico.

Los luminóforos se utilizan como materiales con los cuales se recubren las pantallas de los televisores y oscilógrafos. En este caso la luminiscencia se produce bajo los impactos de los electrones. Resulta muy vistosa la luminiscencia de las sustancias originada por la acción de la radiación ultravioleta. En todo caso, la energía del fotón incidente debe ser mayor que la del fotón emitido. De este modo, oí cuanto de energía incidente puede pertenecer a la parte invisible del espectro, mientras que el emitido, a la visible.

Si una sustancia se somete a la radiación ultravioleta, las milmillonésimas partes de impurezas de la sustancia luminiscente revelarán su presencia. Por esta razón, el

análisis luminiscente se utiliza, a veces, como uno de los procedimientos del análisis químico. Valiéndose de aquél se determinan las trazas de impurezas indeseables.

Con luminóforos se recubren las paredes de las lámparas de luz diurna.

Se diferencian dos tipos de luminiscencia: la fluorescencia y la fosforescencia. La fluorescencia es la luminiscencia del átomo o de la molécula que se produce sin la retención de la molécula en el nivel excitado. Por el contrario, la fosforescencia es un fenómeno que puede producirse con un retardo grande. Este hecho tiene lugar si para la excitación el sistema pasa al nivel metaestable siendo poco probables las transiciones desde este nivel hacia abajo. Por regla general, la radiación tiene lugar después de que la molécula, primero, absorberá la energía y subirá al nivel superior y luego ya tendrá lugar la luminiscencia, con la particularidad de que la transición al nivel inferior se realiza sin retenerse en el nivel intermedio, metaestable.

Cabe decir varias palabras acerca de la electroluminiscencia que se produce en algunos diodos semiconductores en la frontera de la capa p-n. Este interesante fenómeno tiene enorme importancia práctica por cuanto con su ayuda pueden crearse láseres a semiconductores. La base de este fenómeno consiste en lo siguiente: el electrón y el hueco del semiconductor pueden recombinarse con la radiación del fotón.

Para conseguir que semejantes transiciones se efectúen ininterrumpidamente es necesario dejar pasar a través del diodo la corriente eléctrica. La tarea estriba en saber encontrar el material conveniente que satisfaga varios requisitos. En primer lugar, la corriente, si se puede decir así, debe inyectar los electrones en el semiconductor del tipo p, o sea, en el semiconductor que contiene más huecos, o bien, debe bombear los huecos en el cristal del tipo n. Lo expuesto es una condición indispensable. Pero otros factores, como, por ejemplo, la velocidad de transición del nivel superior al inferior, pueden jugar un papel decisivo. Se dan casos en que todos los factores favorecen la transición de los electrones desde arriba abajo y aparece la electroluminiscencia.

El más apropiado para crear la electroluminiscencia resultó ser el semiconductor arseniuro de galio. Este proporciona una cantidad suficiente de fotones. Los fotones se propagan a lo largo de la frontera p-n. Dos sectores del diodo perpendiculares a la frontera se pulimentan debido a lo cual se produce la cavidad resonante. Los

fotones que se forman durante la recombinación del hueco y del electrón resultan cofásicos y para las corrientes lo suficientemente grandes la radiación se hace análoga a la de los láseres descritos antes, con todas las consecuencias que de aquí derivan respecto al carácter filiforme, la directividad y la polarización de la radiación.

Los láseres a semiconductores trabajan en el diapason de ondas desde ultravioleta hasta la luz infrarroja lejana y se utilizan ampliamente para los más diversos fines.

Capítulo 2

Instrumentos ópticos

Contenido:

- *El prisma*
- *La lente*
- *La cámara fotográfica*
- *El ojo*
- *El polarizador*
- *El microscopio y el telescopio*
- *Interferómetros*
- *Instrumentos a base de láser*
- *Fotometría*
- *Holografía*

El prisma

El arsenal de instrumentos que se emplean en los laboratorios y en la industria varía con tanta rapidez que el investigador que debido a una u otra causa abandonó por un par de decenios su labor científica y después la reanuda, se vería obligado a estudiar de nuevo. Sin embargo, tanto hoy, como, probablemente, en un futuro lejano, siempre se encontrará con sus viejos conocidos: el prisma y la lente. A raíz de ello, vamos a recordar al lector, las sencillas leyes a que se subordina el curso del rayo luminoso al encontrarse con estos objetos preparados de materiales transparentes. Desde luego, la transparencia es un concepto relativo. Para algunas ondas electromagnéticas resultan transparentes la madera y el hormigón.

Las leyes del encuentro del rayo con los cuerpos capaces de reflejar y refractar este rayo son simples hasta el momento en que hace su aparición el aspecto ondulatorio de la luz. Dichas leyes se reducen a la ley de la reflexión (el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión) y a la de la refracción.

Como se conoce, al incidir en la frontera entre dos medios al rayo de luz se desvíe de la dirección inicial. El ángulo de incidencia i y el ángulo de reflexión r están ligados por medio de la relación

$$n = \frac{\sin i}{\sin r}$$

Esta ley fue establecida mediante meticulosas mediciones por el físico Willebrord Snellius (1580-1626), profesor de la Universidad de Leyden. El contenido del curso de sus conferencias en que se exponían los fenómenos del encuentro de la luz con los cuerpos transparentes fue bien conocido en el entonces estrecho círculo de hombres de ciencia europeos.

Es posible que precisamente debido a esta causa los contemporáneos admitieran burlonamente el libro de Renato Descartes (1596-1650) publicado en 1637 con el título de «*Discurso del método para conducir bien la razón y buscar la verdad en las ciencias*», en que, supuestamente, «demostró» esta ley recurriendo a razonamientos que para nosotros suenan bastante extraños. Las frases confusas de Descartes no provocaron, ni mucho menos, el temblor de entusiasmo en sus colegas. Y la circunstancia de que, a resultas de sus razonamientos, Descartes llegó a la fórmula correcta, la explicaron de una manera muy sencilla: porque ajustó sus razonamientos al resultado ya conocido con anterioridad. De este modo, Descartes tuvo que soportar también que lo acusaran de plagio.

Tal vez, se pueda coincidir con los contemporáneos de Descartes en su actitud escéptica respecto a este libro. Descartes examina una pelota arrojada contra una red floja. La pelota rompe la red y pierde la mitad de su velocidad. Entonces - escribe el gran filósofo-, el movimiento de la pelota se diferencia por completo del de su destinación en uno u otro sentido. Es difícil comprender qué significa esto. Probablemente, empleando esta frase Descartes hubiera querido decir que la componente horizontal de la velocidad de movimiento de la pelota no varía y la vertical si varía, por cuanto precisamente en esta dirección la red impide el movimiento de la pelota.

Pero, retornemos a la ley de la refracción.

Los ángulos i y r suelen marcarse respecto a la posición de la normal de tal forma como se representa en la fig. 2.1.

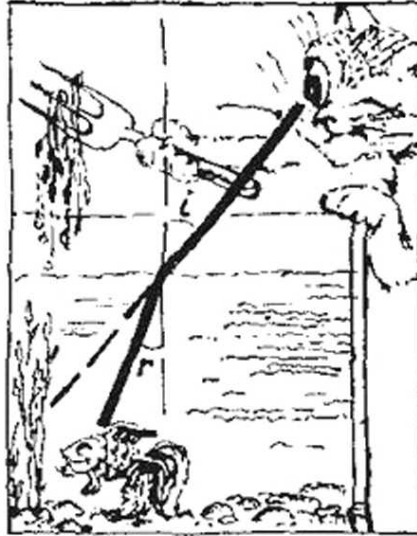


Figura 2.1

La magnitud n , llamada índice de refracción depende de los medios de los cuales se trata. Con el fin de comparar los cuerpos por sus propiedades ópticas es conveniente componer la tabla de índices de refracción para el caso de incidencia del rayo proveniente del aire (si se quiere ser puntual, hay que decir: proveniente del vacío) en el medio. En este caso el ángulo de refracción siempre será menor que el ángulo de incidencia y, por consiguiente, el índice de refracción será menor que la unidad.

Hablando con propiedad, el índice de refracción se acrecienta con la densidad del medio. Por ejemplo, el índice de refracción del diamante es igual a 2.4, y el del hielo es igual a 1.3.

No prestaré lugar a la tabla de índices de refracción. Sin embargo, de haberlo hecho tendría que señalar para qué longitud de onda de la luz se insertan los datos. El índice de refracción depende de la longitud de onda. Este importante fenómeno que sirve de base para el funcionamiento de una serie de instrumentos que descomponen la radiación electromagnética en espectro lleva el nombre de dispersión.

Si la luz incide de un medio menos denso en otro más denso, puede tener lugar la reflexión interna total. En este caso el índice de refracción es menor que la unidad. A medida que crece el ángulo de incidencia el ángulo de refracción se aproximará cada vez más a 90°. Para la condición

$$\text{sen } r = 1 \text{ y } \text{sen } i = n$$

la luz dejará de pasar al segundo medio reflejándose totalmente de la superficie de separación. Para el agua el ángulo de la reflexión interna total equivale a 49°.

La refracción de la luz mediante una lámina plana puede aprovecharse para «desplazar» el rayo, dejándolo paralelo a sí mismo. Y con ayuda de un prisma el rayo de luz puede hacerse girar.

Si el lector quiere recordar la deducción de la fórmula para el ángulo de giro D del rayo la hallará en el manual escolar. La deducción requiere únicamente conocimientos de geometría elemental, sin embargo, es muy engorrosa, en particular, si se lleva a cabo para un prisma grueso y el valor arbitrario del ángulo que el rayo, al incidir, forma con el prisma, una fórmula simple resulta en el caso de que el prisma es delgado y el ángulo de incidencia del rayo en la cara del prisma no difiere mucho del recto. Siendo así, tenemos

$$D = (n - 1) p$$

donde p es el ángulo entre las caras del prisma.

Haciendo uso de un prisma, el gran Newton, a finales del siglo XVII, demostró por primera vez que la luz blanca no es monocromática, sino se compone de rayos de distintos colores. Los que más se desvían son los rayos violeta, y los que menos, los rojos. Precisamente por esta razón decimos rayos «ultravioleta» y rayos «infrarrojos» y no *infravioleta* y *ultrarrojos*.

El mundo científico se enteró del descubrimiento de Newton en 1672. En la descripción de sus experimentos Newton es explícito y preciso. Aquí se revela su genial intelecto. Pero en lo que se refiere a la presentación verbal, su comprensión representa una ardua labor. Tan solo desbrozando a duras penas el camino a través

de la fragosidad de las palabras, se logra hacer constar: aunque el autor prometió exponer los hechos sin crear hipótesis (el famoso «*hipotesis non fingo*» newtoniano), no iba a cumplir su promesa. Muchos de estos axiomas y definiciones, a semejanza de: «el rayo de luz, es su parte ínfima» suenan excepcionalmente extrañas para el oído moderno.

Hasta el momento, en la química hace su servicio el espectrógrafo cuya parte fundamental es el prisma newtoniano. El material debe poseer gran dispersión. Los prismas para el espectrógrafo se preparan de cuarzo, de fluorita y de sal gema. La luz a investigar se deja pasar a través de una rendija dispuesta en el plano focal principal de la lente de entrada. A resultas de ello sobre el prisma incide un haz paralelo de luz. Los fotones de frecuencia diferente irán en distintas direcciones. La segunda lente, la de salida, acumulará fotones iguales y en un punto del plano focal. Si se quiere, el espectro, puede verse con el ojo. Con este fin, hay que colocar un vidrio mate. El espectro puede fotografiarse.

En el momento actual, el espectro se registra mediante autorregistradores. A lo largo del espectro se desliza el receptor de energía que es una célula fotoeléctrica o un termoelemento que produce corriente cuya intensidad es proporcional a la intensidad de la luz. Esta corriente hace desviarse la parte móvil del dispositivo registrador de la misma manera, exactamente, como la corriente del galvanómetro desvía su aguja. A la parte desviada se ajusta una pluma: ésta graba el espectro en un rollo de papel que se desenvuelve a velocidad constante.

La lente

Existe una gran rama de la industria fabricadora de lentes. Cuerpos transparentes limitados por dos superficies esféricas o por una esférica y otra plana; los hay de los más diversos tamaños. En algunos instrumentos se utilizan lentes cuyo tamaño es como el de una pequeña moneda metálica, y en los grandes telescopios el diámetro de la lente puede ser igual a varios metros. La fabricación de las lentes de grandes dimensiones es un gran arte, ya que una buena lente debe ser homogénea.

Por supuesto, cada uno de nuestros lectores ha tenido en las manos una lente y está enterado de sus principales particularidades. La lente aumenta el objeto, la lente enfoca los rayos. Valiéndose de una lente que intercepta el camino del rayo

del sol es fácil encender un trocito de papel. La lente «concentra» los rayos en un punto. Este es el foco de la lente.

El hecho de que los rayos paralelos converjan en un punto y, por el contrario, el que la lente cree un haz paralelo de rayos, si en el foco de la lente se sitúa la fuente puntual de luz, se demuestra mediante la ley de la refracción y a base de razonamientos geométricos sencillos.

Si un panto no se encuentra en el foco, sino a la distancia a del centro de la lente, entonces, las rayos que parten de éste se acumularán a una distancia a' . Estas dos distancias están relacionadas por medio de la fórmula conocida:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f}$$

aquí f es la distancia focal de la lente.

No es difícil demostrar que los rayos de luz que parten del objeto situado más lejos que la doble distancia focal, crearán su imagen invertida y disminuida en razón de a'/a entre el foco y la distancia focal doble.

Si el objeto se traslada a la posición que ha ocupado la imagen, ésta se trasladará a la posición que ha ocupado el objeto. Actúa el llamado principio de reversibilidad del curso de los rayos.

Cuando utilizamos la lente como lupa, el objeto se encuentra entre la lente y su foco. En esto caso, la imagen no se invierte y halla por el mismo lado que el objeto (fig. 2.2).

Voy a recordar la diferencia que existe entre el caso de la lupa y los dos ejemplos anteriores: la lupa crea una imagen «virtual», mientras que para otras disposiciones del objeto obtenemos imágenes que su pueden ver en la pantalla o fotografiar. Con plena razón las llamamos reales.

El aumento que da una lupa es tanto mayor cuanto menor es su distancia focal. Las posibilidades límites de la lupa son bastante modestas: lo máximo que se consigue es hacer el ángulo visual bajo el cual se ve la imagen virtual de 20 a 30 veces mayor que el ángulo visual bajo el cual observamos tal objeto a simple vista.

Muchos instrumentos ópticos serían extraordinariamente simples componiéndose de lentes unitarias si no fuese por una serie de defectos inevitables.

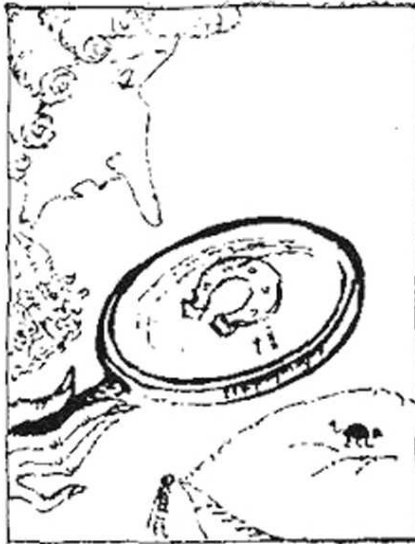


Figura 2.2

Nosotros queremos que la lente concentre el haz paralelo de la luz blanca en un solo punto. Pero el fenómeno de dispersión lo impide. La causa reside en que los fotones de diferente color se desviarán por la lente en direcciones distintas. Como resultado, en vez de un punto obtendremos una línea coloreada extendida a lo largo del eje de la lente. Es la aberración *cromática*.

Otro infortunio es la aberración *esférica*. Los rayos que pasan más cerca del eje de la lente se enfocarán en un punto más alejado que aquellas cuya ruta resulta más apartada del eje.

Es distinto el comportamiento de los rayos que inciden en la superficie de la lente formando ángulos grandes o pequeños. En lugar de un punto obtenemos un núcleo luminoso desplazado a un lado de la posición correcta. Del núcleo parte una cola. Este efecto se denomina *coma*. La palabra «coma» traducida del griego significa en una de sus acepciones «cabellera suelta».

Lo expuesto anteriormente está muy lejos de agotar la lista de las distorsiones que ocasiona la lente unitaria. Si examinamos un cuadrado veremos un cuadrilátero cuyos vértices vienen unidos por arcos «hundidos» por dentro. Dicho fenómeno

ocurre debido a que los rayos que parten de los vértices del cuadrado y de los centros de sus lados se refractarán de diferente manera.

Grandes contratiempos depara a los diseñadores de los instrumentos ópticos el defecto que lleva el nombre de *astigmatismo*. Si el punto se encuentra lejos del eje óptico principal de la lente, su imagen se desdoblará en dos franjas perpendiculares entre si y desplazadas hacia los lados opuestos con respecto a la posición de la imagen ideal.

Hay también otras distorsiones. Los especialistas en el campo de producción de las lentes suelen reducir todas las variedades de las distorsiones a siete tipos principales. Hemos mencionado entre éstos tan sólo cinco.

Como suele suceder muy a menudo en la técnica, al crear una buena lente tenemos que acoplar un compromiso. Queda absolutamente claro que junto con el tamaño de la lente incrementarán las distorsiones, mas, por otra parte, la iluminación de la imagen (o sea, el número de fotones de la luz visible correspondientes a una unidad de superficie) es proporcional al cuadrado del diámetro de la lente (es decir, a su área). Pero queda algo más. Supongamos que el objeto cuya imagen da la lente se encuentra lejos. Entonces, la imagen se concentrará en el foco. Cuanto menor sea la distancia focal, tanto menor será el tamaño de la imagen. En otras palabras, el flujo luminoso que parte del objeto se concentrará en un área menor. Esto significa que la iluminación será inversamente proporcional a la distancia focal.

Debido a estas dos causas, se denomina luminosidad de una lente, el cuadrado de la relación de su diámetro a la distancia focal.

La menor distancia focal la poseen lentes gruesas, o sea, lentes cuyas superficies están formadas por radios pequeños. Pero precisamente estas lentes darán mayores distorsiones. En consecuencia, el aumento de la luminosidad de la lente, ya sea a costa de sus dimensiones, o bien, a costa del radio de curvatura, conduce a la mala calidad de la imagen. Los técnicos se ven obligados a resolver un problema nada fácil.

La cámara fotográfica

La cámara fotográfica más simple no es sino una lente que hace las veces de ventanillo en una caja oscura. La imagen creada por la lente se fija en la placa fotográfica dispuesta enfrente del ventanillo.

Sin embargo, una lente simple da una imagen deformada. A raíz de ello, se sustituye por un sistema complejo de lentes que debe contrarrestar los infortunios ópticos de toda índole. Dicho sistema lleva el nombre de objetivo.

¿De qué manera se pueden eliminar las distorsiones? Hace tiempo que se ha propuesto utilizar un sistema de lentes seleccionadas de tal forma que los defectos de cada una de éstas se compensen por los defectos de otras. Este principio de obtención de un efecto positivo por multiplicación de dos efectos negativos resulta posible realizar para la eliminación de todos los siete defectos valiéndose tan sólo de tres lentes. Sin embargo, así resulta sólo de principio. En la realidad, para crear una imagen más perfecta se utilizan combinaciones más complicadas. Una de éstas (no la más compleja, ni mucho menos) se representa en la fig. 2.3.

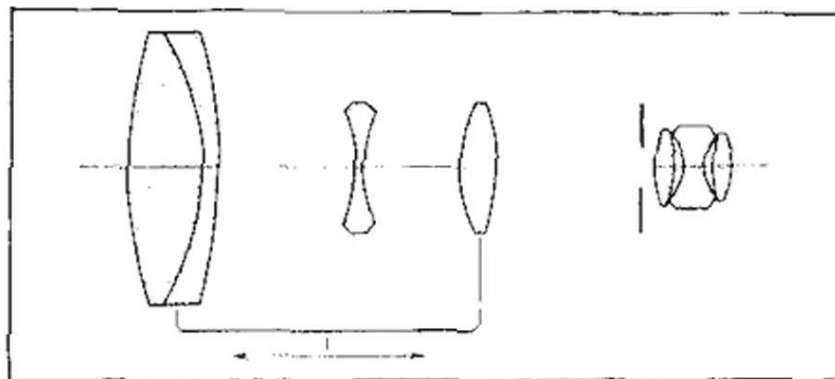


Figura 2.3

Este sistema de lentes convexas y cóncavas es capaz de proporcionar una imagen no deformada simultáneamente con una variación considerable del grado de aumento. La primera y la tercera componentes del sistema se desplazan una respecto a otra con lo cual se consigue la variación continua de la distancia focal en tres veces.

La cámara fotográfica necesita un simple dispositivo que permite «orientar el aparato al foco». Con este fin hay que tener la posibilidad de cambiar la distancia entre el centro del objetivo y la película fotográfica. Hasta el día de hoy se han

conservado aparatos fotográficos cuya cámara se fabrica plegable, en forma de fuelle, y que se puede contraer. Y cabe decir que semejantes aparatos permiten sacar fotos nada malas.

En un aparato fotográfico moderno que cabe en la palma de la mano esta operación se realiza de una forma más elegante, con un movimiento helicoidal de la montura del objetivo. Como resulta claro del análisis referente a la luminosidad de la lente, la calidad de la imagen mejora si reducimos máximamente la «pupila» de la cámara. Esto se consigue con la ayuda de un diafragma de diámetro variable. Las dimensiones del diafragma se eligen de modo que sean menores, pero que dejen pasar una cantidad suficiente de luz, con la finalidad de dar una buena imagen durante la exposición prefijada.

¿Por qué parecen tan graciosas las fotografías tomadas en los tiempos en que la técnica fotográfica se encontraba todavía en pañales? Salta a la vista que las personas en la foto quedaron inmóviles en postura tiesa. La explicación resulta muy simple: el fotógrafo se veía obligado a recurrir a exposiciones prolongadas. Precisamente por esta razón tenía que proferir las palabras sacramentales: *«Tranquilo, saco la foto»*.

La lucha por obtener una buena imagen con exposición mínima se libra por dos vías. La primera es el perfeccionamiento del objetivo. Y esto se lleva a cabo no sólo a costa de selección de la geometría de las lentes que constituyen el objetivo. En un objetivo compuesto por varias lentes casi la mitad de la luz se refleja, lo que conduce, primero, a las pérdidas en la iluminación de la imagen y, segundo, crea un fondo luminoso que disminuye el contraste de la imagen. Contra este fenómeno se lucha por medio del procedimiento que lleva el nombre de tratamiento antirreflejo de la óptica. A la superficie de las lentes se aplican películas finísimas. Debido al fenómeno de interferencia la parte de la luz reflejada disminuye de una manera brusca. Es fácil distinguir los objetivos con la óptica «tratada»: su cristal tiene matiz azulado.

La segunda vía para mejorar las fotografías es el perfeccionamiento de la película fotográfica.

Conviene decir varias palabras acerca del proceso fotoquímico que conduce a la formación de la imagen. La capa fotosensible es gelatina en la que están

introducidos cristales de bromuro de plata con pequeña impureza de yoduro de plata. El tamaño de los granos cristalinos varía entre los límites desde una milésima hasta una diezmilésima de milímetro. El número de granos correspondientes a 1 cm² de película se encuentra dentro del margen de, decenas a centenares de miles. Si la capa de la emulsión fotográfica se observa bajo el microscopio se puede ver que los granos se disponen bastante densamente.

Los fotones que caen sobre el grano de la emulsión destruyen los enlaces entre los átomos de plata y los de halógeno. El número de átomos de plata que obtuvieron libertad es estrictamente proporcional al de fotones caídos en la película. El fotógrafo elige una exposición en que se destruye gran cantidad de enlaces entre los átomos de plata y de bromo. No obstante, al mismo tiempo la exposición no debe ser demasiado larga. Una exposición prolongada llevará a que los enlaces entre los átomos de plata y de bromo se destruyan totalmente. Entonces, después del revelado los cristales desprenderán toda la plata contenida en éstos y la placa resultará igualmente negra en todos los puntos.

Durante una exposición correcta en la placa fotográfica se crea la imagen latente del objeto. En cada grano, el número de enlaces destruidos es proporcional al número de fotones incidentes en este grano. El proceso de revelado consiste en dar la posibilidad de reunirse a los átomos de plata potencialmente libres. En este caso, la cantidad de plata desprendida en el negativo después de revelar la película será proporcional a la intensidad de la luz.

De lo expuesto queda claro que los pequeñísimos detalles que representa la fotografía del objeto no pueden ser, de ningún modo, mayores que el tamaño del grano cristalino de bromuro de plata.

Una vez revelada la placa debe fijarse. Este proceso consiste en eliminar el bromuro de plata no descompuesto.

Si estos granos no expuestos no se eliminan, entonces, al sacar el negativo a la luz, lo «velaremos», pues en este caso los granos desprenderán por completo toda la plata que contienen.

La física de obtención de la imagen positiva es tan evidente que no nos daremos trabajo de parar en ésta.

La técnica de fotografía en color moderna dista mucho de ser simple y merece gran admiración. En cuanto a la física de este proceso, ésta no tiene nada de complicado. El modelo de percepción de la luz ofrecido ya a mediados del siglo XVIII es absolutamente correcto. El ojo del hombre posee receptores de tres colores: rojo, verde y azul. Al combinar estos colores en distintas proporciones es posible crear la sensación de cualquier color. En correspondencia con lo expuesto, para obtener una imagen en color hay que disponer de una película de tres capas. La capa superior debe ser sensible a los rayos azules; la central, a los verdes, y el inferior, a los rojos. No hablaremos de cómo los químicos alcanzan semejante estado de cosas. El negativo en color se transforma en positivo en color, utilizando también el papel fotográfico de tres capas.

El ojo

El ojo creado por la naturaleza es un maravilloso instrumento físico. La posibilidad de distinguir decenas de miles de matices de los colores, de ver a distancias cortas y largas, de percibir con los dos ojos las relaciones volumétricas del objeto, así como la sensibilidad frente a las intensidades luminosas muy insignificantes, todas éstas son propiedades que podrán hacer honor al instrumento de la más alta clase. Es cierto que el ojo del hombre ve solamente una pequeña porción del espectro. Los ojos de una serie de animales carecen en cierto grado de esa imperfección.

La estructura del ojo recuerda la de un aparato fotográfico. El papel del objetivo lo desempeña el cristalino que tiene la forma de una lente biconvexa. El cristalino es blando y es capaz de cambiar su forma por acción de los músculos que lo abarcan. En esto consiste el proceso de acomodación del ojo que permite igualmente bien ver tanto los objetos próximos, como los alejados. Con la edad, el cristalino se torna más dura y los músculos se aflojan, y en relación con ello el hombre necesita gafas «para la lejanía» y «para la lectura».

La imagen del objeto se proyecta a la pared posterior del ojo. El nervio óptico transmite esta sensación al cerebro.

El ojo normal de una persona joven es capaz de examinar con detalle el objeto situado a una distancia no menor de 10 cm. A medida que avanza la edad, suele desarrollarse la presbicia y esta distancia crece hasta 30 cm.

Delante del cristalino se encuentra la pupila que hace las veces del diafragma del aparato fotográfico. La abertura de la pupila puede variar dentro de los límites de 1,8 a 10 mm.

El papel de la placa fotográfica en que se forma la imagen lo desempeña la retina cuya estructura es muy compleja. Bajo la retina se sitúa el epitelio del ojo que consta de células sensibles a la luz que se denominan conos y bastoncillos. El lector puede comparar el número de estas células con el de granos de bromuro de plata en la placa fotográfica. El número de células visuales supera cien millones. Por cuanto el hombre es capaz de distinguir colores, está claro que las células visuales poseen sensibilidad disímil respecto a las diferentes zonas del espectro. Llegaremos al mismo resultado al suponer que las células se dividen en clases sensibles a distintas zonas del espectro.

Si la vista resulta normal, entonces, el foco posterior del ojo en estado tranquilo se encuentra en la retina. Si el foco se halla delante de la retina, la persona es *miope*, y si detrás de la retina, la persona padece *presbicia*. Lo que conduce a estos dos defectos difundidos es el grueso demasiado grande o demasiado pequeño del cristalino. Hay personas que padecen *astigmatismo*. En este caso, el cristalino en estado normal no tiene forma regular de un cuerpo limitado por dos superficies esféricas.

Todos estos defectos se corrigen con la ayuda de las gafas las cuales, junto con el cristalino, deben formar un sistema óptico que enfoque la imagen del objeto en la retina.

Las lentes de las gafas se caracterizan por el número de dioptrías. La dioptría es la unidad del poder óptico (*vergencia*) de una lente y esta magnitud es inversamente proporcional a la distancia focal. El poder óptico en dioptrías es igual a la anidad dividida en la distancia foral en metros. Las distancias focales de las lentes divergentes que utilizan en sus gafas las personas présbitas son negativas.

El ángulo visual del ojo es mucho mayor que nos parece. Una serie de acontecimientos que suceden bajo el ángulo de 90° a cada lado respecto a la mirada directa se fija inmediatamente en la subconsciencia. Esta circunstancia, con frecuencia, suscita en las personas la errónea opinión de que «sienten» la mirarla

de un transeúnte sin verlo. El ojo discierne mal los objetos vistos bajo un ángulo menor que un minuto de arco. Esto tiene lugar hasta con una buena iluminación.

El polarizador

La onda luminosa es una onda electromagnética, como se ha señalado en el libro 3, por medio de experimentos patentes puede demostrarse que el vector del campo eléctrico es perpendicular a la dirección del rayo. Si este mismo hecho se interpreta considerando la luz en el aspecto corpuscular es conveniente indicar que la partícula de luz -el fotón- no es una bolita, sino una flechilla. En una serie de cálculos complicados los físicos teóricos llegaban a la conclusión de que el fotón pasee espín (igual a 1). De este modo es bastante natural representar el fotón como flechilla.

Un rayo de luz ordinario no es sino un flujo de fotones cuyos espines están dispuestos de manera desordenada. Dicho rayo luminoso se denomina no polarizado. Sin embargo, en una serie de casos tenemos que tratar con el haz de fotones la totalidad de cuyos espines miran en el mismo sentido, o, empleando otro lenguaje, tenemos que ver con ondas electromagnéticas cuyo vector eléctrico posee una dirección completamente determinada. Tales rayos se denominan *polarizados*.

Uno de los procedimientos para la obtención de los rayos polarizados consiste en hacer pasar el rayo luminoso a través de un cristal de baja simetría. Estos cristales orientados de una forma adecuada respecto al rayo incidente acusan la capacidad de desdoblar el rayo natural en dos rayos polarizados en dos direcciones mutuamente perpendiculares,

Lamentablemente, no estoy en condiciones de dar al lector ni siquiera una noción mínima de por qué ocurre así. Este hecho está relacionado con que las moléculas del cristal «reciben» de diferente manera las ondas. Con los vectores eléctricos dispuestos de una forma desigual. Pero temo que no se sienta aliviado por esta frase. Sólo me permito asegurar que la teoría del desdoblamiento de los rayos sí que existe y que, además, es una teoría excelente que describe todos los detalles de este interesante fenómeno. En particular, se puede predecir cómo variará el cuadro del paso de la luz si colocamos el cristal bajo distintos ángulos respecto al rayo luminoso.

Al desdoblar el rayo no polarizado en dos polarizados, podemos, seguidamente, sin especial dificultad, llegar a tal estado de cosas en que uno de estos rayos se desvíe por algún lado. Una vez conseguida esta finalidad obtenemos el instrumento llamado nicol, en honor de su creador, el físico inglés William Nicol (1768-1851). Inventó el instrumento todavía en 1820. Es interesante señalar que todas las explicaciones referentes a la polarización de la luz se daban en aquella época en el lenguaje corpuscular considerándose una confirmación magnífica de la teoría corpuscular de la luz de Newton.

Al poco tiempo se descubrieron los fenómenos de interferencia y de difracción cuya explicación mediante el lenguaje ondulatorio era tan natural que la teoría de los corpúsculos luminosos resultó sepultada. Sin embargo, transcurrió un siglo y la teoría resucitó -como la fabulosa ave Fénix renace de sus cenizas- aunque en forma mucho más modesta de uno de los dos aspectos del campo electromagnético.

Si el camino de la luz lo intercepta un polarizador, la intensidad del rayo disminuirá, como conviene esperar, al doble. Pero el fenómeno más interesante, el cual demuestra, precisamente, la existencia de la polarización, tendrá lugar cuando coloquemos en el camino del rayo un segundo instrumento, análogo al primero. Este se denomina analizador a pesar de que no se diferencia en nada del primer nicol. Hagamos ahora girar el nicol en torno al rayo de luz. Resultará que la intensidad de la luz que pasó a través de dos nicoles para cierta posición recíproca de éstos es la misma que en ausencia de nicoles. Decimos: en esta posición los nicoles son paralelos. Ahora hagamos girar el analizador. Cuando le damos vuelta de 90° la luz deja pasar. En este caso se dice que los nicoles están cruzados.

En la posición intermedia, cuando el segundo nicol esté desviado de la posición paralela en un ángulo α , la intensidad será igual a

$$\frac{1}{2} I \cos^2 \alpha$$

La fórmula se explica con facilidad si se admite que el vector del campo eléctrico está descompuesto en dos componentes: una perpendicular y otra paralela a la «rendija» del analizador. Y la intensidad, como sabemos, es proporcional al

cuadrado de amplitud de la onda, es decir, al cuadrado del vector eléctrico. Por lo tanto la variación de la intensidad de la luz debe efectuarse de acuerdo con la ley del cuadrado del coseno.

El análisis de la luz polarizada tiene varias aplicaciones prácticas. Imaginémonos que los nicols están cruzados y entre éstos está colocado un cuerpo transparente capaz de hacer girar el vector eléctrico de la onda. En este caso tendrá lugar la aclaración del campo observado. Dicha capacidad la poseen los cuerpos que se encuentran bajo tensión. Según sea el valor de la tensión, el giro del vector luminoso y, junto con esto, también la aclaración del campo detrás de los nicols cruzados será diferente. Veremos cuadros hermosos (y, además, coloreados por cuanto los fotones de distintos colores se comportan de diferente manera) que permiten juzgar sobre las tensiones en la muestra, o bien, si están orientadas o no las moléculas de la misma. Son datos valiosos y, a raíz de ella, un buen microscopio está dotado de dos nicols para que haya posibilidad de examinar la imagen del objeto en la luz polarizada. La información acerca de la estructura será más rica.

También las soluciones de muchas sustancias son susceptibles de hacer girar el vector eléctrico de la onda luminosa, por ejemplo, las soluciones de azúcar. En este caso, el ángulo de giro resulta estrictamente proporcional a la cantidad de azúcar en la solución. Por lo tanto, es posible acomodar el polarímetro para medir el contenido de azúcar. Estos instrumentos se denominan sacarímetros y se pueden encontrar casi en cualquier laboratorio químico.

Estos dos ejemplos no agotan las aplicaciones de los polarímetros, pero las dos expuestas son, probablemente, las principales.

El microscopio y el telescopio

La parte óptica del microscopio consta del ocular y el objetivo. El ocular es una lente a la que arrimamos el ojo, y el objetivo casi toca el objeto examinado. El objeto se coloca a una distancia que supera algo la distancia focal del objetivo. Entre el objetivo y el ocular aparece la imagen inversa aumentada. Es necesario que ésta se encuentre entre el ocular y el foco del ocular. El ocular desempeña el papel de lupa. Se puede demostrar que el aumento del microscopio es igual al producto de los aumentos proporcionados por el ocular y el objetivo tomados por separado.

A primera vista puede parecer que valiéndose del microscopio es posible observar detalladamente todos los elementos tan pequeños como se quiera del objeto. ¿Por qué, por ejemplo, no hacer una foto que aumente el tamaño miles de veces para, luego, observarla detalladamente bajo el microscopio, obteniendo ya un aumento de millón de veces, y así sucesivamente?

Un razonamiento de esta índole no resiste la crítica. Ante todo, cabe recordar que el aumento de los cuadros fotográficos está limitado por el tamaño del grano de la película fotográfica. Es que cada pequeño cristal de bromuro de plata actúa como un todo único. El lector, sin duda, habrá visto fotografías muy aumentadas, advirtiéndole que el aumento no conduce, ni mucho menos, a la precisión del cuadro, sino, por el contrario, hace más borrosos los detalles.

Ahora bien, si podemos evitar la operación de fotografiar aumentando la imagen por métodos ópticos -lo que es completamente posible pues no hay nada que impida elevar el número de lentes- nos convenceremos pronto que también en este caso el gran aumento no tiene sentido. El aspecto ondulatorio del campo electromagnético pone límite al aumento útil de cualquier instrumento. Ya sea que observamos el objeto a través de un diminuto cristal de aumento, ya sea que a simple vista, o bien, con la ayuda de un microscopio o telescopio, en todos estos casos, sea como sea, la onda luminosa procedente del punto luminoso debe pasar a través de un orificio. Pero en estas circunstancias aparece el fenómeno de difracción, es decir, la desviación del rayo luminoso del camino recto. En uno u otro grado el rayo «dobla la esquina». Debido a ello, la imagen del punto nunca será un punto, sino una mancha. Y por mucho que se esfuerce es imposible hacer el tamaño de esta mancha menor que la longitud de onda de la luz.

Es de esencial importancia el saber determinar aproximadamente en qué condiciones la marcha de la onda electromagnética se desvía considerablemente del camino rectilíneo.

Si designamos por x la desviación lineal desde el camino recto observada a la distancia f del manantial de la radiación, siendo igual a a el tamaño del obstáculo o del orificio que se encuentra en la trayectoria seguida por el rayo, entonces, tiene lugar la siguiente relación:

$$x = \frac{\lambda f}{a}$$

Aquí x es la longitud de onda. De esta ecuación se deduce que la difracción puede observarse tanto debido a partículas pequeñísimas, como a cuerpos celestes. Todo depende de qué longitudes de onda y de qué distancias se trata. Lo mismo se puede decir sobre los orificios. Para observar la difracción no es obligatorio, en modo alguno, tener que ver con orificios minúsculos. Por ejemplo, un orificio capaz de dejar pasar una pelota de tenis también permite observar los fenómenos de difracción aunque a las distancias del orden de cientos de metros.

La elemental ecuación que hemos presentado permite juzgar sobre las máximas posibilidades de los microscopios y telescopios.

El microscopio no nos da la posibilidad de discernir detalles del objeto con mayor precisión que un micrómetro. Y en cuanto a los detalles con dimensiones milimétricas los vemos a simple vista. De aquí resulta claro que al utilizar el microscopio óptico no tiene sentido afanarse para conseguir que el aumento sea mayor que en mil veces.

Esta restricción atañe al microscopio óptico. Ahora bien, si se lograra diseñar un microscopio que pudiera trabajar no con rayos luminosos, sino con otros cualesquiera cuya longitud de onda fuese menor, entonces, incrementaría el aumento útil del microscopio. Semejante microscopio se ha creado hace tiempo y trabaja en muchos laboratorios científicos. Es el microscopio electrónico. La longitud de onda de los electrones puede elegirse muy pequeña.



Figura 2.4

Valiéndose del microscopio electrónico se logra ver los detalles estructurales de la materia, medidas en diezmillonésimas fracciones de milímetro. Los biólogos pudieron observar las moléculas de ADN, aquellas mismas moléculas con cuya ayuda los caracteres hereditarios se transfieren de los padres a sus descendientes. Se ven las moléculas de las proteínas, es posible dilucidar la estructura de las membranas de las células, advertir los detalles de la estructura de las fibras musculares. Inserto tan sólo una fotografía récord (fig. 2.4) que muestra la red cristalina del mineral pirofilita con un aumento mayor de 3 millones. Se ve la distancia entre los planos del cristal igual a $4,45 \text{ \AA}$.

El límite de las posibilidades del microscopio electrónico está relacionado no con su poder resolutorio, pues podemos disminuir, sin dificultad, la longitud de onda de los electrones. El quid de la cuestión reside en el grado de contraste de la imagen: la molécula que se estudia debe colocarse en un soporte, y éste, a su vez, también consta de moléculas. Y sobre el fondo de las moléculas del soporte es difícil distinguir aquella molécula que nos interesa.

El microscopio electrónico es un instrumento complicado y caro. Su «estatura» ordinaria es del orden de un metro y medio. Los electrones se aceleran por la alta tensión. ¿Y a costa de qué se crea el aumento? El principio es el mismo que en el microscopio óptico. El alimento lo proporcionan las lentes. Pero, esté claro, que estas «lentes» en nada se parecen a las de un microscopio común y corriente. Los electrones se fijan por los campos eléctricos aplicados a placas metálicas con orificios, así como por campos magnéticos engendrados por las bobinas.

Existe una gran variedad de procedimientos técnicos que ayudan a crear la imagen. Haciendo uso de micrótomos se preparan cortes finísimos que se observan al trasluz y las moléculas en el soporte se matizan sedimentando en éstas vapores de los metales. También puede obtenerse la «réplica» de la muestra, es decir, cubrirla de una película muy delgada de material transparente para luego, decapar el propio objeto.

La microscopía electrónica es un gran e importante apartado de la física y merece que se le dedique un capítulo especial. Sin embargo, el volumen reducido del presente libro me hace avanzar.

Todavía en el siglo XVI se conjeturaba que con la ayuda de vidrios convexos podían observarse los objetos lejanos. No obstante, no nos equivoquemos al atribuir el descubrimiento del telescopio (mejor dicho, del anteojo) al gran Galileo. Este instrumento fue construido en julio de 1609 y ya al cabo de un año Galileo publicó sus primeras observaciones del cielo estelar.

Al igual que el microscopio, el anteojo (el telescopio-refractor) es, de principio, la combinación de las mismas dos lentes: del objetivo vuelto al objeto y del ocular vuelto al ojo. Puesto que se observa un objeto infinitamente alejado, su imagen se crea en el plano focal del objetivo. El plano focal del ocular coincide con el plano del objetivo, y del ocular parten haces paralelos.

Las posibilidades del telescopio crecen con el aumento del diámetro del objetivo. Así, por ejemplo, para los grandes telescopios están accesibles en la Luna cráteres de 1 km de diámetro, y en los telescopios pequeños es posible distinguir, habitualmente, cráteres de 154 km de diámetro.

En un observatorio astronómico veremos no sólo telescopios-refractores. De un modo seguro, tendremos que trabar conocimiento con un telescopio-reflector. Por cuanto observamos objetos lejanos y es necesario concentrar los rayos en el foco, resulta que con este fin se puede utilizar no una lente esférica, sino un espejo esférico. La ventaja es evidente, nos libramos de la aberración cromática. Los defectos del telescopio con espejo están relacionados tan sólo con los altos requisitos, de difícil realización, a que debe responder la superficie del espejo.

Por supuesto, también el telescopio tiene un límite de aumento útil relacionado con el aspecto ondulatorio de la luz. La luz de una lejana estrella se ensancha en un círculo lo que pone coto a la distancia angular entre las estrellas que podemos observar en el telescopio. También aquí el deseo de ampliar las posibilidades del telescopio está relacionado con el aumento de su diámetro. Probablemente, las posibilidades límites de los telescopios se encuentren en la región de una décima de segundo de arco.

En los últimos años, para secundar los telescopios, vino la nueva técnica. Los astrónomos estudian el firmamento fijando todo el espectro de las ondas electromagnéticas que nos envía el Universo. En el capítulo 7 hablaremos un poco sobre la irrupción de la física moderna en la pacífica morada de los astrónomos.

Interferómetros

Como ya hemos subrayado reiteradas veces, el campo electromagnético tiene el aspecto ondulatorio. De la misma manera, el aspecto ondulatorio lo poseen los flujos de partículas: los electrones, neutrones y protones. El sonido es el resultado de los desplazamientos mecánicos del medio que transcurren de acuerdo con la ley ondulatoria. Lo común para todos estos procesos físicos es la posibilidad de atribuir a cualquier radiación la longitud de onda, la frecuencia y la velocidad de propagación relacionadas por medio de la ecuación $c = \lambda \nu$. La radiación más simple es monocromática, o sea, se define por una longitud de onda. En el caso general la radiación resulta ser un espectro complejo, es decir, una suma de ondas de diferente longitud y de diferente intensidad.

El aspecto ondulatorio de la radiación se manifiesta en dos fenómenos: en la adición de las ondas que recorrieron distintos caminos, así como en el caso de la dispersión por los cuerpos que se encuentran en la trayectoria del rayo. Un caso particular importante de dispersión de ondas es la difracción. La adición de las ondas lleva el nombre de *interferencia*.

Aquí se tratará de la interferencia de la luz. Este fenómeno forma la base del funcionamiento de los instrumentos que ayudan a medir con precisión las distancias, así como algunas otras magnitudes físicas. Los instrumentos que se sirven del fenómeno de interferencia para fines aplicadas se denominan, precisamente, interferómetros.

El principio de medición de las distancias se reduce al cálculo del número de ondas que caben en el tramo que se mide.

A primera vista puede parecer que no es una cosa complicada realizar estas mediciones. Tomemos dos fuentes de luz y hagamos converger sus rayos en un punto. Dependiendo de cómo llegarán las ondas al punto de observación: la «cresta» con la «cresta» o la «cresta» con la «depresión», se creará una mancha clara o una mancha oscura. Planteemos ahora el problema de medir la distancia a la que queremos trasladar una de las fuentes de luz. Durante esta traslación cambiarán las relaciones físicas de las dos ondas en el punto de observación. Lo único que nos queda es contar la cantidad de relevos de lo claro y lo oscuro, de

modo que entonces, teniendo en cuenta la geometría del experimento y conociendo la longitud de onda de la luz, calcularemos sin dificultad la magnitud de la traslación.

De principio, todo es cierto. Sin embargo, al proceder de esta forma no observaremos la alternancia de lo claro y lo oscuro. La pantalla quedará todo el tiempo clara. Así, pues, el simple experimento fracasó.

Absolutamente indudable es el siguiente resultado: dos rayos de luz emitidos por diferentes fuentes y convergentes en un punto siempre se intensificarán mutuamente. Entonces, ¿puede ser que la teoría ondulatoria es errónea?

No, la teoría es justa, a la radiación electromagnética le es inherente al aspecto ondulatorio. Pero, hemos procurado obrar a base de una suposición equivocada. Para que se observe la interferencia es necesario que entre las ondas que se suman se conserve siempre una diferencia de fase invariable. Mientras tanto, las relaciones de fase, incluso entre ondas que parten de dos átomos de una misma fuente, son absolutamente fortuitas. Ya hemos señalado que los átomos de luz lanzan fotones sin «ponerse de acuerdo» entre sí sobre su conducta. Por consiguiente, dos fuentes diferentes radian de una forma discorde, o, como se dice, crean una radiación no coherente.

Pero, en este caso, ¿no resulta que la radiación acorde, es decir, coherente, es algo como el Pájaro Azul? No, ¡no es así!

La solución del problema es extraordinariamente hermosa y, al mismo tiempo, sencilla al extremo, lo que es inherente a la mayoría de ideas originales: ¡hay que obligar la radiación del átomo sumarse a sí misma! Y para alcanzar este objetivo es necesario desdoblar el rayo, que parte de cada fuente, en dos fragmentos, hacer que estos dos fragmentos del rayo recorran diferentes caminos y sólo después llevarlos a un punto. Precisamente a esta condición, nosotros, observando la interferencia y cambiando las diferencias de los caminos de los fragmentos del rayo desdoblado, podremos, de veras, medir el desplazamiento y la longitud que nos interesan, al calcular el número de alternancias de luz y oscuridad.

Hemos dado la descripción del principio que constituye la base de las mediciones de interferencia descubierto ya en 1815 por el físico francés Agustín Fresnel (1788-1827). Examinemos ahora los métodos que sirven de base para la acción de los

interferómetros con cuya ayuda se desdobra el rayo y se crean las diferencias de marcha entre las partes desintegradas del rayo.

Analicemos más detenidamente la interferencia de los rayos de luz reflejados de las partes exterior e interior de una lámina transparente o de una película. Este fenómeno merece que se le preste atención tanto por su significación práctica, como por la razón de que se observa en la naturaleza. Además, basándose en este ejemplo, se esclarecen con facilidad muchos importantes conceptos que utilizamos en la descripción de las ondas luminosas, así como de otras ondas electromagnéticas.

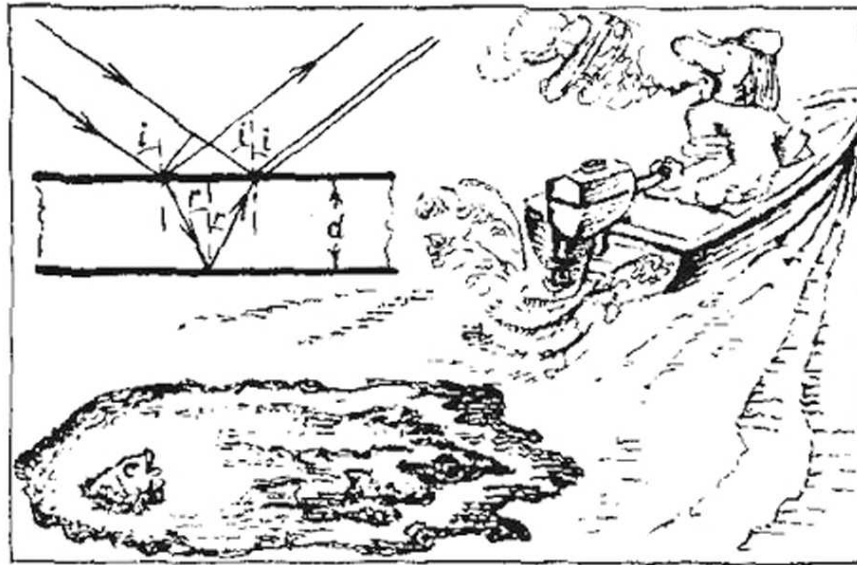


Figura 2.5

La fig. 2.5 permite calcular el desfase entre dos rayos de este tipo, La diferencia de fase se determina por la diferencia de marcha, es decir, por la diferencia de caminos recorridos por dos rayos. Como se ve en el dibujo, la diferencia de marcha

$$x = 2d \cos r$$

Pero, ¿cómo pasar de la diferencia de marcha de los rayos a la diferencia de fase que determina si dos ondas se intensificarán o se debilitarán una a otra? Hablaremos con el lector a quien no asusta la fórmula del coseno. La oscilación del

vector luminoso en cualquier punto del espacio puede anotarse de la siguiente forma:

$$A \cos 2\pi \nu t$$

El desfase al ángulo φ significa la necesidad de adicionar este ángulo al argumento del coseno. Si deseamos comparar las fases de los puntos de una misma onda separados por una distancia x , conviene tomar en consideración cuántas longitudes de onda caben en este tramo y multiplicar el número obtenido por 2π . Esta magnitud será, precisamente, el desfase. Así pues,

$$\varphi = \frac{2\pi x}{\lambda}$$

Ahora regresemos a la interferencia de los rayos en la placa. Hemos escrito ya la expresión para la diferencia de marcha, Par consiguiente, lo único que nos queda es dividir esta magnitud por λ . Pero... stop. ¿Quién nos ha dicho que la longitud de onda luminosa en el vacío y en la placa transparente es la misma? Por el contrario, tenemos todos los fundamentos para sospechar que a la onda le ocurre algo cuando ésta pasa de un medio a otro. No olvide que existe el fenómeno de dispersión: los fotones de distintas frecuencias se comportan de una manera diferente. La frecuencia, la longitud de onda y la velocidad de su propagación están relacionadas por la igualdad

$$c = \nu \lambda$$

¿Cuáles de estas magnitudes varían cuando la onda va a parar a otro medio? Es la experiencia la que contesta a esta pregunta. Es posible medir directamente la velocidad de propagación de la onda en el cuerpo, cerciorándose de que el índice de refracción, que obliga a la onda a cambiar la dirección de su movimiento en el caso de incidir de una manera oblicua sobre la superficie de separación de dos medios,

es igual a la relación entre las velocidades de propagación de la luz en éstos. Cuando uno de los medios es aire (o, más exactamente, el vacío)

$$n = c / v$$

donde c es la designación adoptada de la velocidad de la luz en el vacío, y v , la velocidad de propagación en un medio. Bueno, ¿qué más tenemos? ¿Cuál de los dos parámetros, la frecuencia o la longitud de onda, varía, al pasar la luz del aire al medio en cuestión? Para poder explicar los resultados de los experimentos relacionados con la interferencia es necesario suponer que la frecuencia del fotón queda invariable, mientras que la longitud de onda cambia. Por esta causa, para el índice de refracción es válida también la fórmula

$$n = \frac{\lambda_0}{\lambda}$$

donde λ_0 es la longitud de onda en el aire.

Ahora ya disponemos de todos los datos necesarios para anotar la diferencia de fase entre los rayos en el experimento con la lámina que describimos. Por cuanto uno de los rayos pasaba por el aire y el otro por el vidrio, la diferencia de fase será igual a

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} nx = \frac{4\pi}{\lambda_0} nd \cos r$$

En resumen, ¿qué se puede medir al estudiar la interferencia de los rayos en la lámina? La fórmula nos da respuesta a esta pregunta. Si se conoce el espesor se puede determinar el índice de refracción del material. Si se conoce el valor de n , entonces se puede hallar con una precisión muy grande (correspondiente a fracciones de longitud de onda luminosa) el espesor y, finalmente, es posible medir las longitudes de onda de distinta «cromaticidad».

Si el espesor de la lámina es variable, su material en todas las partes homogéneo y el ángulo de incidencia prácticamente el mismo para el sector examinado de ésta,

entonces, la interferencia se pondrá de manifiesto en forma de las llamadas bandas de igual espesor. En una lámina irregular aparecerá un sistema de bandas oscuras y claras (o, en el caso de luz blanca, irisadas, ya que los fotones de cada cromicidad se comportarán de su manera) que perfilarán los lugares de igual espesor. Esto explica el porqué de los dibujos coloreados que con tanta frecuencia vemos en las películas de petróleo o aceitosas a flor de agua.

Unas bandas muy hermosas de igual espesor se observan fácilmente en las películas jabonosas. Hagan un cuadro de alambre, sumérjanlo en una solución de jabón y sáquenlo. La solución jabonosa se escurre y en la parte superior la película será más delgada que en la inferior. En la película aparecerán franjas coloreadas horizontales.

El método de interferencia se aplica ampliamente para medir distancias pequeñas o variaciones pequeñas de distancias. Dicho método permite notar los cambios de espesor menores que centésimas fracciones de longitud de onda luminosa. En las mediciones interferenciales de las irregularidades de la superficie del cristal se logra alcanzar una precisión del orden de 10^{-7} cm.

Este método se utiliza de un modo amplio en la industria óptica. Si, por ejemplo, es necesario comprobar la calidad de la superficie de una placa de vidrio, esto se efectúa examinando las bandas de igual espesor del cuño aéreo creado por la placa ensayada y otra placa con una superficie perfectamente plana. Si estas dos placas se aprietan una contra otra por un extremo, se forma un cuño aéreo. Si las dos superficies son planas, entonces, las líneas de igual espesor serán rectas paralelas.

Figurémonos que en la placa que se ensaya existe una depresión o una prominencia. En este caso las líneas de igual espesor se torcerán contorneando el lugar defectuoso. Al cambiar el ángulo de incidencia de la luz las bandas se mueven por uno o por otro lado en dependencia de si el defecto sea una depresión o una prominencia.

En la fig. 2.6 se representa el aspecto del campo del microscopio en estos casos. Ambas figuras corresponden a muestras con defectos. La primera muestra tiene el defecto dispuesto a la derecha, al extremo mismo, y la segunda lo tiene a la izquierda.

Mediciones exactas de los índices de refracción de la sustancia pueden llevarse a cabo por medio de refractómetros interferenciales. En estos instrumentos se observa la interferencia entre dos rayos los cuales, en la medida de lo posible, estén alejados uno del otro.

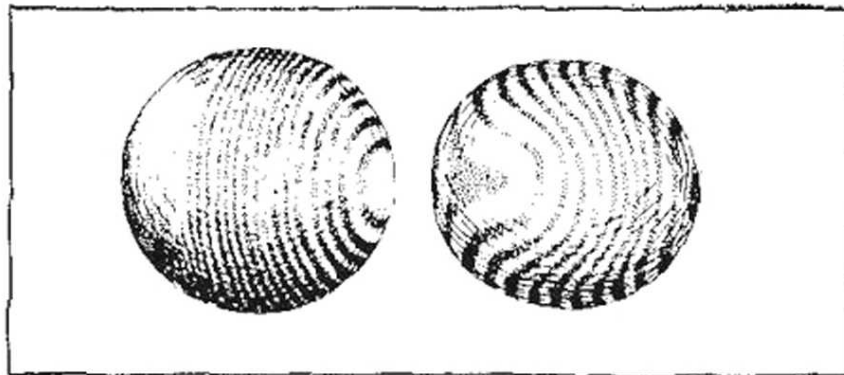


Figura 2.6

Supongamos que el camino de uno de los rayos lo intercepta un cuerpo de longitud l y de índice de refracción n . Si el índice de refracción del medio es n_0 , la diferencia óptica de la marcha cambiará en

$$\Delta = l(n - n_0)$$

Dos rayos se hacen converger en un punto con la ayuda de una lente enfocadora. Entonces ¿qué cuadro se observará en el anteojo? Un sistema de bandas claras y oscuras. Sin embargo, éstas no son bandas de igual espesor que se ven a simple vista. El sistema de bandas que aparece en el refractómetro tiene otro origen. Es que el haz luminoso inicial no es igualmente paralelo sino un poco divergente. En consecuencia, los rayos que forman el cono incidirán sobre la placa bajo ángulos algo diferentes.

Los acontecimientos interferenciales se realizarán de la misma manera para los rayos con igual inclinación. Estos, precisamente, se concentrarán en un lugar del plano focal del anteojo. Si la diferencia de marcha entre las partes desdobladas del

haz varía, las bandas se pondrán en movimiento. Al variar la diferencia de marcha en la magnitud Δ , a través del ocular del anteojo pasarán $\Delta\lambda$ bandas.

La exactitud del método es muy grande, ya que se capta sin dificultad un desplazamiento igual a 0,1 de la banda. Para este desplazamiento $\Delta = 0,1\lambda$. - $0,5 \cdot 10^{-5}$ cm, lo cual, en una longitud $l = 10$ cm, permitirá registrar la variación del índice de refracción en $0,5 \times 10^{-6}$.

Ahora es preciso referirnos al interferómetro de otro tipo que no hace uso del fenómeno de refracción. Se trata del interferómetro construido por el físico norteamericano Alberto Michelson (1852-1931). Es difícil sobreestimar el papel que dicho instrumento desempeñó en la historia de la física (hasta me atreveré a hacer una afirmación más fuerte: en la historia del pensamiento humano). Valiéndose de este interferómetro por primera vez se ha establecido el hecho de extraordinaria importancia: la velocidad de la luz en las direcciones a lo largo y a través de la órbita terrestre es igual. Esto significa que la velocidad de la luz no se suma a la velocidad de movimiento de la lámpara que da un destello luminoso siguiendo las reglas de acuerdo con las cuales la velocidad de la bala se suma a la velocidad de movimiento de un tirador con su escopeta. El descubrimiento de este notorio hecho condujo a la constitución de la teoría de la relatividad y a la revisión cardinal del sentido de los conceptos científicos fundamentales: de la longitud, tiempo, masa y energía. Pero de ello hablaremos más tarde. En cuanto al interferómetro de Michelson, de él vale la pena hablar inmediatamente por cuanto su significado se determina no sólo por el lugar que ocupa en la historia de la física, sino también por el hecho de que hasta al día de hoy los principios sencillos que forman la base de su estructura se utilizan para medir las longitudes y distancias.

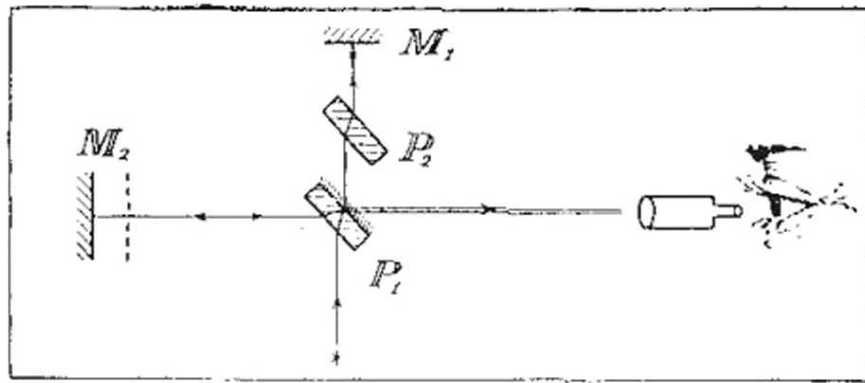


Figura 2.7

En este instrumento, el haz paralelo de luz monocromática incide sobre la placa planoparalela P_1 (fig. 2.7) cuya parte rayada está cubierta de una capa semitransparente de plata. Dicha placa forma un ángulo de 45° respecto al rayo incidente desde la fuente desdoblándolo en dos, uno de los cuales va paralelamente al rayo incidente (hacia el espejo M_1), y el otro, perpendicularmente a éste (hacia el espejo M_2). Los rayos separados inciden sobre ambos espejos de una forma perpendicular y regresan a los mismos puntos de la placa semitransparente de los cuales han partido. Cada rayo, al retornar del espejo, vuelve a desdoblarse en la placa. Una parte de la luz regresa a la fuente y otra parte va a parar al anteojo. En la figura se ve que el rayo que parte del espejo que se encuentra enfrente del anteojo pasa tres veces a través de la placa de vidrio con la capa semitransparente. Por esta razón, para asegurar la igualdad de los trayectos ópticos, el rayo que parte del espejo M_1 se deja pasar a través de la placa compensadora P_2 idéntica a la primera, pero sin la capa semitransparente.

En el campo visual del anteojo se observarán anillos circulares correspondientes a la interferencia en la capa aérea (cuyo espesor es igual a la diferencia de las distancias que separan los espejos del lugar de desdoblamiento de los rayos) de los rayos primarios que forman el cono. El desplazamiento de uno de los espejos (por ejemplo, del espejo M_2 , a la posición señalada por la línea de trazos) a un cuarto de longitud de onda corresponderá a la transición del máximo al mínimo, es decir, provocará el desplazamiento del cuadro en un semianillo. Este fenómeno puede

registrarse nítidamente por el observador. De este modo, en los rayos ultravioleta la sensibilidad del interferómetro supera 100 mm.

La aparición en la escena de los láseres operó una revolución en la técnica de la interferometría.

El asunto reside en lo siguiente. El tiempo de radiación de un átomo es igual a 10^{-8} a 10^{-9} s. El acto unitario de radiación consiste en la emisión de un tren de ondas. Por cuanto el tiempo de radiación es tan pequeño, resulta que, a pesar de la gran velocidad de la luz, el tren es muy corto. Cuando desintegramos el rayo en fracciones, pueden interferir tan sólo dos partes de un mismo tren de ondas. Este hecho significa que un segmento de la senoide debe cubrirse esencialmente con otro segmento. Pero, para conseguirlo, es necesario, por supuesto, que la diferencia de marcha entre las partes desintegradas del rayo sea mucho menor que la longitud del tren.

La diferencia máxima de marcha entre los rayos para la cual puede observarse la interferencia lleva el nombre de longitud coherente. Para la luz son fracciones de milímetro.

Mas fíjense cuán radicalmente cambia la situación para la radiación de láser. Un láser de acción continua engendra fotones de radiación estimulada que emprenden el viaje en una misma fase. O bien, empleando el lenguaje ondulatorio, los trenes de ondas que parten de diferentes átomos se superponen unos a otros creando una especie de onda única. La longitud coherente, prácticamente, llega a ser ilimitada y, en todo caso, se mide en metros y kilómetros (como siempre, el ideal es inasequible; sin embargo, no voy a detenerme en los distintos factores que influyen en la longitud coherente).

Utilizando la luz de láser se pueden construir interferómetros que permiten resolver problemas que antes se consideraban irrealizables. Por ejemplo, con una fuente de luz ordinaria el espejo del interferómetro de Michelson puede desplazarse en tan sólo a distancias del orden de milímetro. En cambio, si el rayo de luz es engendrado por el láser, entonces, el trayecto del rayo que incide sobre el espejo M_1 puede ser igual a varios centímetros, y el del rayo reflejado del espejo, M_2 puede alcanzar decenas de metros.

Los interferómetros para el control de la esfericidad de las lentes pueden fabricarse con una sola superficie de comparación, mientras que, cuando se utiliza la luz corriente, al variar el radio de la lente sometida al ensayo era necesario cambiar también el patrón de comparación (ya que no se podía trabajar con grandes diferencias de marcha), sin hablar ya de que los cuadros interferenciales se hicieron incomparablemente más claros por cuya razón se analizan con facilidad y mayor precisión.

La posibilidad de pasar sin la compensación del trayecto óptico de uno de los rayos permite fabricar interferómetros de un tipo completamente nuevo, se ofrece la posibilidad de realizar observaciones sobre el desplazamiento de las presas, la deriva geológica y las oscilaciones de la corteza terrestre. Al reflejar la luz de láser a partir de los objetos que se encuentran a grandes distancias, de modo que ésta se hace interferir con la inicial, se pueden efectuar mediciones exactas de la velocidad de movimiento de dichos objetos.

Instrumentos a base de láser

Por supuesto, podemos denominar instrumento el dispositivo que crea el rayo de láser, por cuanto aquél se emplea para el análisis, el control y las observaciones. Sin embargo, a diferencia de otros instrumentos ópticos, el láser tiene una importancia incomparablemente mayor para la industria. La utilización de los láseres es tan universal que más de una vez volveremos a hablar sobre ésta. En este párrafo nos detendremos en las aplicaciones del láser para el tratamiento de los materiales. Si no se necesita una potencia grande, se puede emplear el láser compacto a base de neodimio. El corazón de este láser es, como ya hemos señalado, el vidrio con liga de neodimio. La barra de vidrio es de 50 mm de longitud y de 4 mm de diámetro. El destello de luz que produce el bombeo se da por una lámpara de xenón. Con el fin de evitar pérdidas de energía luminosa la lámpara y la barra están encerradas en una cámara cilíndrica refrigerada por agua.

Para las variadas aplicaciones de este instrumento o de otros semejantes son importantes las siguientes propiedades suyas: la posibilidad de localizar la energía sobre un área excepcionalmente pequeña; la posibilidad de una dosificación precisa

de la porción de energía; la posibilidad de suministrar energía sin utilizar cualesquiera conductores o contactos.

Es característico el empleo del láser en la industria relojera. Todo el mundo conoce bien que los relojes se fabrican utilizando los «rubíes». Posiblemente, el lector no esté enterado para qué se necesitan en un reloj las pequeños rubíes, pero, sin duda alguna, sabe muy bien que su número determina la calidad del reloj. En las arandelas de rubí es necesario taladrar orificios. Sin la ayuda del láser esta operación requería varios minutos para cada piedra. En la actualidad, el proceso está totalmente automatizado ocupando fracciones de segundo. Si se tiene en cuenta que el número de piedras necesarias para la industria se mide en muchos millones por año, llega a ser perfectamente evidente el valor de esta aplicación del instrumento.

Para los mismos fines sirve el láser en la industria de diamantes. Al fabricar piedras diamantinas para el trefilado o la perforación, el láser se emplea como instrumento con cuya ayuda a la piedra se puede dar cualquier perfil, practicando en ésta orificios i hasta de varios micrómetros de dimensiones!

Pero he interrumpido mi relato sobre la fabricación de relojes. Es que el láser presta a esta rama otro gran servicio: suelda el muelle al mecanismo del reloj. Queda completamente claro que también en todos los demás campos de la industria en los cuales es indispensable la soldadura por puntos (y la técnica moderna experimenta en este procedimiento la extrema necesidad) puede utilizarse con gran éxito el rayo de láser. Un mérito enorme de esto finísimo rayo es el que no se debe preocuparse por la protección y enfriamiento de las partes vecinas al lugar destinado para soldar. Ya se convirtió en trivial el empleo del instrumento de láser como un cuchillo para cortar cualesquiera contornos en cualquier material.

Mencionemos un campo inesperado de aplicación de los láseres: para la restauración de las esculturas de mármol. Lamentablemente, la atmósfera del siglo veinte está muy lejos de representar aire puro. Diferentes gases nocivos y, en primer lugar, el óxido de azufre, forman en el mármol una corteza negra. Esta corteza es porosa y, a resultas de ello, a semejanza de una esponja, absorbe humedad y dosis complementarias de sustancias nocivas. La eliminación de la corteza recurriendo a medios mecánicos y químicos puede llevar al deterioro de la

escultura. En cambio, al operar con el láser en el régimen impulsional, se elimina la corteza sin tocar el mármol.

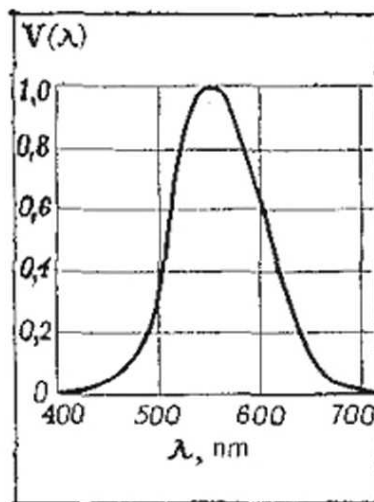
Haciendo uso del láser a base de dióxido de carbono se realiza el crecimiento de los cristales sin crisoles. Este proceso no es nuevo. Para semejante cultivo de cristales ya hace mucho se han aplicado corrientes de alta frecuencia, pero esta operación no se extendía a los dieléctricos cuya conductibilidad térmica es demasiado pequeña. Actualmente, con la ayuda de los láseres se hacen crecer, sin crisoles, los cristales de niohatos y de otras sustancias de alta demanda. Es imposible sobrestimar la importancia del crecimiento de los cristales sin crisoles para las necesidades de la microelectrónica, ya que las millonésimas partes de impurezas pueden jugar un papel negativo, mientras tanto, resulta prácticamente imposible impedir que algunos átomos «nocivos» pasen del material del crisol al cristal.

No voy a detenerme en la descripción de la estructura del aparato correspondiente. En el libro 2 ya hemos tratado sobre el crecimiento de los cristales. De un modo análogo al caso de corrientes de alta frecuencia, el rayo de láser crea una pequeña zona fundida que transporta lentamente la sustancia al cristal en crecimiento. A mí me parece probable que la utilización del láser haga replegarse, en cierta medida, otros métodos de cultivo de los cristales.

Fotometría

Cada fuente de luz puede caracterizarse por la energía que aquélla irradia. Sin embargo, en muchas ocasiones nos interesa tan sólo aquella parte del flujo de energía que provoca la sensación visual. Como ya señalado, esta particularidad la poseen las ondas electromagnéticas cuyas longitudes se encuentran dentro de los límites de 380 a 780 nm, aproximadamente.

La luz percibida por el cerebro se caracteriza por la luminosidad y el color. Si se comparan las sensaciones visuales producidas por la luz de igual intensidad, pero de diferente longitud de onda, resultará que al ojo se le presenta como más brillante la fuente de luz que engendra una onda de 555 nm de longitud lo que corresponde al color verde.

*Figura 2.8*

La percepción de la luz puede caracterizarse por la curva de eficacia luminosa (fig. 2.8) que indica (en unidades relativas) la sensibilidad del ojo normal respecto a las ondas de diferente longitud. Sin embargo, los técnicos hacen caso omiso de esta curva dejando al ojo que dictamine sobre la intensidad integral de la luz. Siguiendo este camino, es necesario elegir cierta fuente patrón de la luz para, luego, comparar con ésta, otras fuentes. Durante mucho tiempo la unidad de intensidad luminosa conservó la denominación de bujía, debido a que los primeros intentos de elección del patrón consistían, precisamente, en seleccionar cierta llama estandarizada de una bujía. Huelga decir cuán difícil resulta hacerlo.

El patrón internacional adoptado actualmente es el cuerpo negro incandescente. De material sirve el platino. El cuerpo negro emite luz irradiada por el platino calentado hasta la temperatura de fusión, es decir, hasta 2046 K, a través de un orificio pequeño.

La unidad de intensidad luminosa recibió el nombre de candela (del latín). La definición internacional trata de evitar hacer indicaciones directas a la temperatura de luminiscencia (para no introducir errores relacionados con la medición de la temperatura). Por esta razón la candela se determina de la siguiente forma: si se toma como fuente el platino que se encuentra en estado de solidificación a presión atmosférica normal, entonces, el área de $(1/6) \times 10^{-5} \text{ m}^2$ da en la dirección perpendicular a la superficie una intensidad luminosa igual a una candela.

A unas distancias lo suficientemente grandes la fuente de luz se representa como punto. Precisamente en estos casos es conveniente medir la intensidad de la luz. Construyamos alrededor de la fuente puntual una esfera y separemos en esta superficie un elemento de área S . Al dividir S por el cuadrado de distancia del centro obtendremos el llamado ángulo sólido. La unidad de ángulo sólido es el *estereorradiante*. Si en la esfera de 1 metro de radio se corta el área $S = 1 \text{ m}^2$, el ángulo sólido es igual a 1 estereorradiante.

Se denomina flujo luminoso la intensidad luminosa de una fuente puntual multiplicada por el valor del ángulo sólido.

Que no os deje confusos el hecho de que el flujo luminoso se reduzca a cero cuando se trata de rayos paralelos. En semejantes casos no se utiliza el concepto de flujo luminoso.

Por unidad de flujo luminoso se toma *lumen* que es igual al flujo emitido por una fuente puntual de intensidad de 1 candela, al ángulo igual a 1 estereorradiante. El flujo luminoso total emitido por el punto hacia todos lados será igual a $4\pi \text{ lm}$.

La intensidad luminosa caracteriza la fuente de luz independientemente de su superficie. Al mismo tiempo, queda completamente claro que la impresión será distinta según sea la extensión de la fuente. Por esta razón se recurre al concepto de *luminancia* de la fuente. Esta es la intensidad luminosa referida a la unidad de superficie de la fuente de luz. La luminancia se mide en *stilbs*: 1 stilb es igual a 1 candela dividida por centímetro cuadrado.

Una misma fuente de luz traerá igual energía luminosa a la página de un libro abierto en dependencia del lugar en que esta fuente se encuentre. Para el lector es importante cual es la iluminación de la parte de la mesa de escribir en que se halla el libro. Si las dimensiones de la fuente no son grandes (una fuente puntual), la iluminación es igual a la intensidad de la luz dividida por el cuadrado de distancia desde la fuente. ¿Por qué dividida por el cuadrado? La respuesta está clara: el flujo luminoso queda invariable dentro del ángulo sólido prefijado por muy grande que sea la distancia a la que nos alejamos del punto luminoso. En cambio, el área de la esfera y el área de la porción que corta el ángulo sólido prefijado crecerán inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Esta simple regla se denomina ley de cuadrados inversos. Al aumentar de 1 a 10 la distancia que separa

el libro que leemos de la pequeña lámpara, disminuiríamos 100 veces la iluminación de la página.

La unidad de iluminación es luz. Esta iluminación la produce el flujo luminoso igual a 1 lm incidiendo sobre el área de 1 m².

La iluminación en una noche sin luna es igual a 0,0003 lx. De este modo, cuando decimos «no se ven los dedos de la mano», definimos la iluminación de esos «dedos», precisamente. En una noche de luna la iluminación es igual a 0,2 lx. Para leer sin esforzar la vista se necesita una iluminación de 30 lx. Durante el rodaje de una película se conectan potentes proyectores llevando la iluminación de los objetos hasta 10.000 lx.

Todavía no hemos dicho nada acerca de los instrumentos que sirven para medir los flujos luminosos y las iluminaciones. En la actualidad, semejantes mediciones no constituyen un problema. De hecho, obramos precisamente así, como convendría proceder al dar la nueva definición de la candela. Medimos la energía que incide sobre la célula fotoeléctrica y la escala de dicha célula la graduamos en luz, teniendo en cuenta la curva de eficacia luminosa.

Los fotómetros existentes en el siglo pasado trabajaron a base del principio de comparación de las luminancias de dos áreas contiguas iluminadas. Sobre una de éstas incidía la luz cuya intensidad deseábamos medir. Valiéndose de dispositivos no complicados el flujo luminoso se hacía disminuir en un número determinado de veces, de modo que, en fin de cuentas, la iluminación de las aéreas contiguas fuese la misma.

Holografía

La creación de los láseres significa el devenir de una nueva época en el desarrollo de la ciencia y la técnica. Es difícil hallar una esfera del saber en que la radiación estimulada no descubra nuevas posibilidades.

En 1947 D. Gabor propuso utilizar la luz coherente para obtener la imagen del objeto por un método completamente nuevo. La nueva técnica que recibió el nombre de holografía se diferencia de un modo cardinal de la fotografía. La holografía resulta posible tan sólo debido a las particularidades de la radiación estimulada que la distingue de la luz ordinaria. Cabe recalcar otra vez que en la

radiación de láser casi todos los fotones coinciden en lo que se refiere a todas sus características: la frecuencia, la fase, la polarización y la dirección de propagación. El rayo de láser se ensancha en ínfimo grado, o sea, es posible obtener un rayo extraordinariamente fino a grandes distancias de la fuente y al rayo de láser le es inherente una longitud coherente muy grande (longitud de tren de ondas). Debido a esta última circunstancia que es, precisamente, importante para la holografía; es posible la interferencia de los rayos desdoblados con gran diferencia de marcha.

La parte superior de la fig. 2.9 explica la técnica de obtención de un holograma. El objeto observado se ilumina con un rayo de láser ancho y poco intenso (para no perjudicar el objeto). Un mismo rayo se disipa por el objeto y se refleja por el espejo que es la llamada onda de referencia. Las dos se superponen. Tiene lugar la interferencia rayo cuando se fija por la placa fotográfica.

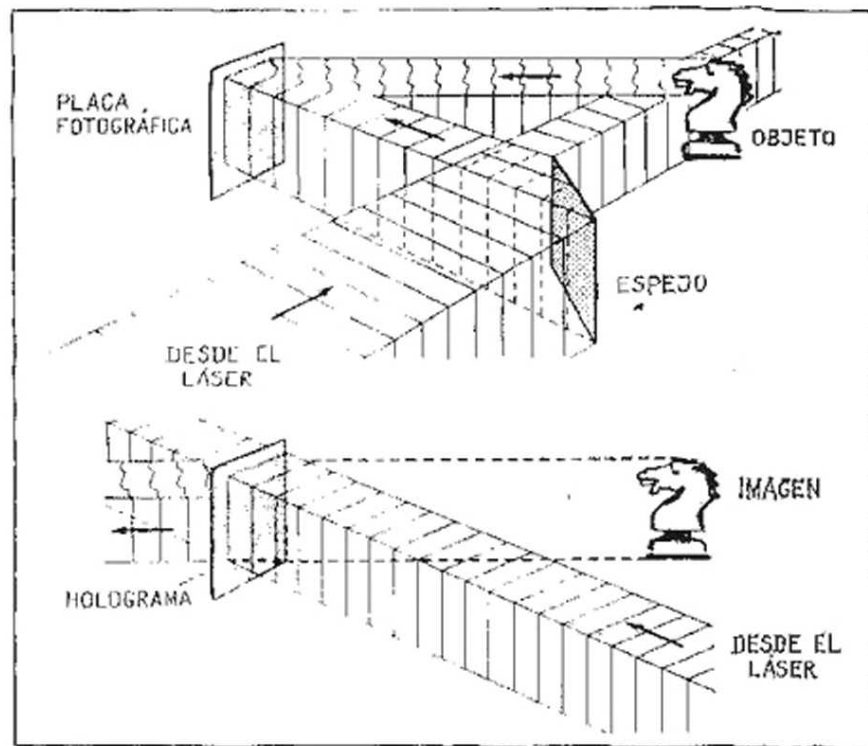


Figura 2.9

Echen una mirada a la fig. 2.10. En la parte superior se representa el objeto y por debajo de éste su «imagen». No, no nos hemos equivocado: esta compleja

combinación de anillos oscuros y claros llamada holograma, es, efectivamente, una imagen del objeto, mas una imagen latente.

El holograma contiene una información completa sobre el objeto, o, más exactamente, los datos completos sobre la onda electromagnética disipada por las piezas de ajedrez. Una fotografía no contiene semejantes datos omnímodos. La mejor de las fotos transmite con exactitud todos los datos sobre la intensidad de los rayos disipados.

Sin embargo, la onda disipada por cualquier punto del objeto se caracteriza plenamente no sólo por su intensidad (amplitud), sino también por su fase.

El holograma es un cuadro interferencial, y carta neta de sus líneas claras y oscuras nos informa no únicamente sobre la intensidad, sino también sobre la fase de los rayos llegados del objeto a los puntos correspondientes de la placa fotográfica.

El holograma, al igual que cualquier placa fotográfica, se revela, se fija y se conserva tanto tiempo como se quiera.

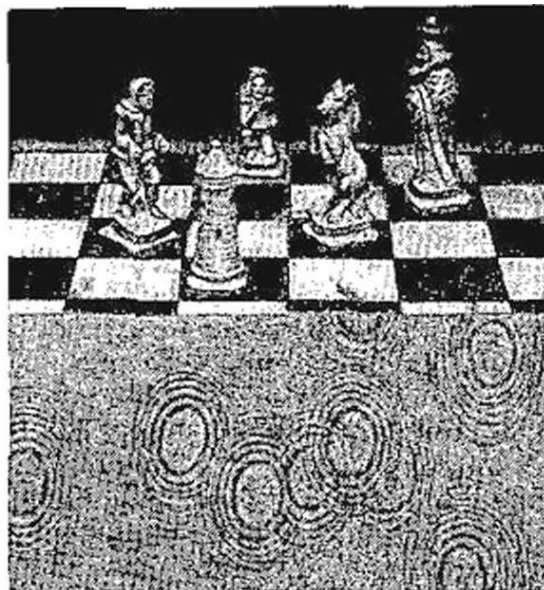


Figura 2.10

Cuando tengamos ganas de admirar el objeto «holografiados», irradiaremos, como se muestra en la parte inferior de la fig. 2.9, el holograma con la luz del mismo láser, restableciendo la disposición geométrica que tenía lugar durante la toma de la foto, o sea, dirigiremos el rayo de láser de la misma forma como iba el rayo

reflejado del espejo. En este caso, en el lugar donde se encontraba el objeto aparecerá su imagen que, en condiciones ideales, representará un cuadro idéntico a aquel que había visto el ojo.

No podemos tratar sobre la teoría de obtención del holograma. La idea principal consiste en que al iluminar el holograma se engendran ondas de dispersión, con amplitud y fase idénticas a aquellas que crearon este holograma. Dichas ondas se unen en un frente de ondas idéntico a aquel que formó el holograma. Tiene lugar una reconstrucción original de la onda, si el holograma se ilumina en las mismas condiciones en que se iluminaba el objeto. Gracias a esta circunstancia se crea la imagen del objeto.

Las investigaciones en el campo de holografía prosiguen. Hoy en día existe la posibilidad de obtener imágenes en color. Es posible mejorar los resultados tomando varios hologramas desde diferentes posiciones. Por fin (y esto es, acaso, lo más importante), resulta que se puede examinar los hologramas sin recurrir al láser.

Hay libros que examinan el objeto de holografía detalladamente. La holografía merece que se le preste atención por la razón de que es un método de gran capacidad para almacenar la información tridimensional sobre el objeto. En este ámbito la última palabra todavía no se ha pronunciado, y el futuro mostrará en qué medida la holografía se implantará en la vida cotidiana y en la técnica.

Capítulo 3

Radiación electromagnética dura

Contenido:

- *Descubrimiento de los rayos X*
- *Análisis estructural por difracción de rayos x*
- *Espectro de los rayos X*
- *Radiografía de los materiales*

Descubrimiento de los rayos X

A los rayos X corresponde la radiación que ocupa la porción del espectro electromagnético desde varias decenas hasta centésimas partes de manómetro. Rayos más duros, es decir, de longitud de onda más corta, se denominan rayos gamma.

Como ya hemos señalado, los nombres de las porciones del espectro electromagnético son bastante convencionales. Al emplear uno u otro término no nos guiamos tanto por el valor de la longitud de onda, como nos atenemos al carácter de la fuente de radiación. En la mayoría de los casos, el término «rayos X» se aplica a la radiación que surge al chocar el flujo de electrones contra un obstáculo.

Guillermo Conrado Roentgen (1845-1923) descubrió este tipo de radiación el 8 de noviembre de 1895. En aquellos años muchos físicos del mundo investigaban los flujos de electrones que aparecían en tubos de vidrio bombeados (algunos de estos tubos se representaron en la fig. 2.6 del libro 3). En un recipiente se soldaban dos electrodos. A éstos se suministraba alta tensión. Hace bastante tiempo se sospechaba que desde el cátodo de semejante tubo se propagaban ciertas rayas. Ya en los albores del siglo XIX diferentes investigadores observaban destellos en el interior del tubo y la luminiscencia del vidrio. Los experimentos de Guillermo Hittorf (1824-1914) y de Guillermo Crookes (1832-1919) demostraron con plena claridad que se trataba de unos rayos. En todos los libros de texto se publicó la fotografía del tubo de Crookes con la cruz: el científico inglés creó este tubo en 1879, diez

años después de Hittorf. La cruz proyectaba sobre el vidrio una sombra bien visible. Este elegante experimento demostraba que desde el cátodo partían ciertos rayos y éstos se propagaban en línea recta. Cuando los rayos incidían sobre el vidrio éste fosforecía, mientras que la fina capa de metal absorbía la radiación.

El hecho de que los rayos catódicos no son sino el flujo de electrones lo demostró en 1897 J. J. Thomson. Valiéndose del método cuya exposición se da en el libro 3, logró determinar la relación entre la carga y la masa del electrón. Transcurrieron otros 10 ó 15 años y quedó claro que el electrón resulta ser una partícula pequeñísima de electricidad.

Pero nos repetimos y apartamos de la materia. Ahora nos interesa el descubrimiento hecho por Roentgen. Sin embargo, con esta repetición quisiéramos subrayar que el descubrimiento de Roentgen se anticipaba a la comprensión de la naturaleza de los rayos procedentes del cátodo. Hablando con propiedad, precisamente debido a la falta de claridad en este campo, Roentgen trabajó con diferentes tubos que se distinguían por la disposición mutua de los lugares de soldadura de los electrodos y la forma de la envoltura de vidrio.

Se conocen bien los más insignificantes pormenores de los acontecimientos de la tarde del 8 de noviembre de 1895. Roentgen echó sobre el tubo un trozo de tela negra, apagó la luz en la habitación y se preparó para ir a casa, olvidando desconectar el interruptor. Al echar una mirada al aparato con que trabajó, el científico prestó atención a que centelleaba la pantalla con cianuro de bario que se encontraba junto al tulio y poseía la rapacidad de luminiscencia, Roentgen regresó y desconectó el interruptor; al centelleo desapareció. Conectó el interruptor otra vez, la pantalla volvió a centellear. El físico sabía que en el tubo de aquella construcción los rayos catódicos no podían pasar a través de la tela que lo cubría, salvando, además, una gran capa de aire. Por consiguiente... por consiguiente, se dejó ver una nueva radiación, desconocida hasta aquel entonces.

La primera información sobre su descubrimiento Roentgen la envió a la revista a finales del año. Durante este lapso supo estudiar tan detalladamente las propiedades de los nuevos rayos que, en lo que se refiere a los rayos X, no se descubrió, en esencia, nada nuevo hasta el año 1912 cuando se halló la difracción de los mismos (sobre este temo hablaremos más tarde). El propio Roentgen

denominó la radiación descubierta por él «rayos X», pero en las publicaciones en ruso se da preferencia al nombre de rayos «Roentgen».



Figura 3.1

La propiedad más admirable de los rayos X, la cual Roentgen investigó y comentó en primer lugar, fue su capacidad de pasar a través de los materiales no transparentes para la luz. (La fig. 3.1 nos recuerda que semejantes dibujos chistosos aparecieron en gran cantidad, pasados nada más que dos o tres meses después de las primeras publicaciones de Roentgen.)

La capacidad de penetración de los rayos X presta servicios inapreciables a la medicina. También se ofrece la posibilidad de detectar defectos en los artículos industriales. Los sorprendentes resultados proporcionados por la roentgenografía son la consecuencia del hecho de que las sustancias diferentes por su densidad absorben de distinta forma los rayos X. Cuanto más ligeros son los átomos de la sustancia tanto menos rayos absorben éstos.

Bastante pronto fue establecida que la permeabilidad de los cuerpos respecto a los rayos se acrecienta con el aumento de la tensión en el tubo. Las tensiones que se utilizan habitualmente para las radiografías se encuentran dentro de los límites desde varias decenas hasta varios centenares de kilovoltios.

Al estudiar las propiedades de los rayos X los investigadores establecieron que la causa de su aparición es el frenado del flujo de los electrones por un obstáculo. Es curioso que durante un largo periodo el tubo de Roentgen se haya fabricado con tres electrodos. Frente al cátodo se soldaba el «anticátodo» contra el cual,

precisamente, chocaban los electrones. El ánodo se disponía a un lado. Al cabo de varios años se comprendió que ésta era una complicación innecesaria, de modo que, actualmente, en el tubo se sueldan dos electrodos. El haz de electrones se frena por el ánodo cuya superficie, de ordinario, se hace sesgada. En este caso, el haz de los rayos X se dirige en el sentido correspondiente. Si la superficie del ánodo encuentra el haz electrónico bajo el ángulo recto, los rayos se propagarán del ánodo por todos los lados lo que conducirá a la pérdida de intensidad.

La radiografía por medio de rayos X hizo una verdadera revolución en la industria y, sobre todo, en la medicina. En la actualidad, la técnica radiográfica se ha perfeccionado sumamente. Al cambiar la disposición del objeto estudiado respecto al tubo de rayos X es posible obtener varios cuadros con cuya ayuda no solo se logra establecer la posición del defecto en la proyección, sino también determinar la profundidad en que se encuentra.

Según sean los materiales o tejidos que se someten a la investigación es racional aplicar a veces una radiación más dura (o sea, más penetrante) y, a veces otra, más blanda. La tarea primordial es conseguir el contraste que es necesario para ver el defecto que, por su densidad, se distingue aunque en una medida insignificante del material básico.

La ley de la absorción de los rayos X, al igual que la ley de la absorción de cualquier radiación es bastante evidente. Lo que nos interesa es cómo cambiará la intensidad del rayo (cabe recordar que la intensidad es la energía referida a la unidad de tiempo y la unidad de área) después de pasar a través de una placa de espesor d . Por cuanto escribo este libro para los lectores que no conocen el cálculo integral, me veo obligado a limitarme con la formulación de esta ley para el paso del rayo a través de placas de pequeño espesor. El espesor es «pequeño» en el caso de que la intensidad disminuye de un modo insignificante, digamos, en un 1%. Para este ejemplo la ley resulta ser simple: la parte de la radiación absorbida es directamente proporcional al espesor de la placa. Si la intensidad ha disminuido desde el valor I_0 hasta el valor I , esta sencilla regla se anota de la siguiente forma:

$$\frac{I - I_0}{I} = \mu d$$

El coeficiente de proporcionalidad p , se denomina coeficiente de absorción.

He aquí una simple pregunta que muchas veces ponía en los exámenes: ¿en qué unidades se mide el coeficiente de absorción? No es difícil pensarlo. Las unidades de medida deben ser iguales en ambos miembros de la igualdad. Es una cosa clara. Pues no se puede decir, en modo alguno, qué es más: 10 kg ó 5 m. Se pueden comparar kilogramos con kilogramos, amperios con amperios, ergios con ergios, etc., etc. Por consiguiente, en cualquier igualdad, en ambos miembros deben hallarse números que se expresan en las mismas unidades.

Pero, en el primer miembro de nuestra igualdad está escrita la así llamada magnitud adimensional. Al decir que la parte de absorción de la radiación es igual a $1/30$ ó $0,08$, hemos dicho con ello todo. Las unidades de medida se «redujeron» al dividir la intensidad por la intensidad. Mas siendo así, también en el segundo miembro de la igualdad debe hallarse una magnitud adimensional. Por cuanto los espesores se miden en centímetros (u otras unidades de longitud), el coeficiente de absorción se expresa en centímetros inversos, es decir, en cm^{-1} .

Supongamos que el rayo pasa a través de una placa de 10 cm de espesor, perdiendo tan solo 1% de intensidad. El primer miembro de la igualdad resulta ser de $1/100$. En consecuencia, en este ejemplo el coeficiente de absorción es igual a $0,001 \text{ cm}^{-1}$. Ahora bien, si los rayos son blandos y pierden 1% de energía al atravesar apenas una hoja de un micrómetro ($0,0001 \text{ cm}$) de espesor, entonces, el coeficiente de absorción será igual a 100 cm^{-1} .

Los físicos no disponen de una buena teoría para establecer la fórmula del coeficiente de absorción. Sólo indicaré que el coeficiente de absorción es proporcional, aproximadamente, al cubo de longitud de onda de la radiación de Roentgen y al cubo del número atómico de la sustancia a través de la cual pasa el rayo.

Por cuanto las longitudes de onda de los rayos X son muy pequeñas, resulta que las frecuencias de oscilación de las ondas electromagnéticas son grandes. Esta circunstancia significa que el cuanto $h\nu$ de radiación de Roentgen porta una gran energía. Esta energía no sólo es suficiente para las reacciones químicas que provocan el ennegrecimiento de la emulsión de la placa fotográfica y producen el

centelleo de las pantallas fosforescentes (los rayos luminosos también son capaces de hacerlo), sino que basta, de sobra, para destruir, además, las moléculas. En otras palabras, los rayos X ionizan el aire y otros medios a través de los cuales pasan.

Ahora cabe decir varias palabras acerca de los rayos gamma. Este término se utiliza cuando se trata de una radiación de onda corta que surge durante la desintegración radiactiva. Adelantándonos, diremos que los rayos gamma emanan de las sustancias radiactivas naturales, así como se engendran por los elementos artificiales. Por supuesto, en un reactor nuclear se crea la radiación gamma. Rayos gamma fuertes y muy duros aparecen durante la explosión de la bomba atómica.

Debido a que los rayos gamma pueden tener una longitud de onda muy pequeña, el coeficiente de su absorción también puede ser muy pequeño. Así, por ejemplo, los rayos gamma que se emiten durante la desintegración del cobalto radiactivo son capaces de penetrar a través de decenas de centímetros de acero.

La radiación electromagnética de onda corta capaz de destruir moléculas, en dosis considerables resulta ser muy peligrosa para el organismo. Esta es la razón de que se necesita protección contra los rayos X y gamma. En la mayoría de los casos con este se utiliza plomo. Las paredes de los gabinetes de radiología se recubren de enlucido especial que contiene átomos de bario.

Los rayos gamma, al igual que los rayos X, pueden utilizarse para la radiografía. Habitualmente, se recurre a los rayos gamma de las sustancias radiactivas que no son sino «ceniza» del combustible nuclear. Su ventaja, en comparación con los rayos X, es la mayor capacidad de penetración, y, además, y esto es lo principal, dan la posibilidad de utilizar como fuente de radiación una pequeña ampolla que puede situarse en los lugares inaccesibles para el tubo de rayos X.

Análisis estructural por difracción de rayos X

En 1912 Roentgen fue catedrático de física en la Universidad de Munich. En su cátedra se discutían de una manera incansable los problemas concernientes a la naturaleza de los rayos X. Cabe señalar que Roentgen, siendo él mismo físico experimentador, tenía en gran estima la teoría. En la cátedra de física de la

Universidad de Munich colaboraban muchos teóricos talentosos los cuales se devanaban los sesos tratando de comprender qué representan los rayos X.

Se sobreentiende que se hacían intentos de esclarecer la naturaleza de los rayos X investigando su paso a través de una red de difracción. Recordemos al lector qué es la red de difracción con cuya ayuda se demuestra unívocamente la naturaleza ondulatoria de la luz y, además, se determina con suma precisión la longitud de onda de tal o cual radiación.

Uno de los métodos de preparación de esta red consiste en que en una placa de vidrio cubierta con una capa de aluminio se hacen estrías por medio de una cuchilla blanda de marfil, empleando máquinas especiales. Las distancias entre las estrías deben ser estrictamente iguales. Una buena red debe poseer un pequeño periodo (el ancho total de la rendija y del espacio no transparente) y gran cantidad de estrías. Se logra llevar esta cantidad a centenares de miles, con la particularidad de que a 1 mm corresponden más de mil estrías.

Mediante una lente se consigue que una fuente puntual luminosa de gran intensidad emita un haz paralelo de luz que incida sobre la red formando un ángulo recto. De cada rendija los rayos parten por todos los lados (en otras palabras, cada rendija se convierte en origen de una onda esférica). Sin embargo, solamente en las direcciones elegidas las ondas provenientes de todas las rendijas serán cofásicas. Para la ayuda mutua es necesario que la diferencia de marcha sea igual al número entero de longitudes de onda. Los rayos intensos partirán formando el ángulo en direcciones que se subordinan a la condición

$$a \sin \alpha = n\lambda$$

donde a es un número entero, y n , el periodo de la red. El lector deducirá fácilmente esta fórmula sin la ayuda del autor.

El número entero n se denomina orden del espectro. Si sobre la red incide un rayo monocromático, obtendremos en el plano focal del ocular varias líneas separadas por espacios oscuros. Si la luz se compone de ondas de diferente longitud, entonces, la red crea varios espectros: de órdenes primero, segundo, etc. Cada espectro posterior resultará más dilatado que el anterior.

Por cuanto la longitud de onda luminosa es del mismo orden que la distancia entre las rendijas, las redes de difracción descomponen la luz (y, además, no sólo la luz visible, sino también la ultravioleta y, especialmente bien, la infrarroja) en espectros. Valiéndose de estas redes se puede realizar el análisis espectral detallado.

Sin embargo, cuando se trataba de los rayos X, las redes de difracción se comportaban como un sistema de puertas abiertas. Los rayos X las atravesaban sin desviarse. Se podía suponer que los rayos X son en flujo de partículas. Pero tampoco se prohibía pensar que la radiación de Roentgen es la misma radiación electromagnética que la luz y que sólo la longitud de onda es mucho más corta. Efectivamente, supongamos que λ es muy pequeña. En este caso, resulta que de acuerdo con la condición de la difracción de la red óptica lineal a

$$\sin \alpha = n \lambda$$

todos los n rayos que se dirigen formando ángulos de desviación α , prácticamente se confundirán y la difracción no se advertirá. Pero es imposible preparar una red de difracción con rendijas separadas unas de otras por distancia a igual a millonésimas partes de micrómetro. ¿Cómo proceder entonces?

El físico Max von Laue (1879-1960), ya en el mismo principio de su actividad científica, estaba seguro de que los rayos X representaban una radiación electromagnética. Un cristalógrafo, conocido suyo, con el que conversaba con frecuencia, tenía la firme convicción de que el cristal representa una red tridimensional de átomos. En una de las numerosas pláticas sobre los temas científicos, Laue decidió poner en correspondencia su idea acerca de la naturaleza de los rayos X con la concepción del cristal como red. «¿Y si resulta que las distancias entre los átomos en el cristal y la longitud de onda de los rayos X son magnitudes de un mismo orden?» —pensó Laue.

¿Puede la red tridimensional sustituir la red lineal de rendijas? La respuesta a esta pregunta no fue evidente: sin embargo, Laue decidió hacer una prueba. El primer experimento fue simple al extremo. Se diafragmó un par de rayos X. En el camino de los rayos se colocó un cristal grande y junto con el cristal se situó una placa

fotográfica. Verdad es que no estaba del todo claro dónde poner la placa, por cuanto el cristal no es, ni mucho menos, una red lineal. El lugar para la placa fue elegido inadecuadamente, y durante cierto tiempo el experimento fallaba. Es curioso que la placa fuese llevada a la posición conveniente por casualidad, debido a una equivocación.

Por supuesto, esta casualidad no jugó un papel esencial en el descubrimiento. Es que Laue, paralelamente a los intentos de descubrir el fenómeno en el experimento, se dedicó a elaborar la teoría de este fenómeno. Pronto, logró extender la teoría de la red lineal de difracción al caso tridimensional. De la teoría derivaba que los rayos de difracción aparecerían solamente para algunas orientaciones determinadas del cristal respecto al rayo incidente. De la teoría se infería también que los más intensos debían ser los rayos desviados bajo un ángulo pequeño. De aquí se deducía que la placa fotográfica debía colocarse detrás del cristal, perpendicularmente al rayo incidente.

Entre los primeros que prestaron atención al fenómeno descubierto se encontraron los ingleses: padre e hijo Bragg. El padre se llamaba William Henry y el nombre del hijo era William Lawrence. Ellos, inmediatamente, repitieron el experimento de Laue, dando a su teoría una interpretación muy sencilla y patente, y demostraron en un gran número de simples ejemplos que el descubrimiento de este científico puede utilizarse como método de estudio de la estructura atómica de la sustancia.

Damos a conocer al lector las ideas principales referentes al análisis estructural por difracción de rayos X que emplea también la denominación radiocristalográfico y le expliquemos las nociones del método de determinación de la estructura del cristal, guiándose por el cual pueden medirse las distancias entre los átomos con mucha precisión hasta de una centésima de ångström, así como puede representarse el cuadro de disposición espacial de los átomos en la molécula y esclarecerse el carácter del empaquetamiento de las moléculas en el cristal.

Supongamos que el cristal se encuentra en un soporte especial y gira alrededor de cierto eje. El rayo X incide formando un ángulo recto con el eje de giro. ¿Qué ocurre en este caso? Examinemos los fenómenos difraccionales que se operan al incidir el rayo X sobre el cristal de tal modo como si el centro de dispersión fuese el nudo de la red.

Los Bragg, padre e hijo, demostraron que la dispersión de los rayos X. por los nudos de la red es equivalente a una reflexión selectiva (es decir, que tiene lugar solamente para ciertos valores discretos del ángulo) peculiar de los rayos desde los sistemas de planos nodales en que puede dividirse la red.

Sea que el rayo que es una onda electromagnética de determinada longitud incide sobre el cristal, formando cierto ángulo con éste. Para distintos sistemas de planos este ángulo será diferente. Tenemos pleno derecho de suponer que cualquier plano atómico reflejara la onda de rayos X de acuerdo con la ley: el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. Sin embargo, existe una diferencia esencial respecto al rayo óptico. El rayo X, a diferencia de la luz, penetra profundamente en el seno del cristal. Esto significa que la reflexión del rayo tendrá lugar no sólo desde la superficie exterior, sino también de todos los planos atómicos.

Examinemos una de tales sistemas de planos que se caracterizan por la distancia interplanar d . Cada uno de éstos «reflejará» el rayo incidente bajo el mismo ángulo θ . Estos rayos reflejados, deben interferir entre sí, y un intenso rayo secundario podrá engendrarse sólo en el caso de que los rayos reflejados de todos los planos de la familia se propaguen en una fase. En otras palabras, la diferencia de marcha entre los rayos debe ser igual al número entero de longitudes de onda.

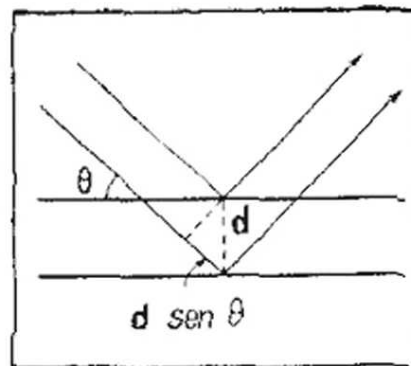


Figura 3.2

En la fig. 3.2 se ha hecho una construcción geométrica de la cual se infiere que la diferencia de marcha entre los rayos reflejados vecinos es igual

$$2d \sin \Theta$$

Por consiguiente, la condición de difracción tendrá la siguiente forma:

$$2d \sin \Theta = n\lambda$$

Simultáneamente con los Bragg llegó a esta fórmula el cristalógrafo ruso G. V. Wulff por cuya razón la misma lleva el nombre de ecuación de Bragg—Wulff (sería más lógico llamarlas ecuación de los Bragg y Wulff, pero está adoptada la primera denominación).

El cristal puede dividirse en sistemas de planos por un número de procedimientos tan grande como su quiera. Sin embargo, resultará eficaz para la reflexión tan sólo el sistema con tal distancia interplanar y tal orientación respecto al rayo incidente para las cuales se cumpla la ecuación de Bragg-Wulff.

Es evidente que, si el rayo es monocromático (es decir, la onda electromagnética tiene una longitud determinada), para una posición arbitraria del cristal respecto al rayo, la reflexión puede no tener lugar. Pero, al hacer girar el cristal, podemos, por turno, poner en posición de reflexión diferentes sistemas de planos. Precisamente este método de trabajo resultó ser el más adecuado para los fines prácticos.

En lo que se refiere al experimento de Laue, su éxito estaba predeterminado por el hecho de que sobre el cristal incidía el «espectro blanco» de los rayos X., es decir, un flujo de ondas cuyas longitudes estaban distribuidas de una forma continua en cierto intervalo (véase a continuación). Esta es la causa de que, aunque en el experimento de Laue, el cristal era inmóvil, los diferentes sistemas de planos resultaron en la posición de «reflexión» para las ondas de distinta longitud.

Hoy en día, el análisis estructural por difracción de rayos X está automatizado por completo. Un pequeño cristal (de 0,9 a 1 mm) se fija en un cabezal especial que puede hacer girar dicho cristal siguiendo el programa dado, colocando en la posición de reflexión uno tras otro todos los sistemas de planos. Cada plano reflector (así se dice para abreviar, con el fin de evitar la constante repetición de la palabra «sistema») viene caracterizado, en primer término, por su distancia interplanar, en segundo término, por los ángulos que forma con los ejes de la celdilla unidad del

cristal (ante todo se miden las longitudes de las aristas y los ángulos entre las aristas de la celdilla y estas mediciones también se realiza automáticamente) y, en tercer término, por la intensidad del rayo reflejado.

Cuanto más átomos contiene la molécula tanto mayores son, naturalmente, las dimensiones de la celdilla unidad.

Junto con esta complejidad crece también el volumen de la información. Es que el número de los planos reflectores será tanto mayor cuanto mayor sea la celdilla. El número de las reflexiones medidas puede oscilar desde varias decenas hasta varios miles.

Hemos prometido dar a conocer al lector las ideas principales del análisis estructural por difracción de rayos X. Primero, por decirlo así, volvamos del revés el problema. Supongamos que la estructura del cristal se conoce en todos sus detalles. Esto quiere decir que sabemos el dibujo de los átomos, o sea, disponemos de datos sobre las coordenadas de todos los átomos que forman la celdilla unidad (renueven, por favor, en su memoria los datos sobre la estructura del cristal que hemos dado en el libro 2). Examinemos cualquier sistema de planos reflectores. Queda bastante evidente lo siguiente. Si la mayoría de los átomos del cristal corresponde a los planos que pasen a través de los nudos de la red, todos los rayos se dispersarán los rayos X en una fase. Se engendrará un rayo reflector intenso. Ahora figúrense otro caso. Una mitad de los átomos cae sobre los planos nodales y otra mitad se encuentra precisamente en el medio entre los planos reflectores. Entonces, una mitad de los átomos dispersa el rayo incidente en una fase, y la otra mitad lo hace en fase opuesta. ¡Y no habrá reflexión!

Estos son dos casos extremos. En los demás casos obtendremos rayos de diversa intensidad. El instrumento de medida, este se denomina difractómetro automático, es capaz de medir las intensidades de reflexión que se diferencian diez mil veces.

La intensidad del rayo está relacionada unívocamente con la disposición de los átomos entre los planos nodales. La fórmula que pone de manifiesto esta relación es demasiado compleja para que la citemos. Además, esto no hace falta. Lo expuesto con anterioridad respecto a los dos casos extremos es suficiente para que el lector dé crédito a la existencia de la fórmula en la cual la intensidad viene representada en función de coordenadas de la totalidad de los átomos. Esta fórmula también

toma en consideración la clase de los átomos, pues cuantos más electrones posee el átomo, con tanta mayor fuerza dispersa este los rayos X.

Por supuesto, en la fórmula que relaciona la estructura y la intensidad del rayo reflejado entran también los datos acerca del plano reflector, así como acerca de las dimensiones de la celdilla unidad. Podemos escribir tantas ecuaciones de esto tipo cuantas reflexiones se han medido.

Si la estructura se conoce, entonces, las intensidades de todos los rayos pueden calcularse y compararse con el experimento. ¡Pero éste no es el problema que tenemos que resolver! Tenemos que enfrentarnos con el problema inverso: por los datos sobre las intensidades de varias decenas o centenas, o bien de miles de reflexiones hallar las coordenadas de todos los átomos en la celdilla. A primera vista, puede parecer que, teniendo en cuenta las posibilidades que ofrecen actualmente los ordenadores no existe dificultad especial alguna en la resolución de este problema inverso. ¿Muchas ecuaciones? ¡Qué va! ¡La computadora sabrá hallar la resolución!

No obstante, el asunto dista mucho de ser tan simple. Los datos experimentales son las intensidades de los rayos. La intensidad es proporcional al cuadrado de amplitud. La fórmula de la relación de que hemos hablado es, en esencia, la fórmula de interferencia. Las ondas dispersadas por los átomos del cristal interfieren entre sí. Tiene lugar la adición de las amplitudes de las ondas dispersadas por todos los átomos. Se calcula la amplitud total, y la intensidad se halla elevando la amplitud al cuadrado. No cuesta trabajo alguno resolver semejante problema. Más, ¿cómo resolver el inverso? ¿Extraer la raíz cuadrada de la intensidad con el fin de obtener la amplitud? Si, es cierto. ¡Pero es que la raíz cuadrada lleva dos signos!

Espero que el lector comience a comprender lo complejo del problema. Ecuaciones de las cuales podemos hallar las coordenadas de los átomos las tenemos más que de sobra, .Pero, en el segundo miembro de la ecuación se encuentran números que conocemos con la exactitud de hasta el signo.

Al parecer, el asunto no tenía remedio. En efecto, al principio, los investigadores ni siquiera trataban de resolver el problema inverso. Procedían recurriendo al método de «pruebas y errores». Basándose en los datos sobre estructuras similares, adoptaban que la estructura desconocida debía tener precisamente tal aspecto.

Calculaban las intensidades de una decena de rayos y comparaban el resultado con los datos del experimento. ¿Qué no hay nada parecido? No importa, adoptemos otro modelo de la estructura.

Para los casos simples, dicho modo de abordar el problema, aunque con dificultad, proporcionaba, a pesar de todo, resultados correctos. Sin embargo cuando los «estructuralistas» (así llamaban en el argot científico a este grupo de investigadores) habían consumado, prácticamente, el estudio de todas las estructuras simples, tuvieron que recapacitar con enjundia la posibilidad de resolver el problema inverso.

A mediarlos de los años treinta se les ocurrió que podían «resolverse» (otra vez recurro al argot) incluso las estructuras complejas si se limitaban a estudiar aquellas moléculas que contenían gran número de átomos ligeros y un átomo pesado. El átomo pesado encierra muchos electrones y dispersa los rayos X con mucha mayor fuerza que los ligeros. Por lo tanto, en la primera y burda aproximación se puede considerar que el cristal consta tan sólo de átomos pesados. Si en la celdilla no hay más que un átomo, no costará trabajo determinar las coordenadas por el método de «pruebas y errores». Entonces hallaremos las coordenadas de este átomo y suponiendo que solamente éste manda en el cristal, haremos la conjetura que los signos de las amplitudes determinados para la estructura ficticia constituida tan solo por átomos pesados son los mismos que para la estructura real.

Un descubrimiento importantísimo que cuenta ya con más de cuatro lustros de vida resultó ser el teorema sobre la existencia de una relación entre las amplitudes de reflexión de diferentes familias de planos. Así por ejemplo, están relacionados entre sí los signos de las amplitudes de tres reflexiones desfasadas respecto al nodo de la celdilla en magnitudes de reflexión de diferentes familias de planos. Así, por ejemplo, están relacionados entre sí los signos de las amplitudes de tres reflexiones desfasadas respecto al nodo de la celdilla en magnitudes α , β y $\alpha + \beta$. Resulta que en el caso de que el producto

$$\cos \alpha \cos \beta \cos (\alpha + \beta)$$

supera $1/8$ por su valor absoluto, este, indispensablemente, lleva el signo positivo. El lector puede comprobarlo.

El desarrollo de esta idea condujo a los llamados métodos directos del análisis estructural. Incluso en los casos bastante complicados el instrumento experimental puede agruparse con un ordenador y la máquina «sacará a la superficie» la estructura del cristal.

Cuando los signos de las amplitudes de reflexión se hayan establecido, la determinación de las coordenadas de los átomos se convierte, como ya se ha señalado, en problema de resolución de gran cantidad de ecuaciones con muchas incógnitas. En este caso tiene gran importancia que el número de ecuaciones supere, por lo menos, 10 veces o, mejor aún, cien veces el de coordenadas de átomos que se deben determinar.

No voy a exponer la técnica de solución de este sistema de ecuaciones. Se recurre al rodeo, y este y este camino se reduce a la construcción de las llamadas series de Fourier de densidad electrónica. Lamentablemente, la teoría de las series de Fourier y, además, con arreglo al problema de determinación de la estructura, puede exponerse tan sólo a un lector con preparación especial. Sin embargo, me parece que ni siquiera es necesario hacerlo. A medida de mis fuerzas he cumplido mi tarea, o sea, explicado la esencia del método.

¿En qué forma entrega el físico, especialista en el campo del análisis estructural por difracción de rayos X—los datos acerca de la estructura de la sustancia que necesita el químico? Permite formar idea sobre ello la fig. 3.3 en que se representa una estructura muy simple de la sustancia denominada barbiturato de amonio. Actualmente, la determinación de una estructura que por su complejidad no supera la mostrada es una tarea «para niños». Semejante estructura el autómatas la interpretará sin participación cualquiera del investigador. El ordenador puede también entregar el resultado en forma de números (valores de las coordenadas de los átomos), así como en forma de cuadros .parecidos al insertado. Los átomos de distintas clases químicas se designan con circuitos de diversos tamaños. Pero, si el investigador lo quiere, el ordenador proporcionara el cuadro de la densidad electrónica. Cada átomo se representa del mismo modo como los geógrafos contornean con líneas de iguales alturas los picos de las montañas. La diferencia

consiste en que en nuestro caso las líneas cerradas no representan las alturas, sino curvas que indican la densidad de los electrones en el lugar dado, y la cumbre del «pico montañoso» es el centro del átomo.

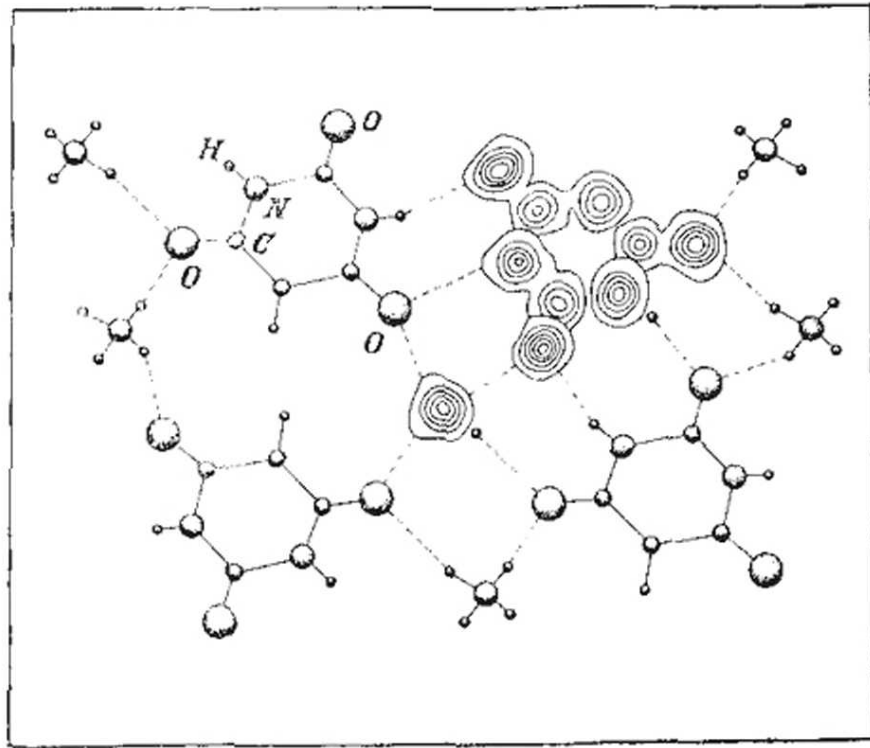


Figura 3.3

La figura mostrada representa una minúscula parte de la aportación que el método descrito por nosotros hizo en la ciencia. El éxito de este método es muy grande. Para la fecha se han determinado las estructuras de más de 15,000 cristales, incluyendo varias decenas de estructuras de proteínas cuya molécula consta en de muchos millares de átomos.

La determinación de la estructura de moléculas complejas proporciona los fundamentos de la química biológica y de la física biológica. Dichas ciencias, actualmente, viven un período tempestuoso de su desarrollo. De estas se espera el descubrimiento de los secretos de la vida, de las enfermedades y de la muerte.

El análisis estructural por difracción de rayos X, a pesar de su imponente edad septuagenaria, sigue manteniéndose en la posición avanzada del frente de la ciencia.

Espectro de los rayos X

En el párrafo anterior hemos mencionado, de paso, que es posible encontrarse con el espectro «blanco» y con el rayo monocromático. ¿De qué modo puede esclarecerse el carácter del espectro de la radiación electromagnética dura? ¿En qué ocasiones esta es blanca y en qué monocromáticas?

Si se diafragman los rayos X o los rayos gamma que parten de cualquier fuente (es decir, si se ponen en el camino de la radiación dos obturadores con pequeños orificios), obligando a incidir el haz sobre un cristal, entonces, en el caso más general, se engendrarán varios rayos reflejados de los planos que se encuentran en la posición que satisfacen la ecuación de Bragg-Wulff. Si el cristal se dispone de tal manera que alguno de sus planos (que da una fuerte reflexión) coincida con el eje de giro del instrumento especial (espectrógrafo de rayos X.), haciendo girar, luego, el cristal de tal manera que este plano se sitúe bajo el rayo incidente formando, consecutivamente, todos los ángulos Θ , entonces, para cada posición del cristal. se reflejará la componente del espectro de longitud determinada de onda. Esta onda reflejada la podemos «captar» ya sea con la ayuda del coprador de ionización, o bien, «cazando» el rayo en la película fotográfica. Este método permite, en primer lugar, crear un rayo monocromático de cualquier longitud de onda que se contiene en el espectro de radiación y, en segundo lugar, investigar el espectro de cualquier radiación.

En la fig. 3.4 se representa el espectro típico del tubo de rayos X con el ánodo de molibdeno (la atención es de 35 KV). De un modo inmediato, se puede llegar a la conclusión de que existen ciertas dos causas que llevan a la creación del espectro de rayos X. En efecto, vemos que el espectro observado no es sino una superposición de los picos agudos sobre la curva continua. Está claro que el origen de estos picos se diferencia del de la curva continua.

Inmediatamente después de que había sido descubierto el fenómeno de difracción de los rayos X comenzaron las investigaciones de los espectros de estos rayos. Fue

establecido lo siguiente. El espectro continuo no es característico para el material del ánodo y depende de la tensión. Su particularidad consiste en que se interrumpe de manera brusca para cierta longitud mínima de onda. En el sentido de ondas largas, al pasar por el máximo, la curva desciende suavemente y no se ve el «fin» del espectro.

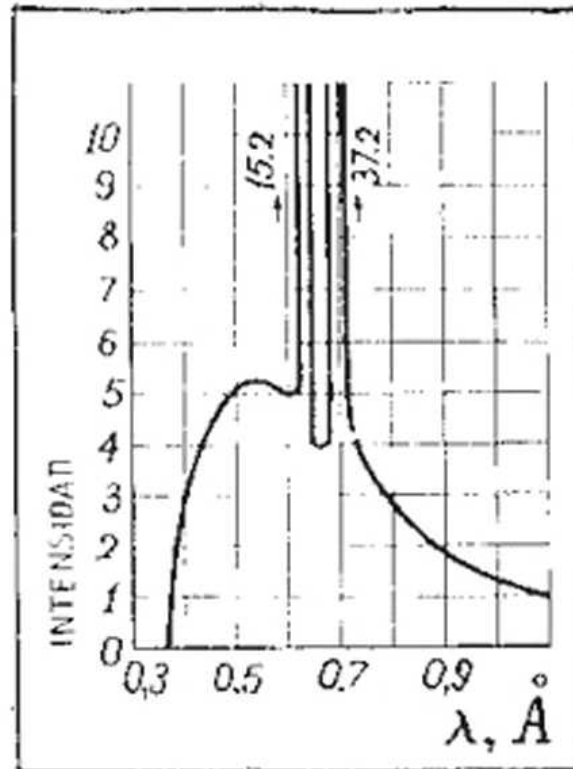


Figura 3.4

Aumentando la tensión en el tubo de rayos X, los investigadores demostraron que la intensidad del espectro continuo incrementa y la frontera se desplaza en el sentido de ondas cortas. Al mismo tiempo quedó establecida la siguiente igualdad muy sencilla para la longitud límite de onda

$$\lambda_{\text{min}} = \frac{12,34}{U}$$

En el lenguaje cuántico la regla obtenida se formula sin dificultad. La magnitud eU es la energía que acumula el electrón en su recorrido desde el cátodo hacia el ánodo. Es natural que el electrón no sea capaz de entregar más energía que esta magnitud. Si éste entregara toda su energía para la creación del cuanto de rayos X ($eU = h\nu$), Entonces después de sustituir los valores de las constantes, obtendremos, precisamente, la igualdad anotada anteriormente (λ en ångström, y U en kilovoltios).

Puesto que surge un espectro continuo, de este hecho se desprende que los electrones, no obligatoriamente, entregan toda su energía para crear rayos X. La experiencia demuestra que la mayor parte de energía del haz electrónico se transforma en calor. El rendimiento del tulio de rayos X es muy bajo. El ánodo se calienta de una manera fuerte, de modo que es necesario enfriarlo con un flujo de agua que se suministra al interior del mismo.

¿Existe una teoría que explica la aparición del espectro continuo de los rayos X? Si, existe. Los cálculos que, lamentablemente, no podemos exponer, demuestran que de las leyes generales del campo electromagnético (de las ecuaciones de Maxwell) sobre las cuales hemos hablado en el libro 3, se deduce de una forma estricta el siguiente hecho; si los electrones se frenan, esto conduce al surgimiento de un espectro continuo de rayos X. La colisión con un cuerpo sólido es una circunstancia no esencial. Los electrones pueden frenarse por medio de un anticampo obteniéndose la radiación de rayos X continua, sin que en este juego participe el ánodo material.

Existe también otra posibilidad de encontrarse con el espectro continuo de rayos X. Recordamos que el espectro electromagnético continuo se emite por cuerpos incandescentes. En las condiciones terrestres no se nos ofrece la oportunidad de ver el espectro de semejante origen, ya que para la más alta temperatura del cuerpo incandescente (varios mil kelvin, y no hay cuerpo sólido alguno que pueda soportar temperaturas mayores) la longitud de onda de la radiación térmica será próxima a medio micrómetro. Pero no se debe olvidar la existencia del plasma. En el plasma artificial creado en las condiciones terrestres, como asimismo en las estrellas, pueden obtenerse temperaturas iguales a millones de kelvin. En este caso el espectro térmico de la radiación electromagnética abarcara también a los rayos X.

Los rayos X llegados del espacio cósmico ayudan a resolver los sugestivos problemas de la astrofísica.

Pasemos ahora a la conversación sobre los picos agudos superpuestos a la curva del espectro continuo.

En lo referente a estos rayos se ha demostrado precisamente la regla inversa, inversa respecto a la ley del espectro continuo. Los puntos en que se encuentran los picos, o sea, sus longitudes de onda, se determinan unívocamente por el material del ánodo. Por esta razón dicha radiación lleva el nombre de característica.

Su origen se explica, de modo no preconcebido, mediante el modelo cuántico del átomo. Los rayos electrónicos del tubo de rayos X son capaces de penetrar en el interior del átomo de la sustancia del ánodo y arrancar a éste, electrones que se encuentran en los niveles de energía más bajos. Apenas se libera un nivel bajo de éste pasa alguno de los electrones más alejado del centro del átomo. Tiene lugar la radiación de energía en correspondencia con la ley cuántica principal

$$E_m - E_n = h\nu$$

Para diferentes átomos la disposición de los niveles de energía es distinta. De aquí resulta natural que los espectros que aparecen sean característicos.

Por cuanto las líneas del espectro característico son las más intensas, éstas, precisamente, se utilizan para el análisis estructural por difracción de rayos X. Lo mejor es «tamizar» el espectro continuo, es decir, reflejarlo del cristal monocromador antes de haber obligado a incidir el rayo sobre el cristal que se estudia.

Como quiera que los espectros de diferentes elementos son característicos, resulta que la descomposición del rayo en espectro puede aprovecharse para los fines del análisis químico. Dicho análisis se denomina radioespectral. Se da toda una serie de esferas, por ejemplo, el estudio de los elementos de las tierras raras, en que el análisis estructural por difracción de rayos X es, literalmente, insustituible. Las intensidades de las líneas características espectrales de rayos X permiten determinar, con gran precisión, el contenido porcentual de tal o cual elemento en la mezcla.

Nos resta decir varias palabras sobre los espectros de los rayos gamma. En las condiciones terrestres nos encontramos con los rayos gamma que se engendran durante la desintegración radiactiva de la que hablaremos más tarde. La desintegración radioactiva a veces puede acompañarse, y a veces no, de radiación gamma. Pero, cualquiera que sea el tipo de la desintegración radiactiva, el espectro de la radiación gamma será el característico.

Si bien los rayos X característicos surgen cuando el átomo desciende desde el nivel de biología superior al inferior, los rayos gamma se engendran como resultado de la transición análoga del núcleo atómico.

Los espectros gamma de las transformaciones radiactivas son bien estudiados. Existen tablas en las cuales se pueden encontrar datos exactos sobre la longitud de onda de los rayos gamma que se engendran durante la transmutación α o β de tal o cual isótopo radioactivo

Radiografía de los materiales

Me veo obligado a repetir reiteradas veces que en lo que se refiere a la terminología los asuntos de la ciencia no van del todo bien. La ciencia avanza a paso tan acelerado que el contenido atribuido a una u otra palabra cambia ante los ojos de una sola generación. Al mismo tiempo, la modificación de la terminología está relacionada con la destrucción de lo acostumbrado. Es posible eliminar de las curaciones los libros viejos. De este modo, lo único que se puede hacer es estipular estrictamente el sentido que se le da al término.

Hoy en día, cuando se trata del análisis estructural por difracción de rayos X se tiene en cuenta la investigación de la estructura atómica de los cristales. El objeto del estudio es el monocristal de la sustancia.

Sin embargo, el provecho que se saca del estudio de la estructura con ayuda de los rayos X está lejos de agotarse por la solución de este problema. Los cuadros característicos y ricos en información se obtienen también en el caso de que se tomen «roentgenogramas» o «radiografía».

Si interpondremos en el camino del rayo X monocromático un trocito de hoja metálica, entonces, en la placa fotográfica plana aparecerá un sistema de

circunferencias concéntricas. Un roentgenograma de este tipo se denomina diagrama de Debye. ¿Cuál es su procedencia?

La mayoría de los cuerpos sólidos consta de pequeños cristales orientados desordenadamente uno respecto a otros. Cuando comienza solidificarse la masa fundida de cierta sustancia, la cristalización se inicia simultáneamente partir de un gran número de puntos. Cada pequeño cristal crece «como le da la gana», y este crecimiento se prolonga hasta el momento en que los cristales no se encuentren.

En cada uno de los pequeños cristales están presentes los mismos sistemas de planos atómicos. El que por su estructura los cristales son idénticos. Centraremos nuestra atención en uno cualquiera de los sistemas de planos con la distancia interplanos d . La cantidad de los diminutos cristales es ingente (habitualmente, las dimensiones lineales del cristal de un cuerpo sólido, según el orden de magnitud, son iguales a una diezmillonésima de centímetro) y, por supuesto, entre éstas habrá unos cuyos planos forman con el rayo incidente el ángulo θ que satisface la condición de Bragg-Wulff. Cada uno de estos pequeños cristales dará una mancha en la placa fotográfica. La imagen la proporcionarán todos los cristales cuyas normales a los planos forman un cono (fig. 3.5).

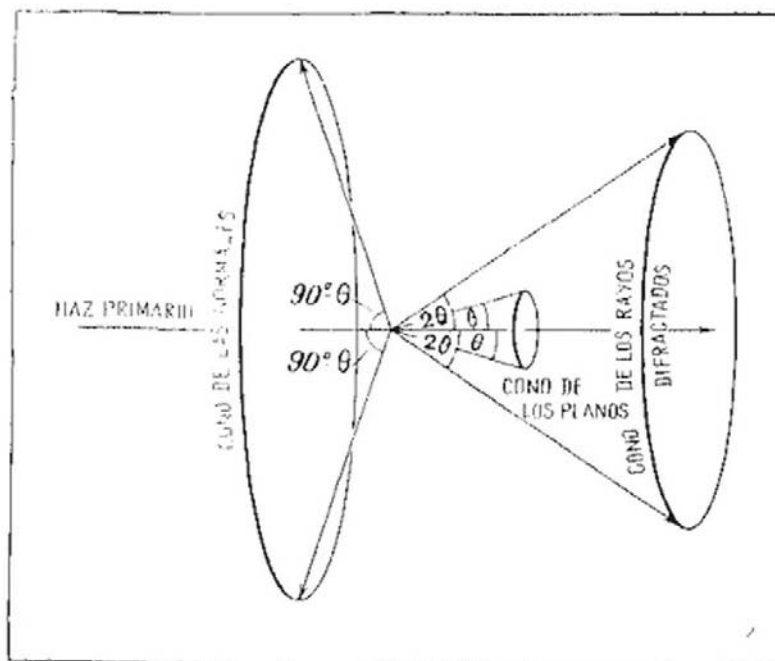


Figura 3.5

Siendo así, también los rayos reflejados caerán sobre el cono. La intersección de este cono con la placa fotográfica dará una circunferencia. Al medir los radios de esa circunferencias, al tiempo que conocemos la distancia desde el objeto hasta la placa fotográfica, hallaremos inmediatamente el ángulo de Bragg Θ y podremos calcular por este roentgenograma todas las distancias interplanares de la sustancia.

Valiéndonos de semejante cuadro de difracción distinguiremos, de una vez, una sustancia amorfa de una cristalina. La sustancia amorfa no tiene planos reflectores. Por eso, no veremos en el roentgenograma el sistema de anillos de difracción nítidos. Ahora bien, en la disposición de las moléculas de una sustancia siempre se tiene cierto orden, por la mera razón de que los átomos no pueden «encaramarse» unos a otros. Esta circunstancia, como se puede demostrar mediante cálculos conduce a que el roentgenograma de una sustancia amorfa aparece uno o, raras veces, dos anillos borrosos.

Sin embargo, los anillos que observamos en los roentgenogramas nos dan, además, una serie de datos valiosos acerca de la estructura de los materiales: metales, polímeros y compuestos naturales. Si la sustancia está constituida por cristalizarse grandes, en este caso el anillo de difracción no será continuo, si no se compondrá de pequeñas manchas aisladas. Si la disposición de los cristalizó no es caótica, sino que éstos están orientados a lo largo de cierto dirige un plano, como suele suceder en los alambres o chapas metálicas, en hilos polímeros y fibras vegetales, los anillos de difracción nos informarán inmediatamente al respecto. No es difícil comprender que, en el caso de existir orientaciones preferente de los cristalizó, las reflexiones de los planos atómicos no llenarán el cono de los rayos de una forma continua. En lugar de anillos veremos en el roentgenograma arcos. En el caso de que la orientación es en alto grado perfecta, estos arcos pueden degenerar en manchas pequeñas. Se sobreentiende que una descripción detallada del carácter de la estructura, basándose en el texto del roentgenograma, no es, ni mucho menos, un problema tan simple como puede parecer. También en este caso desempeñe un papel esencial el método de «pruebas y errores». El investigador inventa modelo de estructura de la sustancia, los cuadros de las reflexiones de los rayos X que

deberían dar los modelos liderados por él y, confrontando el cálculo con el experimento, elige el cuadro correcto de la estructura de la sustancia.

En la radiografía de los materiales, de una forma hasta cierto punto convencional, se diferencia la dispersión bajo ángulos grandes y la bajo ángulos pequeño de la fórmula de Bragg-Wulff que hemos insertado con anterioridad se ve claramente que la dispersión bajo ángulos grandes tiene lugar en el caso de que en la estructura se observa una periodicidad a través de distancias pequeñas, digamos de tres a 10 Å. En cambio, si los rayos X reflejados (o, también se puede decir, dispersados) presentan un cuadro de difracción que se acumula cerca del rayo primario, entonces, esto significa que la estructura posee una periodicidad o a través de distancias grandes.

En metalografía, la más de las veces tenemos que tratar con anillos de difracción dispuestos bajo ángulos grandes por cuanto aquellos constan de cristalitos. Los átomos de los metales forman redes regulares con celdillas cuyas dimensiones tienen el orden de unidades de ångström

En los casos en que como objeto de investigación figuran sustancias constituidas por macromoléculas, y a éstas pertenece una multitud de sustancias naturales, tales como, por ejemplo: la celulosa o el ADN (ácido desoxirribonucleico), como así mismo sustancias polímeras sintéticas cuyos nombres comerciales: polietileno, nylon, kaprón, etc., conoce perfectamente cualquier lector que ni noción tiene acerca de la química, en estos casos tenemos que ver con una circunstancia sumamente interesante. A veces, obtendremos roentgenogramas que nos muestran anillos solamente de gran diámetro, en otras palabras, nos encontraremos con la misma dispersión bajo ángulos grandes que en los metales. En otras ocasiones, no descubriremos anillos de gran diámetro, sin embargo, advertiremos la existencia de rayos de difracción que se desviaron tan sólo de modo insignificante de la dirección primaria, Y, por fin, también son posibles casos en que la sustancia manifiesta la dispersión de rayos X tanto bajo ángulos grandes, como bajo pequeños.

Se denomina habitualmente dispersión bajo ángulos pequeños (otra vez repito que la clasificación de dispersión bajo ángulos pequeños y en la bajo ángulos grandes es hasta cierto punto convencional) aquella que abarca el diapasón desde varios minutos hasta 3 ó 4°. Naturalmente, cuanto menos es el ángulo de difracción, tanto

mayor es el período de repetición de los elementos estructurales que crearon esta difracción.

La dispersión bajo ángulos grandes está condicionada por el orden en la disposición de los átomos en el interior de los cristalitos. Y en lo que concierne a la dispersión bajo ángulos pequeños, ésta está relacionada con la disposición ordenada de formaciones bastante grandes que se denominan *sobremoleculares*. También puede ocurrir que dentro de estas formaciones compuestas de centenares o miles de átomos no existe orden alguno. Pero, si estos sistemas tan grandes forman redes unidimensionales, bidimensionales o bien tridimensionales. Entonces, la dispersión de rayos X bajo ángulos pequeños lo pondrá al descubierto. Con el fin de que el lector pueda formar una idea patente al respecto yo le prepongo figurar una estructura ordenada de sacos con papas. Reviste un interés excepcional ,y, probablemente, tiene un profundo sentido la circunstancia de que nos encontramos con semejante orden «de saco» en muchísimos sistemas biológicos. Por ejemplo, las largas moléculas que forman el tejido muscular están dispuestas de una manera tan ordenada como lapiceros de sección circular en un paquete. Como lo demuestra la dispersión de rayos X bajo ángulos pequeños, topamos con la ordenación extraordinariamente alta de este tipo en las membranas de las células, en tales sistemas proteínicos como los virus, etc.

En la teoría de la difracción existe un interesante teorema que no voy a demostrar, pero que, pero según opino, parecerá natural al lector. Se puede demostrar de una forma rigurosa que el aspecto del cuadro de difracción queda el mismo, si en el objeto que produce la difracción se intercambian de lugar los orificios y los intervalos no transparentes. De vez en cuando, este teorema causa ronchas molestas al investigador. Semejante cosa sucede cuando éste, con igual éxito, puede explicar la dispersión de rayos X tanto por los poros en el seno de la sustancia, como por las inclusiones ajenas. El estudio de los poros, de su tamaño, forma y cantidad por unidad de volumen, reviste gran interés para los prácticos. De estas particularidades de la estructura de las fibras sintéticas depende, en sumo grado, la calidad de su teñido. No es difícil adivinar que una distribución irregular de los poros será causa de su tejido no uniforme. Se obtendrá una tela poco atractiva.

De todo lo expuesto resulta bastante evidente que la radiografía de los materiales no sólo es un método de investigación de la sustancia, sino también método de control técnica de las más diversas producciones.

Capítulo 4

Generalizaciones de la mecánica

Contenido:

- *Mecánica relativista*
- *Partículas cuya velocidad es próxima a la de la luz*
- *Mecánica ondulatoria*
- *El principio de Heisenberg*

Mecánica relativista

La mecánica de Newton cuya exposición hemos dado en el libro 1 es el sumo alcance del genio humano. A base de ésta se calculan los derroteros de los planetas, las trayectorias de los cohetes y el comportamiento de los mecanismos. El desarrollo de la física en el siglo XX demostró que las leyes de la mecánica newtoniana tienen dos restricciones que se convierten en inadecuadas cuando se trata del movimiento de las partículas de masa pequeña; dejan de servirnos en cuerpo y en alma cuando se trata del movimiento de los cuerpos con velocidades próximas a la de la luz. Para las partículas pequeñas la mecánica de Newton se sustituye por la llamada mecánica ondulatoria, y para los cuerpos de movimiento rápido, por la mecánica relativista.

La mecánica clásica también debe hacerse algo más complicada cuando nos encontramos con fuerzas de la gravedad muy grandes. Los campos gravitacionales inconcebiblemente enormes que rigen el comportamiento de algunas estrellas superdensas no nos permiten limitar a aquellas simples fórmulas de la mecánica que hemos conocido en el libro 1. Sin embargo, dejaremos al lado estas variaciones, deteniéndonos un dos generalizaciones más importantes que se deben hacer al examinar el movimiento de las macropartículas y al estudiar los movimientos con las velocidades próximas a la de la luz.

Comencemos por la mecánica relativista. El camino que conduce hacia este notable capítulo de la física lo menos recuerda una carretera recta. No sólo es sinuoso, sino que lo desbrozaron a través de terrenos a parecer completamente distintos. La

historia comienza por el éter. En general, a finales del siglo XIX los físicos reposaban plácidamente. El maestro de Max Planck no le recomendaba dedicarse a la física, ya que esta ciencia, hablando con propiedad, estaba consumada. Tan sólo dos «futilidades» deterioraban algo el aspecto del armonioso edificio: no cuajaba el asunto con la explicación de la radiación del cuerpo negro (después de poner en claro esta «necedad» los físicos llegaron al descubrimiento de los cuantos) y, además, estropeaba el humor el experimentado Michelson. Este experimento, demostrando que la velocidad de la luz no se suma a la velocidad de la Tierra y es igual en todas las direcciones, hizo recapacitar sobre las propiedades del éter.

Había pocos quienes dudasen de la existencia de cierta materia fina cuyas vibraciones son, precisamente, las ondas electromagnéticas. Al cabo de cien años hasta parece asombroso el hecho de que a pesar de un gran número de absurdidades a las que conducía la «hipótesis del éter», la aplastante mayoría de los investigadores y, además, destacados y talentosos, emprendían cualesquiera rodeos e introducían un sinnúmero de suposiciones suplementarias con el único fin de salvar la idea sobre la luz como movimiento de una sustancia invisible.

Había investigadores que se representaban el éter como mar en calma a través del cual se abren el camino los planetas; otros pensaban que el éter puede ser arrastrado, a semejanza de aire, por los cuerpos en movimiento. Por muy extraño que parezca, no había quien sugiere la idea, al parecer evidente, de que las vibraciones de los vectores eléctrico y magnético se operan en tal punto y por esta razón no puedan explicarse por desplazamientos mecánicos. No se sabe de qué modo, pero se ataban los; cabos, se construían teorías en las que se deducían expresiones matemáticas justas desde el punto de vista formal (en éstas figuraba la susodicha raíz cuadrada

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

donde v era la velocidad de movimiento del cuerpo, y c , la velocidad de la luz), mas a las que se daba una interpretación errónea. Fue el experimento de Michelson realizado por primera vez en 1887 el que deparó a los pensadores los mayores

contratiempos. Haciendo uso del interferómetro cuya construcción hemos descrito en el capítulo 2, Michelson demostró que las velocidades de la luz tanto a lo largo, como transversalmente al movimiento de la Tierra por la órbita son prácticamente iguales.

Sin embargo, ni siquiera esto hecho, fatal para la teoría de la existencia del éter, podía convencer a los relevantes físicos a renunciar a su fe en la finísima materia que atraviesa todos los cuerpos. Se consideraba que el experimento de Michelson hacia despedirnos del viento etéreo. Que así sea. El cuadro del mundo sería todavía más hermoso si consideráramos el éter como inmóvil y reconocíamos el espacio absoluto newtoniano respecto al cual realizan su recorrido los cuerpos celestes.

Para explicar el experimento de Michelson los físicos tan grandes como Joseph Larmor (1857-1942) y Hendrick Antoon Lorentz (1853-1928) aplicaron la hipótesis de la contracción de los cuerpos en la dirección de su movimiento. Sin embargo, las contradicciones lógicas y el carácter artificial de explicación de muchos fenómenos que atañen la electrodinámica seguían dejando el sentimiento de insatisfacción.

Cortar el nudo gordiano de todas las contradicciones le toca la suerte a Albert Einstein (1879-1955), el físico más relevante de nuestro siglo XX.

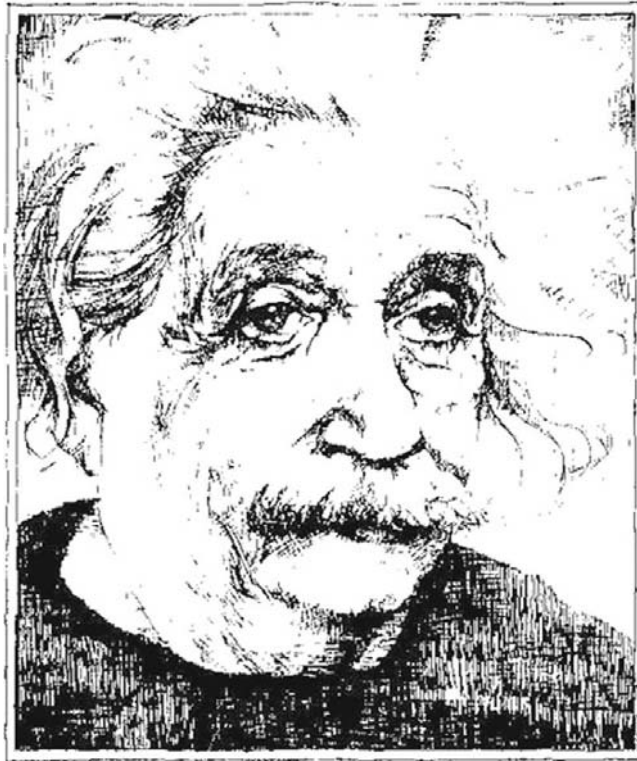
De punto de partida para los razonamientos de Einstein sirvió el principio de la relatividad. Había pocos quienes, después de Galileo, dudasen el hecho de que en relación a los movimientos mecánicos todos los sistemas inerciales son equivalentes (hagan el favor de retornar al libro 1, refrescando en la memoria todo lo dicho sobre el particular). Resulta una cosa algo extraña y, además, imperfectas desde las posiciones estéticas: la igualdad de derechos para los movimientos mecánicos y la ausencia de ésta para los electromagnéticos.

Renunciemos a este punto de vista «antiestético», admitiendo que el principio de la relatividad resulta válido para todos los fenómenos.

Ahora recapitemos sobre el resultado del experimento de Michelson. Los intentos de explicar el resultado de este experimento considerando la propagación de la luz en el éter a semejanza de la del sonido en el aire tampoco satisfacen a Einstein.

Percibe que aquí «algo» no cuadra. Hablando con propiedad, ¿por qué estamos obligados a «medir por el mismo rasero» la luz y el sonido? ¿Por la mera razón de que tanto el uno como el otro son capaces de difractar?

No es este un argumento muy fuerte. De este modo, renunciemos a este criterio y adoptemos el siguiente postulado (que a primera vista parece descabellado): la velocidad de la luz en el vacío es la misma desde el punto de vista de todos los observadores que se mueven en diferentes sistemas inerciales.



Albert Einstein (1879-1955), hombre de ciencia genial, creador de la teoría de la relatividad que revolucionó el pensamiento físico. En 1905 Einstein publica un trabajo dedicado a la teoría especial de la relatividad. En 1907 obtuvo la fórmula que relaciona la energía y la masa del cuerpo. En 1915 publica la teoría general de la relatividad. De la teoría se desprendían nuevas leyes de la gravitación y las deducciones acerca de la curvatura del espacio. La aportación que hizo Einstein a la física no se limita a la teoría de la relatividad. Del trabajo de Planck saca la conclusión sobre la existencia del fotón, o sea de una partícula de la luz, y pone de manifiesto cómo, basándose en estas posiciones, se puede dar una explicación a una serie de fenómenos fundamentales, incluyendo el efecto fotoeléctrico.

Cualquiera que sea la dirección en que corre la onda electromagnética, cualquiera que sea el cuerpo que sirvió de su fuente, tanto los terrícolas, como los foráneos

que habitan otra galaxia (cuán vehemente es el deseo de muchos fantaseadores de creer en su existencia) medirán la misma velocidad, la de 299.792 km/s.

A lo largo de su tramo rectilíneo de la vía férrea con velocidad constante v rueda un tren. Paralelamente al ferrocarril está tendida una carretera. Por ésta, en la misma dirección va a todo correr un motociclista. El inspector del servicio estatal automovilista cuyo puesto está situado cerca del ferrocarril silba en pos del infractor quien pasó al lado del inspector a una velocidad u que excede mucho de la permitida. El pequeño radar con que hoy día están provistos muchos inspectores indica 85 km/h. El maquinista echa una que otra mirada al motociclista que, rápidamente, alcanza y, después, deja atrás el tren. A este observador no le será difícil medir la velocidad del motociclista. Esta será igual a $u' = 35$ km/h. No necesito demostrar al lector que la velocidad del tren es igual a 50 km/h. Es válida la ley de adición de las velocidades:

$$u = v + u'$$

Y esta regla, al parecer, más que evidente, resulta inconsistente en el caso del rayo luminoso. Los fotones se mueven a una misma velocidad respecto a dos observadores que se encueraran en diferentes sistemas inerciales. El genio de Einstein consistía precisamente en que él renunció a esta deducción patente no sólo para la luz, sino que, en su afán de conservar el enfoque único de todos los fenómenos físicos, tanto de los electromagnéticos, como de los mecánicos, se atrevió a rehusar la ley de adición de las velocidades para todos los cuerpos.

Se sobreentiende que desde estas posiciones no hay necesidad de explicar siquiera el experimento de Michelson. Por cuanto la velocidad de la luz es universal, tanto a lo largo de la órbita terrestre, como transversalmente al camino de revolución de la Tierra alrededor de nuestro Astro.

De los principios que hemos formulado se infiere, de inmediato, que la velocidad de la luz es la velocidad máxima¹. En efecto, si la velocidad de la luz no se suma a la

¹ Propiamente hablando, a la mecánica relativista no le contradice la existencia de partículas que se mueven con velocidades tanto como se quiera mayores que la velocidad de la luz. Los teóricos, incluso han asignado un nombre a estas partículas: el de taquiones, sin embargo, en el caso de existir semejantes partículas, la velocidad de la luz, sea como fuere, quedaría para éstas como velocidad límite, pero no máxima, sino, por al contrario, mínima. El autor del libro supone que la teoría de los taquiones no es otra cosa que un juego matemático elegante. Si el

velocidad de movimiento del manantial, esto significa que es imposible adelantar a la luz. En sus memorias Einstein escribe que ya en 1894 le surgió la pregunta: *«Si se hubiera podido perseguir la onda luminosa a la velocidad de la luz, ¿acaso tendríamos ante nosotros un campo ondulatorio independiente del tiempo? Semejante cosa, a pesar de todo, parece imposible»*.

Así pues, ningún cuerpo, ninguna partícula pueden moverse a velocidad mayor que la de la luz. Piensen, por favor, bien lo que dice este enunciado. A raíz de su aparente carácter paradójico lo repetimos una vez más. Si en la Tierra o en otro planeta, de un lugar a otro, emprendo el viaje una onda electromagnética, su velocidad de propagación medida por el observador terrestre y por el observador que sobrevuela la Tierra en un cohete que se mueve con una velocidad fantástica será la misma. Este mismo enunciado será válido también para toda partícula que se mueve con la velocidad igual a la de las ondas electromagnéticas. En la teoría de Einstein la luz no es una excepción.

Bueno, ¿y de qué manera se desarrolla el asunto cuando la velocidad del cuerpo en movimiento es menor que la de la luz? Es evidente que en este caso tampoco es válido el sencillo principio de adición de las velocidades que siempre utilizamos con tanta seguridad. Sin embargo, la desviación con respecto a la regla ordinaria de adición de las velocidades comienza a percibirse únicamente en el caso de que la velocidad del cuerpo será muy, pero muy grande.

La mecánica relativista, tal es el nombre de la mecánica de los cuerpos de movimiento rápido, lleva a la siguiente regla de adición de las velocidades

$$V = \frac{v + v'}{1 + \frac{vv'}{c^2}}$$

Calculen, aproximadamente, cuáles deben ser los valores de v y v' para que sean necesarias las correcciones de la sencilla regla de adición de las velocidades.

mundo de los taquiones hubiere existido, éste, de principio, no podría influir en los acontecimientos que se desarrollan en nuestro Universo.

¿Cómo, por ejemplo, resultan los asuntos en el caso de vuelos cósmicos? ¿Es que sigue en pie la regla ordinaria de adición de las velocidades cuando se trata de movimientos con velocidades de decenas de kilómetros por segundo?

Como se conoce, es sumamente racional el lanzamiento de un cohete «secundario» a partir de una nave portacohetes cósmica. Se puede que precisamente mediante este procedimiento se envíen los cohetes a las regiones periféricas del Sistema Solar. Designemos con v la velocidad de la nave cósmica respecto a la Tierra y con v' la velocidad del cohete lanzado desde la nave cósmica con relación a esta nave. Supongamos que ambas velocidades, v y v' , son iguales a 10 km/s. Ahora, por la fórmula exacta de adición de las velocidades calculemos a qué será igual la velocidad del cohete con respecto a la Tierra. En este caso a la unidad en el denominador hay que añadir la fracción $10^2/(9 \times 10^{10}) \approx 10^{-9}$. La corrección es sumamente insignificante, es decir, sigue siendo válida la regla clásica de adición de las velocidades.

Entonces, ¿qué valor práctico tiene la mecánica relativista? A su debido tiempo llegaremos también a la respuesta a esta pregunta. Y mientras tanto, extraigamos corolarios de las hipótesis formuladas. Por cuanto tenemos que despedirnos del principio de adición de las velocidades, ya estarnos preparados al hecho de que será necesario introducir correcciones sustanciales también en otras fórmulas de la mecánica.

Como hemos subrayado antes, el papel decisivo en el proceso de establecimiento de la teoría de la relatividad lo desempeñó el experimento de Michelson, experimento



mediante el cual se demostró que la velocidad de la luz, tanto a lo largo, como transversalmente respecto al movimiento de la Tierra por la órbita solar es la misma.

No examinemos la marcha de los rayos en el interferómetro de Michelson limitándonos a discutir acontecimientos más sencillos. En algún lugar de la Tierra se ha creado una instalación muy simple. En un poste, a la fig. 4.1. la altura l desde la superficie terrestre está montado un laser. Su rayo finísimo se dirige a lo largo del radio terrestre, se refleja en el espejo colocado en el suelo, retorna y se recibe por la célula fotoeléctrica; y a esta última los ingenieros se las ingeniaron para disponerla de tal modo que tenemos derecho de considerar que la fuente y el receptor de la luz se encuentran en un punto. En la fig. 4.1 este punto se designa por la letra S . Por medio de un cronómetro ultraperfecto pueden registrarse dos instantes: primer instante, cuando la luz comienza su viaje; segundo instante, cuando la luz llega a la célula fotoeléctrica. Dos observadores contemplan este fenómeno. Uno se encuentra aquí mismo, al lado de la instalación que hemos inventado, y al otro observador, el pintor le emplazó en una lejana estrella. Ambos observadores miden el intervalo de tiempo τ entre dos acontecimientos: la partida y el retorno de la luz al punto S . El primer observador dibuja el cuadro de la marcha del rayo tan elemental que no se puede inventar nada más simple. Este supone que los caminos del rayo allí y de regreso coincide totalmente. Se convence de que su razonamiento es justo con la ayuda de la igualdad

$$\tau = \frac{2l}{c}$$

El observador sideral contempla el destello de la luz en el momento de la partida y en el momento de su llegada a la celda fotoeléctrica. El intervalo de tiempo medido por este observador es igual a τ . También él, para comprobar si todo es correcto construye el cuadro de la marcha del rayo.

Pero para el segundo observador las posiciones del punto S en el momento de poner en marcha el cronómetro y en el momento de advertir la reacción de la célula fotoeléctrica no coinciden. Por lo tanto, él construye otro cuadro de la marcha del

rayo. El observador sideral conoce la velocidad de la Tierra respecto a su persona. De este modo, su dibujito representa un triángulo equilátero cuya base es igual a $v\tau$ y la altura es l . Valiéndose del teorema de Pitágoras, el observador sideral establece que el camino recorrido por el rayo luminoso es igual a

$$2\sqrt{l^2 + \left(\frac{v\tau}{2}\right)^2}$$

Este camino es igual a $c\tau$, ya que la velocidad de la luz es idéntica para todos los observadores. Siendo así, el intervalo de tiempo entre dos instantes será igual a

$$\tau = \frac{2l}{c\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

¡Qué resultado más inesperado! No olvide que desde el punto de vista del observador terrestre este mismo intervalo de tiempo entre los mismos acontecimientos es igual a $2l/c$.

Recurramos a la ayuda de la lógica haciendo una conclusión inevitable: el tiempo que cuenta el observador en reposo se diferencia de aquel que cuenta el observador en movimiento.

El tiempo del observador inmóvil se denomina tiempo propio y se designa con τ_0 . Hallamos que el tiempo del observador que se mueve con la velocidad v_1 está relacionado con el tiempo propio mediante la expresión

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \text{ donde } \beta = \frac{v}{c}$$

Es decir, el reloj en movimiento marcha más lentamente que el inmóvil, una vez adoptados los postulados principales de la teoría, no hay dónde ocultarse de esta deducción. Y ésta nos lleva a un corolario tan extraño a primera vista como la necesidad de renunciar al concepto de simultaneidad.

En este caso, ¿no será que desde el punto de vista de un observador Jaime disparó y Juan cayó después del disparo matado por la bala, mientras que desde el punto de vista de otro observador primeramente cayó Juan a quien mataron y sólo después Jaime disparó? Me tomo la libertad de asegurar al lector que la mecánica relativista no da lugar a ninguna absurdidad. Nunca será violado el principio de causalidad. Sería posible explicar todo esto de una forma completamente accesible, pero, por desgracia, no lo permite el volumen del presente libro.

Hay que decir, además, varias palabras acerca de la paradoja de los hermanos gemelos la cual, hasta la fecha, se cita a veces como una demostración de la inconsistencia de la teoría. Juan y Pedro son hermanos gemelos. Pedro se despide de Juan y va al viaje cósmico con una velocidad próxima a la de la luz, regresando al cabo de cierto lapso de tiempo. El reloj de Pedro marcha más lentamente. Por esta razón volverá a la Tierra sin arrugas y canas para encontrarse con su hermano que se lea convertido en un vejestorio.

Sin embargo, lamentable (o afortunadamente, según el punto de vista) no se logrará organizar este encuentro observando las condiciones para las cuales son válidas las fórmulas en cuestión. La cosa reside en que, para conseguirlo, Pedro deberá cambiar su velocidad para la inversa y debido a ello no se extienden a este caso las deducciones que se refieren a los sistemas inerciales.

La relatividad del tiempo no es la única consecuencia de la nueva teoría. De la misma manera como el propio reloj del observador marcha más rápidamente que otro cualquiera, así la longitud de la barra l_0 que usted sujeta en las manos es máxima. Desde el punto de vista de cualquier observador que se mueve a velocidad v a lo largo de la barra, esta misma longitud será igual a

$$l_0 \sqrt{1 - \beta^2}$$

También en la expresión para la masa aparece la misma raíz. La masa m_0 del cuerpo que el observador «sujeta en las manos» se denomina masa en reposo. Esta es mínima. Para un observador en movimiento

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

Es completamente natural que la masa se acrecienta con el aumento de la velocidad. En efecto, si la velocidad tiene un límite, entonces, a medida que se está acercando a éste, cada vez es más difícil acelerar la partícula. Y este hecho significa, precisamente, que la masa de la partícula se incrementa.

En las fórmulas de distancia y tiempo durando largo periodo no se presentó la oportunidad de tratar con grandes velocidades que hicieran tomar en consideración la diferencia entre la raíz cuadrada y la unidad. Tan sólo hace poco se logró confirmar la validez de la fórmula para el tiempo.

Ahora bien, en lo que atañe a la dependencia de la masa respecto a la velocidad, ésta fue descubierta para el flujo de electrones ya antes de la aparición del artículo de Einstein. La fórmula para la masa es una fórmula técnica en el pleno sentido de la palabra. Como veremos en el siguiente párrafo, sin ésta es imposible calcular y construir un acelerador de partículas moderno. En estas máquinas muy caras las partículas se aceleran con tanta intensidad que la raíz cuadrada llega a ser mucho más próxima a cero que a la unidad.

La fórmula de dependencia de la masa respecto a la velocidad fue propuesta por primera vez aun con anterioridad a Einstein. Solamente, antes de haberse afirmado la mecánica relativista, esta fórmula se interpretaba de una forma equivocada.

Sin embargo, fue Einstein el que dedujo la célebre expresión

$$E = mc^2$$

que relaciona la masa y la energía.

Esta fórmula, al igual que las variaciones de l , τ , y m en función de la velocidad, derivan de una forma rigurosa de los postulados de la teoría.

Multipliquemos la masa por el cuadrado de la velocidad de la luz. Para un cuerpo en movimiento será mc^2 , y para el mismo cuerpo en reposo tendremos m_0c^2 . Escribamos la diferencia de estas dos expresiones:

$$mc^2 - m_0c^2 = m_0c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right)$$

Hagamos uso de la igualdad aproximada cuyo carácter justo el lector puede comprobar sin dificultad:

$$\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \approx 1 + \frac{1}{2}\beta^2$$

La diferencia que estamos calculando tiene la siguiente forma:

$$mc^2 - m_0c^2 = \frac{m_0v^2}{2}$$

Como ve el lector, esta es igual a la energía cinética del cuerpo.

Meditando sobre esta igualdad, Einstein llegó a la siguiente conclusión fundamental.

La energía del cuerpo en movimiento puede representarse por la expresión

$$E = mc^2$$

Dicha energía se compone por la energía de un cuerpo en reposo m_0c^2 y la energía del movimiento. Sin disponer de datos algunos sobre la estructura del cuerpo, sin saber el carácter de interacción de sus partículas se puede afirmar que su energía interna es igual a

$$U = m_0c^2$$

La energía interna de un cuerpo cuya masa es de 1 kg es igual a 10^{17} J. Esta cantidad de calor se liberaría durante la combustión de 3 millones de toneladas de carbón. Como se enterará el lector más tarde, los físicos aprendieron a liberar sólo

una parte pequeña de esta energía, desintegrando los núcleos atómicos o fusionándolos.

Cabe subrayar que la ecuación de Einstein $E = mc^2$ se refiere no sólo a la energía intranuclear. Esta ecuación es universal Pero aquí los asuntos toman el mismo cariz que en el caso del reloj de los cosmonautas. Las más de las veces la relación entre la energía y la masa no puede ser comprobada. En efecto, si calentarnos 1 t de molibdeno a 1000 K, la masa incrementará en 3 millonésimas de gramo. Tan sólo la enormidad de las fuerzas intranucleares permitió convencerse en el carácter justo de la ecuación $E = mc^2$.

Sería útil, tal vez, prevenir al lector acerca de la formulación negligente y muy difundida de esta admirable ecuación. Se dice: *la masa se transforma en energía*; o, lo que es peor todavía: *la materia se transforma en energía*. En realidad, la fórmula $E = mc^2$ dice lo siguiente: cualesquiera que sean las transformaciones mutuas de las diferentes clases de la materia, a la variación de la energía operada en el sistema corresponde la variación equivalente de la masa. La energía y la masa son dos características de la materia vinculados unívocamente.

Partículas cuya velocidad es próxima a la de la luz

El deseo de llegar hasta los ladrillos elementales a partir de los cuales está construido el mundo es tan viejo como el mundo. Pero durante largos siglos este objetivo se encontraba sujeto tan sólo a las elucubraciones escolásticas de los sabios. Apenas aparecieron las posibilidades reales de destruir moléculas, átomos y núcleos atómicos, los físicos, con inspiración y perseverancia, abordaron esta labor. Esta labor no se interrumpe hasta la fecha y, cabe reconocerlo, por ahora no se advierte que se puede consumir.

Está claro que, para obtener la respuesta a la pregunta de qué está construido el mundo, es necesario destruir las partículas. Y para lograr esta finalidad hacen falta «proyectiles», y cuanto mayor energía posean éstos, tanta mayor esperanza existe de descubrir este enigma de la naturaleza.

La historia de producción de las partículas rápidas se remonta al año 1932, cuando los colaboradores de Rutherford construyeron una instalación para obtener protones que se aceleraban hasta las energías de 500 keV. A ésta le siguieron los ciclotrones

que permitieron alcanzar tales energías de los protones que se debían ya medir por megaelectronvoltios (recordemos que mega corresponde a millón). La siguiente etapa la constituyó el sincrotrón que dio la posibilidad de embalar los protones hasta miles de millones de electronvoltios. Comenzó la era de gigaelectronvoltios (giga corresponda a mil millones). Pero, actualmente, se está diseñando máquinas en que se contará ya con millones de millones de electronvoltios. En particular, los físicos que se reunieron en 1975 en una conferencia internacional en la ciudad de Sérpujov (en los alrededores de Moscú) donde está instalado uno de los más potentes aceleradores de este tipo consideraban que hubiera sido necesario construir una máquina anular de 16 km de diámetro.

Bueno, el lector ya tendrá en la punta de la lengua la pregunta de en qué consiste el principio de acción de estas máquinas. ¿Por qué es preciso darles una forma anular y, finalmente, para qué se necesitan.

En esencia, sirve de acelerador de partículas cualquier aparato a vacío a cuyos extremos está alimentada la alta tensión. La energía cinética de una partícula acelerada hasta una gran velocidad es igual a (desde luego, no es la primera vez que citamos esta fórmula, pero en ello no hay ningún inconveniente, ya que, en este caso, el lector de seguro la guardará en le memoria);

$$\frac{mv^2}{2} = eU$$

Tanto los tubos de rayos X, como los de televisión pueden llamarse aceleradores.

Pero, basándose en este principio, no se pueden obtener velocidades muy grandes. El término «acelerador» se emplea cuando se trata de máquinas que aceleran la partícula hasta velocidades próximas a la de la luz. Con este fin es necesario obligar la partícula a pasar consecutivamente por muchos campos. De entrada, es fácil comprender que un acelerador lineal es poco adecuado, por cuanto para obtener unas míseras decenas de miles de electronvoltios ya se necesitan tramos iguales a muchos centímetros. Para llegar a diez mil millones de electronvoltios hace falta un tramo del orden de diez kilómetros.

¡No, semejante resolución frontal del problema no sirve! En 1936, Ernesto Lawrence (1901-1958) dio comienzo a la construcción de los aceleradores anulares modernos los cuales denominó ciclotrones. En una instalación se combina la aceleración de la partícula por el campo eléctrico y su reiterado retorno al intervalo acelerador con la ayuda del campo magnético.

El acelerador de Lawrence se parece a una lata de conservas cortada en dos partes por el diámetro. A las dos mitades se aplica una tensión rápidamente variable. Las partículas cargadas se aceleran en aquellos momentos en que pasan las distancias que separan las mitades del aparato. En el interior de la «lata de conservas» hacemos moverse las partículas por la circunferencia, superponiendo al aparato al campo magnético cuyas líneas de inducción son perpendiculares al fondo de dicha «lata». Como se sabe, en este caso la partícula cargada describe una circunferencia de radio

$$R = \frac{mv}{eH}$$

El tiempo de una revolución es

$$T = \frac{2\pi m}{eH}$$

Para que el campo eléctrico entre las dos mitades «empuje» las partículas es necesario elegir la tensión variable de tal modo que su signo cambie precisamente para aquel instante en que la partícula haya llegado al intervalo entre las mitades. Las cargas se crean en el centro del aparato (por ejemplo, la ionización del hidrógeno proporciona protones). La primera circunferencia tendrá un radio pequeño. Sin embargo, cada circunferencia subsiguiente tendrá un radio mayor por cuanto, de acuerdo con la fórmula insertada, éste es proporcional a la velocidad de movimiento de la partícula.

A primera vista parece que, aumentando las dimensiones del ciclotrón y, a la par de ello, también el radio de la trayectoria anular, podemos comunicar a la partícula cualquier energía. Una vez alcanzada la energía que deseamos, lo único que nos

queda es dejar salir afuera el haz con la ayuda de una placa deflectora. Todo se habría desarrollado a las mil maravillas si no hubiera sido por la dependencia de la masa respecto a la velocidad. La fórmula de Einstein para la masa que en su tiempo parecía carecer de cualquier valor práctico, se convierte en fundamental para calcular los aceleradores anulares.

Por cuanto con el aumento de la velocidad incrementa la masa de la partícula, resulta que el período de revolución no permanece invariable sino crece. La partícula comienza a tardar. Llegará al intervalo acelerador no en el momento en que la fase de la tensión cambie en 180° , sino más tarde. A medida que crece la velocidad, llegaremos a la situación en que el campo eléctrico no solo dejará de «empujar» las partículas, sino que hasta las frenará.

El ciclotrón permitió acelerar los protones hasta 20 MeV, aproximadamente. Al parecer, no está mal. Pero, como ya he señalado, a los físicos, para su trabajo, son necesarios aparatos cada vez más potentes. Claro está que para conseguir mayores energías, conviene buscar nuevos caminos.

La forma de la expresión para el período de giro de la partícula les sugiere qué camino hay que elegir. Con el aumento de la velocidad la masa crece. Entonces, esto significa que para mantener el período es necesario aumentar «al compás» la intensidad del campo magnético. Sin embargo, esta solución sólo a primera vista es simple. No se debe olvidar que el radio de giro aumenta para cada revolución de la partícula. De este modo, se requiere que el crecimiento sincrónico de la masa y del campo magnético sea válido para la partícula que pasa consecutivamente por las circunferencias de radios cada vez mayores. Centrando nuestra atención en esta relación de las magnitudes, pondremos en claro que existen tales partículas «afortunadas» para las cuales, para cierto ritmo dado de crecimiento de la intensidad del campo magnético, esta condición se cumplirá. Y, lo que es lo principal, resulta que tendrá lugar una especie de autopuesta en fase. La partícula que posee más energía que la necesaria para el radio de su giro se retardará debido al incremento excesivo de masa; por el contrario, la insuficiente energía llevará a la aceleración.

Por medio de cálculos muy simples, valiéndose de fórmulas del radio y del período de giro de la partícula, el lector puede cerciorarse por sí mismo de que los asuntos

se desarrollarán precisamente de esta forma (prefije el ritmo de incremento de la intensidad del campo magnético, calculen las trayectorias de las partículas y tracen un gráfico, y, entonces, ustedes percibirán el principio de antepuesta en fase). También pueden crearme de palabra que mediante este procedimiento es posible, de principio, aumentar la velocidad de las partículas hasta el límite. Sólo que será necesario utilizar para la aceleración el método de impulso. Al crecer la intensidad del campo la instalación funciona. La marcha atrás es marcha en vacío. Pero no nos detendremos en este método. Este ya constituye una etapa recorrida. En el caso de conservar dicho principio, para crear aceleradores modernos es necesario fabricar imanes con una masa de millones (!) de toneladas.

Los aceleradores anulares modernos llamados sincrofasetrone efectúan la aceleración de las partículas por una órbita. Por lo tanto, toda la parte central del imán parece como si se recortase. Estas máquinas también trabajan según el método de impulso. Se varían de forma acorde tanto la intensidad del campo magnético, como el período del campo eléctrico. Las partículas afortunadas aumentarán constantemente su velocidad, moviéndose por una órbita estrictamente anular. Las menos afortunadas oscilarán en torno a una órbita buena, pero, a pesar de todo, también irán a aumentar constantemente su velocidad.

De principio, la aceleración puede llevarse a valores fantásticos. Puede alcanzarse la velocidad de los protones que apenas se diferencia de la de la luz.

Nos queda contestar a la pregunta de para qué se necesitan semejantes máquinas. Un acelerador se construye con el objeto de profundizarse en la física de las partículas elementales. Cuanto más alta es la energía de las partículas cargadas utilizadas como proyectiles que bombardean el blanco, tanto mayor es la probabilidad de hallar las leyes de transformación mutua de las partículas elementales.

Hablando con propiedad, el mundo está constituido tan sólo por tres partículas: electrones, protones y neutrones. Por ahora, no hay fundamento para considerar el electrón una partícula compuesta. Pero en lo que concierne a los protones y neutrones, éstos pueden descomponerse en partes. Debido a diferentes colisiones entre los «fragmentos» se engendran nuevas partículas. Hoy en día su número se estima en unas 250, y toda la desgracia radica en que este número aumenta sin

cesar a medida que crece la potencia de los aceleradores. Los especialistas en el ámbito de la física de las partículas elementales no pierden la esperanza de descubrir para éstas una especie de sistema de Mendeleiev, reduciéndolas a un número limitado de «protopartículas», si se permite llamarlas así, análogamente a como se consiguió reducir a combinaciones de electrones, protones y neutrones el centenar de elementos y varios cientos de sus isótopos.

Es plenamente lícito que el lector se interese en qué sentido, atribuimos, entonces, a la frase: el mundo está constituido por tres partículas. El asunto consiste en lo siguiente. Tan sólo el protón y el electrón son partículas completamente estables. El neutrón no es del todo estable, si entendemos la palabra «estable» en su acepción cotidiana. Pero su tiempo de vida en el mundo de las partículas es enorme: es de 10^3 s. aproximadamente. En lo que se refiere a la multitud de las demás partículas elementales que tantas preocupaciones deparan a los teóricos, sus tiempos de vida son menores de 10^{-6} s. Se sobreentiende que los dos últimos números son inconmensurables.

No obstante, se aspira a poner en sistema también estos fragmentos de materia de vida corta. Para las partículas elementales se proponían muchos sistemas de esta índole. Mas apenas aparecía en la escena un acelerador de mayor potencia, se descubrían con su ayuda nuevos fenómenos que no se ajustaban al esquema adoptado.

En el momento cuando se escriben estas líneas los especialistas miran con optimismo al futuro. Parece que se logra reducir todo el sistema de las partículas elementales a «protopartículas» que recibieron el nombre de «quarks». El inconveniente radica en que los quarks, a diferencia de los protones y electrones, no se observaron y, con toda probabilidad, no pueden observarse, de principio. Para crear el «sistema de Mendeleiev» de las partículas elementales es necesario atribuir al quark una carga eléctrica igual ya sea a un tercio, o bien, a dos tercios de la carga del electrón, como así mismo asignar dos parámetros complementarios a los cuales no se puede poner en correspondencia ninguna imagen, cualquiera que sea. Dichos parámetros llevan los nombres de «extrañeza» y «charm» (encanto).²

² En los últimos años se puso de manifiesto la necesidad de tener un nuevo parámetro al que dieron el nombre de «beauty», es decir, belleza.

El autor de este libro no se propone detenerse en los problemas relacionados con las partículas elementales. No lo hace porque es difícil explicar de forma popular las estructuras existentes, sino por la simple razón de que todavía es prematuro sentir seguridad de su encanto y belleza. No está descartado que aparecerán unas ideas nuevas por completo en lo que atañe a las partículas elementales y unos principios absolutamente nuevos en el modo de abordar estas porciones minúsculas del Universo que se miden (en centímetros) por una unidad dividida por uno con trece ceros.

Mecánica ondulatoria

En 1923, en un trabajo que se distinguía por su extraordinaria audacia y genial sencillez, el físico francés Luis de Broglie escribió: «En la óptica, durante siglos se despreciaba demasiado el método corpuscular de análisis en comparación con el ondulatorio. ¿No es que en la teoría de las micropartículas se incurría en un error inverso?» En este trabajo de Broglie señaló el camino siguiendo el cual se podía relacionar con las partículas las ideas ondulatorias.

Su labor la prosigue y consuma el declarado físico alemán Erwin Schrödinger. Y algo más tarde, para 1926-1927, queda claro que, en esencia, la mecánica ondulatoria y la mecánica cuántica son términos equivalentes. Esta nueva mecánica representa una rama importantísima de la física que nos enseña cómo analizar el comportamiento de las micropartículas en los casos en que ni el aspecto corpuscular, ni tampoco el ondulatorio son suficientes para interpretar los acontecimientos.

Hemos prevenido al lector que no se debe entender de una forma demasiado literal la expresión «onda electromagnética». Tanto la emisión radioeléctrica, como la luz y los rayos X pueden considerarse en dos aspectos: el ondulatorio y el corpuscular. Una afirmación totalmente análoga es válida también para los flujos de partículas. Aunque los flujos de partículas tienen diferencias nítidas respecto a la emisión electromagnética (la principal consiste en que los electrones, los núcleos, los neutrones y los iones pueden moverse cualesquiera velocidad, mientras que los fotones, sólo con la de 300 000 km/s), esta clase de materia también revela en los diversos experimentos ora las propiedades de onda, ora las de corpúsculos.

¿Cuál es, entonces, la longitud de onda que debe atribuirse a una partícula en movimiento? Recurriendo a razonamientos que vamos a exponer ahora en una forma algo simplificada, de Broglie demuestra (mejor es decir, adivina) a qué debe ser igual la longitud de onda relacionada con el flujo de partículas.

Examinamos las relaciones fundamentales que vinculan el aspecto corpuscular de la radiación electromagnética con el ondulatorio. La porción de energía de la radiación electromagnética que transporta consigo el fotón se expresa por la fórmula

$$E = h\nu$$

La energía del fotón, al igual que de cualquier otra porción de materia, está sujeta a la ecuación de Einstein. De este modo, la energía del fotón puede representarse también por la fórmula $E = mc^2$. De aquí se infiere que la masa del fotón³ es

$$m = \frac{h\nu}{c^2}$$

Multiplicando la masa por la velocidad obtendremos el valor del impulso del fotón:

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

Pero a nosotros nos interesa la longitud de onda de una partícula cuya masa en reposo es distinta de cero. ¿Cómo se puede adivinar a qué es igual? Suponiendo que el razonamiento expuesto se da por sentado, y admitiendo que la relación entre el impulso y la longitud de onda es universal! resta volver a escribir esta expresión en la forma

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

³ La masa del fotón es masa de una partícula en movimiento; en lo que respecta a la masa en reposo del fotón, ésta es prácticamente, es igual a cero: el experimentador puede garantizar que es menor que $0,6 \times 10^{-20}$ MeV. Cabe señalar también que la relación para el impulso del fotón puede comprobarse en una forma directa midiendo la presión de la luz.

Esta es, precisamente, la célebre fórmula de la Broglie. Indica que el aspecto ondulatorio del flujo de partículas debe revelarse con particular nitidez cuando la masa y la velocidad de la partícula no son grandes. Este hecho se confirma precisamente por el experimento, ya que resulta que la difracción de las partículas es fácil de observar en el caso de electrones y neutrones lentos.

La comprobación de la certeza del razonamiento que acabamos de citar —y que, a propósito, se percibía en su tiempo como un juego con conceptos— es completamente rectilínea. De una misma sustancia es necesario tomar el roentgenograma, el electronograma y el neutronograma. Ajustando las velocidades de las partículas de tal modo que las longitudes de onda sean las mismas en todos los casos, debemos obtener diagramas de Debye idénticos (en lo referente a los radios de los anillos). Resulta justamente así.

Era 1927, de un modo casual, se realizó la primera comprobación de la fórmula de la Broglie. Los físicos norteamericanos Davisson y Germer llevaban a cabo experimentos consagrados a la dispersión de los electrones sobre la superficie de los metales y, trabajando con el instrumento, sucedió que llevaron a incandescencia el objeto. Este último fue policristalino y después del calentamiento resultó recristalizado, de modo que los rayos se dispersaban ya por un monocristal. El cuadro obtenido se asemejaba tanto a los correspondientes roentgenogramas que no quedó duda alguna de que los electrones poseían la capacidad de difractar al igual que los rayos X.

Bastante pronto, la observación de la difracción electrónica se convirtió en método de investigación de la estructura de la sustancia que, en muchos casos, resultó más adecuado que el análisis roentgenoestructural. La esfera principal de aplicación de la electronografía es el estudio de la estructura de las películas finas. Los principios no difieren en nada de aquellos que hemos discutido en el capítulo 3. La diferencia consiste en que los rayos electrónicos se dispersan por los electrones y núcleos, mientras que los rayos X se dispersan tan solo por los electrones.

Puesto que la longitud de onda de las partículas es inversamente proporcional a la masa, se entiende que la difracción de las moléculas es difícil de observar. En todo caso, hasta la fecha no se ha conseguido hacerlo. La difracción de los protones sí

puede observarse, pero ésta no reviste ningún interés: los protones no sirven para la investigación de una estructura volumétrica debido a su pequeño poder de penetración, y para tal estudio de la superficie es mejor recurrir a la difracción de los electrones, ya que ésta aporta una información incomparablemente más rica sobre la estructura.

Los asuntos toman otro cariz cuando se trata de los neutrones. La investigación de la difracción de estas partículas se convirtió en objeto de ocupación de muchos científicos. Este campo de la ciencia tiene el nombre de neutronografía.

Desde el punto de vista técnico es mucho más difícil obtener un neutronograma que un roentgenograma. En primer lugar, un haz lo suficientemente intenso de neutrones con una longitud de onda adecuada (la longitud de onda se controla por la velocidad de los neutrones) puede crearse tan solo dejando salir estas partículas a través de un canal especial en el reactor atómico. La segunda dificultad consiste en que la dispersión de los neutrones no es grande, ya que éstos pasan fácilmente a través de la sustancia sin chocar contra los núcleos de sus átomos. Por esta razón hay que trabajar con cristales grandes, con dimensiones del orden de un centímetro. Y no es tan fácil obtener semejantes cristales. Y por fin, la tercera circunstancia: los neutrones no dejan huellas en la placa fotográfica, y en los instrumentos de ionización solo manifiestan su presencia de una forma indirecta. Más tarde diremos algunas palabras sobre cómo se cuentan los neutrones.

¿Por qué, entonces, a pesar de todo, los investigadores se ocupan de neutronografía? El quid radica en que los neutrones, a diferencia de los rayos X, no se dispersan por los electrones, sino se desvían de su camino al encontrarse con los núcleos de los átomos. Pueden citarse, muchos ejemplos de sustancias cuyos átomos difieren de un modo insignificante por el número de electrones, mientras que para las propiedades de los núcleos la diferencia es ostensible. En semejantes casos, los rayos X no distinguirán entre los átomos, al mismo tiempo la neutronografía llevará al éxito. Pero, la circunstancia primordial estriba tal vez, en que los neutrones se dispersan fuertemente por los núcleos de los átomos de hidrógeno, mientras que los rayos X, sólo con dificultad, son capaces de establecer la disposición de los átomos de este elemento, pues el átomo de hidrógeno posee un solo electrón. Y el conocimiento de la disposición de este átomo es de suma

importancia. En una cantidad enorme de sistemas biológicos y orgánicos el átomo de hidrógeno enlaza entre sí las partes de una molécula o las moléculas vecinas. Este enlace especial se denomina precisamente así: enlace de hidrógeno. Tampoco tiene rival la posibilidad de la neutronografía de distinguir los núcleos atómicos poseedores de diferentes propiedades magnéticas. Todas estas causas bastan para convertir la neutronografía en un importante método de investigación de la estructura de la sustancia.

El principio de Heisenberg

Muchos físicos, durante largo tiempo no podían avenirse al hecho del que la luz y las partículas poseen simultáneamente propiedades ondulatoria y propiedades corpusculares. Les parecía que en esta dualidad se encierra algo que contradice a la teoría del conocimiento. Y una posición especialmente irreconciliable estos físicos la adoptaron respecto al principio de Heisenberg.

Aquel importantísimo enunciado de la física del micromundo establece los límites de la aplicabilidad del aspecto corpuscular de cualquier fenómeno relacionado con el movimiento de las partículas de la sustancia. El principio de Heisenberg se anota en la siguiente forma;

$$\Delta x \Delta v > h/m$$

Aquí Δx y Δv es la «borrosidad» de nuestro conocimiento en lo que se refiere, respectivamente, a la coordenada y a la velocidad de movimiento (en dirección del mismo eje de coordenadas) de un coágulo de materia que examinamos en el aspecto corpuscular, en pocas palabras, Δx y Δv es la incertidumbre en el conocimiento de la coordenada y la velocidad de la partícula.

Es preciso subrayar que no se trata de las dificultades técnicas de medición. La relación insertada vincula las incertidumbres que no se logra eliminar ni en el experimento más perfecto. Actualmente, revisten un interés tan solo histórico los diferentes esquemas que se proponían para medir con absoluta precisión las trayectorias y las velocidades de movimiento de las partículas. Sometiendo un

esquema de este tipo a un análisis minucioso, siempre se podía descubrir su defecto de principio.

Tratemos de esclarecer, aunque sea con varias palabras, por qué el experimento no puede dar mayor exactitud de la que permite el principio de Heisenberg. Supongamos que se trata de determinar la posición de la partícula en el espacio. Para enterarse de dónde se halla, éstos deben iluminarse. Como ya hemos señalado antes, las posibilidades de discernir los detalles se determinan por la longitud de onda y la radiación utilizada. Cuanto menor es longitud de onda, tanto mejor. Pero, al disminuir la longitud de onda, aumentamos la frecuencia de la onda y, por consiguiente, elevamos la energía del fotón. El impacto que soportaría la partícula examinada nos privará de la posibilidad de juzgar acerca de la velocidad que ésta tenía al encuentro con el fotón.

He aquí otro ejemplo clásico. Interponemos en el camino del electrón una ranura estrecha. Al volar a través de dicha ranura el electrón incide sobre una pantalla. Se ve un destello. De este modo, con una precisión correspondiente al ancho de la ranura se localiza la posición del electrón en el momento en que pasaba a través del orificio en búsqueda de exactitud comencemos a disminuir el tamaño de la ranura. Pero en este caso más ostensiblemente se pondrán de manifiesto las propiedades ondulatorias del electrón. El electrón puede desviarse cada vez, más lejos del camino recto. Y esto significa que nosotros, cada vez en mayor grado, perderemos los datos sobre la componente de su velocidad en dirección del plano en que está practicada la ranura.

Podemos idear docenas de semejantes ejemplos, podemos examinarlos desde el punto de vista cuantitativo (lo que hacían, precisamente, los físicos de los años 1930), y cada vez llegaremos a la fórmula insertada anteriormente.

Vamos a discutir las evaluaciones de Δx y Δv que se pueden hacer en relación con las partículas de diferente masa utilizando la desigualdad de Heisenberg.

Supongamos que se trata de un electrón que pertenece al átomo. ¿Es posible acaso poner un experimento que establezca en qué lugar se encuentra el electrón en el instante dado? Por cuanto las dimensiones del átomo son del orden de 10^{-8} cm, esto significa que es deseable la exactitud, digamos, de 10^{-9} cm. Bueno, de principio (y sólo de principio) semejante experimento es realizable. Sin embargo,

apreciemos, con la ayuda de la desigualdad, la pérdida de información sobre este electrón. Para el electrón, la magnitud h/m es igual, aproximadamente, a $7 \text{ cm}^2/\text{s}$, y para éste el principio de Heisenberg se escribirá de la siguiente forma:

$$\Delta x \Delta v > 7$$

Entonces tenemos, $\Delta v > 7 \times 10^9 \text{ cm/s}$, lo que carece totalmente de sentido, o sea, no se puede decir nada acerca de la velocidad del electrón.

¿Y si intentáramos conocer algo más exactamente la velocidad del electrón atómico? También para conseguir esta finalidad se puede idear un experimento realizable de principio. Pero en este caso se perderá por completo el conocimiento sobre el lugar donde se encuentra el electrón.

La desigualdad aplicada al electrón atómico muestra que en este caso el aspecto corpuscular no trabaja. Resulta privado de sentido el concepto de trayectoria del electrón, tampoco se puede decir cosa alguna sobre los caminos de transición del electrón desde un nivel de energía hacia el otro.

El cuadro varía en el caso de que nos interesamos por el movimiento del electrón en las cámaras de ionización. La estela dejada por el electrón puede ser visible. En consecuencia, ¿tiene una trayectoria? Sí, la tiene. ¿Y cómo acertar a ligar esto con el cálculo anterior? No hay necesidad de ligarlo. Ahora, todos los razonamientos deben llevarse a cabo de nuevo. El espesor de la estela es del orden de 10^{-2} cm . Por consiguiente, la incertidumbre en el valor de la velocidad, incluso para un electrón lento que vuela a través de la cámara con una velocidad de cerca de 1 km/s , es prácticamente, despreciable en comparación con esta magnitud: ésta es igual a 7 m/s .

Estos ejemplos numéricos nos señalan que el aspecto corpuscular empieza a desaparecer a medida que nosotros «escudriñamos»: tratamos de examinar más detalladamente la porción de la materia.

Con mucha frecuencia se puede hablar de los protones y neutrones como de partículas. Sin embargo, cuando se trata de su comportamiento en el seno del núcleo atómico cuyas dimensiones son de 10^{-13} cm , en este caso no se pone de manifiesto su aspecto corpuscular.

Tampoco es difícil darse cuenta de que sobre una molécula grande con una masa molecular del orden de un millón podemos hablar tranquilamente como de un guisante. Dicha molécula se comporta como una partícula «honesta». Incluso se puede trazar la trayectoria de su movimiento térmico caótico.

Hace mucho pasaron los tiempos en que el dualismo ondulatorio - corpuscular se percibía como algo extraño, que necesitaba una interpretación profunda. Los hombres de ciencia renombrados, incluso tales como Einstein y Bohr disentían apasionadamente cómo debía interpretarse la conducta tan «extraña» de los electrones y de otras partículas. En la actualidad, la absoluta mayoría de los naturalistas no ve nada particular en la utilización de los dos aspectos durante la descripción de diversos fenómenos en que toman parte electrones, núcleos o fotones.

Unos diez años atrás, un grupo de especialistas en ciencia llevó a cabo una encuesta entre un numeroso (cerca de diez mil personas) grupo de físicos. Entre otras fue puesta la siguiente pregunta; ¿opina el preguntado que el problema de dos aspectos de la materia reviste interés y no puede considerarse aclarado hasta el final? Tan sólo veinte personas contestaron que, según su opinión, la desigualdad de Heisenberg y los problemas adjuntos no son verdad en última instancia.

La dificultad de reconciliarse con esta importante ley de la naturaleza se explicaba, por lo visto, por el error lógico que constituía la base de la protesta la cual se formulaba así: «¡Yo puedo convenir con que el comportamiento de la partícula de la materia es imposible de predecir». El vicio de la frase radica en que al hablar sobre la porción de la materia ésta se considera como una partícula en la acepción habitual, cotidiana, de esta palabra. Mientras tanto, la porción de la materia, en realidad, ya sea que se trata de la luz, las microondas, el electrón, o bien, del núcleo, no se parece, ni mucho menos, a un guisante. Es imposible figurarse visualmente una partícula de la materia. ¡Y cada uno se pondrá de acuerdo con ello! Basta recordar que al electrón o al protón no son aplicables los conceptos de color, dureza, temperatura... Todas estas propiedades pertenecen tan sólo a los cuerpos macroscópicos. Pero si no se puede figurar una porción de materia, tanto más es imposible figurarse su movimiento. El movimiento de la porción de la materia

conjugada en sí dos aspectos: el ondulatorio y el corpuscular. Esta es la razón por la cual es imposible predecir tan sólo el comportamiento de uno de sus aspectos.

La mecánica cuántica (mecánica ondulatoria: repetimos una vez más que son sinónimos) nos proporciona una relación de reglas precisas con cuya ayuda podemos vaticinar el comportamiento de las porciones de la materia. La descripción de las partículas empleando los métodos de la mecánica cuántica refleja de una forma exhaustiva las leyes generales del micromundo. Con ayuda de esta ciencia predecimos inequívocamente los acontecimientos y la obligamos a servir a la práctica.

Por supuesto, lo dicho no significa que, en adelante, no se descubrirán leyes más generales de la naturaleza en cuyo corolario particular se convertirá la mecánica cuántica moderna, análogamente a como esto sucediera con la mecánica newtoniana. Estas leyes generales deben ser aplicables para definir el comportamiento de partículas de masa pequeña que se mueven con grandes velocidades. Esperamos con impaciencia, y hay que reconocerlo, esta espera ya dura mucho tiempo, la creación de una teoría que unifique todas las «mecánicas» en un todo único. Para esta, lamentablemente no creada, teoría existe incluso el nombre: mecánica cuántica relativista.

Parece asombroso que la cascada de descubrimientos hechos en el primer cuarto del siglo XX se haya refrenado inesperadamente. Al lector le puede parecer extraña esta afirmación. Sin embargo, los hechos, hechos son. A pesar del fantástico progreso de las ciencias aplicadas, a pesar de que en los dos cuartos de siglo subsiguientes se ha desarrollado y se desarrolla a altos ritmos la revolución científico-técnica, a pesar de todo ello, después del descubrimiento de la mecánica cuántica no se han hallado nuevas leyes de la naturaleza... Hay que esperar.

Capítulo 5

Estructura de los núcleos atómicos

Contenido:

- *Radiactividad*
- *Desintegración radiactiva*
- *Reacciones nucleares y el descubrimiento del neutrón*
- *Propiedades de los núcleos atómicos*
- *Rosones y fermiones*
- *La masa y la energía del núcleo atómico*
- *Energía de las reacciones nucleares*
- *Reacción nuclear en cadena*

En el libro 3 hemos referido cómo, con la ayuda de los campos eléctricos y magnéticos, puede separarse el haz de partículas que se diferencian por la relación de la carga a la masa. Ahora bien, si las cargas son iguales, llega a ser posible separar las partículas por la magnitud de sus masas. Para estos objetivos sirve el instrumento que lleva el nombre de espectrógrafo de masas. Este se utiliza ampliamente para el análisis químico.

El esquema de este instrumento se representa en la fig. 5.1.

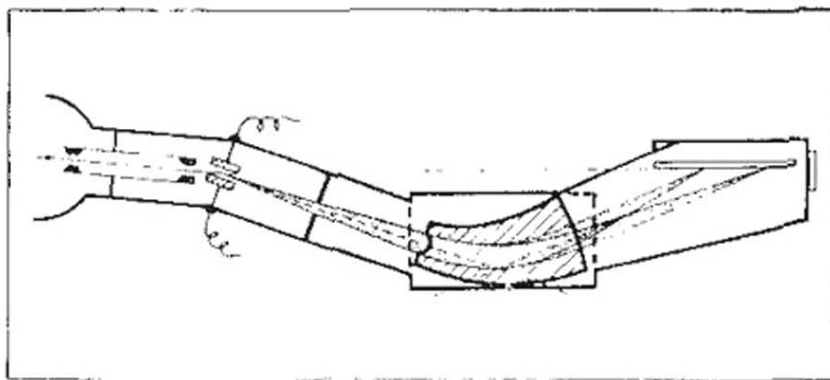


Figura 5.1

Su idea consiste en lo siguiente. Al campo eléctrico del condensador llegan partículas con diferentes valores de las velocidades. Destaquemos mentalmente un grupo de partículas con igual relación e/m . El flujo de estas partículas va a parar al campo eléctrico donde se desintegra: las partículas rápidas se desviarán menos en el campo eléctrico, y las lentas lo harán en mayor grado. Seguidamente, el abanico de estas partículas entra en el campo magnético perpendicular al dibujo. El campo está conectado de tal modo que desvía las partículas hacia Asia el lado opuesto. También aquí las partículas rápidas se desviarán en menor grado, y las lentas se desviarán más. De aquí se infiere que en algún lugar fuera de los límites del campo el haz de partículas iguales que hemos destacado mentalmente, volverá a acumularse en un punto, o sea, se enfocará.

Las partículas con un valor distinto de e/m también se acumularán en un punto, pero en otro. El cálculo demuestra que los focos para todos los e/m se situarán muy cerca de cierta recta. Si a lo largo de esta recta se dispone una placa fotográfica, las partículas de cada clase anunciarán su presencia por medio de una línea aparte.

Debido a la utilización del espectrógrafo de masas se descubrieron los isótopos. El honor de este descubrimiento pertenece a J. J. Thomson. En 1912, al estudiar la desviación de un haz de los iones del neón en los campos eléctrico y magnético el investigador prestó atención a que el haz se desdoblaba. La masa atómica del neón (o, más exactamente, la masa atómica relativa) está conocida con bastante precisión: ésta equivalía a 20,200. Se puso de manifiesto que, en la realidad, los átomos del neón pueden ser de tres clases. Sus números de masa son 20, 21 y 22 (los números de masa son masas atómicas relativas redondeadas hasta números enteros).

Por cuanto las propiedades químicas del neón no dependían de su masa, los físicos, bastante pronto, se cercioraron de que las diferencias están relacionadas tan sólo con el núcleo. La carga del núcleo y el número de electrones quedan sin variar, en consecuencia, las distintas clases de los átomos del neón deben ocupar el mismo lugar en la tabla de Mendeleiev. De aquí, precisamente, deriva su nombre: isótopos significa los que ocupan el mismo lugar.

En los años de 1920 el espectrógrafo de masas adquirió sus rasgos contemporáneos y comenzó el estudio de la composición isotópica de todos los elementos. Todos los

elementos, sin excepción, representan una mezcla de isótopos. Entre aquéllos se dan tales como hidrógeno u oxígeno que constan, principalmente, de un isótopo (el hidrógeno con el número de masa igual a 1 constituye un 99,986%; el oxígeno con el número de masa 10, un 99,76%). Pero existen también elementos con otra relación de los isótopos. A éstos pertenecen, por ejemplo, el cloro (el 75%, el isótopo con el número de masa 35, y el 25%, el isótopo con el número de masa 37). También hay elementos que se componen de un gran número de isótopos, hemos citado ejemplos de isótopos estables. Más adelante hablaremos sobre las variedades radiactivas (inestables, susceptibles de desintegrarse) de un mismo elemento.

Muy pronto, la calidad del instrumento se elevó hasta tal punto que se logró establecer: las masas de los isótopos se expresan por números enteros solamente hasta el segundo-cuarto signo decimal. Las causas de esta desviación se expondrán después.

Por cuanto la masa de los núcleos no influye en el comportamiento químico, queda claro que existen muchos compuestos químicos que se diferencian por su composición isotópica. Se dice que hay dos variedades de agua: agua común y agua pesada, en el agua común está presente el isótopo de hidrógeno con el número de masa 1, y en el agua pesada, el llamado deuterio, o sea, el isótopo de hidrógeno con el número de masa 2. Sin embargo, en la naturaleza se encuentran tres isótopos de oxígeno, con los números de masa 16, 17 y 18, por consiguiente, el agua es una mezcla de moléculas de seis tipos diferentes. Si las moléculas de la sustancia constan de un gran número de átomos, entonces, el número de variedades isotópicas puede medirse por decenas y centenas.

La separación de los isótopos es una rama importante de la industria. Esta tiene un valor especialmente grande para una serie de procesos que acompañan la obtención de energía atómica. Es necesario tener la posibilidad de separar el agua pesada de la ligera, distribuir por diferentes receptores los átomos de distintas clases del combustible nuclear: del uranio y del torio. Se podría continuar la lista de semejantes tareas que la industria plantea ante los físicos.

La complejidad consiste en que por su estructura electrónica y, en consecuencia, también por sus propiedades químicas, los átomos se diferencian en un grado

extremadamente insignificante. Para los átomos ligeros, con enorme dificultad, aplicando la extracción química multi-etápica se logra llevar a cabo tal separación. Y para los átomos pesados se consideraba que era posible aplicar tan sólo los métodos físicos que utilizan las pequeñas diferencias en la masa de un progreso los núcleos atómicos.

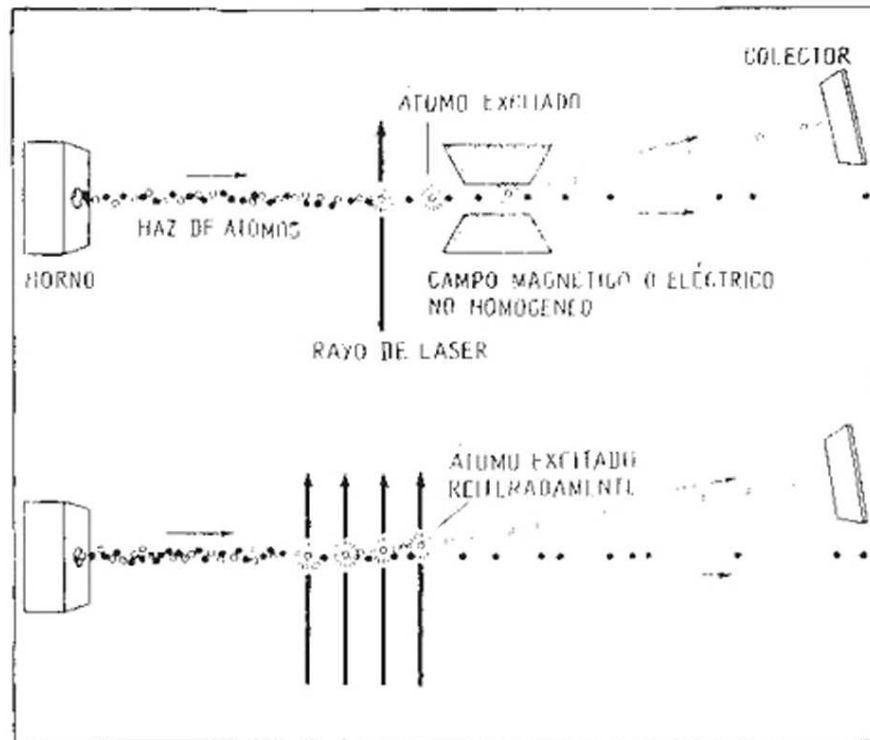


Figura 5.2

Hasta el día de hoy el método que goza de mayor extensión es el de difusión de los gases. Las moléculas que contienen isótopos de masas distintas se diferenciarán ligeramente por la velocidad de paso a través de una barrera porosa. Las moléculas ligeras salvan el obstáculo con mayor rapidez que las pesadas.

Se sobreentiende que también se puede recurrir a la separación basada en el principio del espectrógrafo de masas que acabamos de describir. No obstante, estos dos métodos requieren mucho tiempo y su aplicación cuesta muy caro.

Tan sólo unos años atrás se ha demostrado que la separación de los isótopos puede realizarse por un procedimiento nuevo de principio, utilizando los láseres. El

carácter idóneo del láser para este fin, está relacionado con el hecho de que con su ayuda puede generarse un rayo de monocromaticidad excepcionalmente alta. Por supuesto, la diferencia de las distancias entre los niveles de energía ocupados por los electrones de dos variedades isotópicas de un mismo elemento es sumamente insignificante.

Es que dicha diferencia viene condicionada únicamente por la masa del núcleo, puesto que las cargas de los núcleos de dos isótopos son iguales. Y son precisamente las cargas las que determinan, en lo fundamental, la disposición de los niveles electrónicos. El rayo de láser es tan estrictamente monocromático que es capaz de poner en estado de excitación los isótopos de una variedad, dejando en estado no excitado los átomos de otra variedad.

En la figura 5.2 vienen representadas dos operaciones de separación de los isótopos empleando el láser. El gas de átomos o moléculas sale del orificio del horno. El rayo de láser excita los átomos de una variedad isotópica. Por regla general, los átomos excitados poseerán un momento eléctrico o magnético. Por esta razón, el campo magnético o eléctrico no homogéneo los desviará hacia cierto lado (el esquema superior).

El segundo procedimiento se utiliza en el caso de que los átomos excitados se desexcitan rápidamente. En este caso, al pasar por el espacio dominado por el rayo de láser, el mismo átomo se excita por segunda vez, es decir experimenta varias colisiones inelásticas con los fotones. Cada absorción del fotón lleva a que el átomo adquiere un impulso dirigido hacia el lado de acción del rayo de láser. Los átomos capaces de excitarse, simplemente se empujan hacia arriba, mientras que los átomos de la variedad que no absorbe fotones se propagan sin desviarse.

El primer experimento de este tipo coronado con éxito fue efectuado con un haz de átomos del bario que se irradiaban con la luz de láser cuya longitud de onda era de $0,55535 \mu\text{m}$. La absorción de un fotón desplazaba el átomo en $0,8 \text{ cm}$ durante 1 s , siendo la velocidad longitudinal de $50\,000 \text{ cm/s}$.

Radiactividad

En el libro 3 se ha relatado brevemente de qué modo Rutherford había establecido que el átomo consta de un minúsculo núcleo y de electrones que se mueven

alrededor de éste. Ahora tenemos que abrir ante el lector una de las más importantes páginas de la física, aquella en la que vienen anotados los hechos acerca de la estructura del núcleo atómico de protones y neutrones. Por muy extraño que parezca, la historia de este descubrimiento comienza quince años antes de que Rutherford, con sus experimentos sobre la dispersión de las partículas alfa (α) por medio de hoja fina, demostrara la validez del modelo nuclear del átomo.

En primavera de 1896, el físico francés Enrique Becquerel (1852-1908) descubrió que el uranio emite rayos cuya acción se asemeja a la de los rayos X. De la misma manera que los rayos X de Roentgen descubiertos unos meses antes, los rayos de uranio velan las placas fotográficas y pasan a través de objetos no transparentes. Su absorción es proporcional a la densidad del objeto interpuesto entre el uranio y la placa fotográfica. Si el cuerpo es no transparente a estos rayos, en la placa se perfilan los contornos nítidos del objeto. Los rayos de uranio, lo señalamos otra vez, al igual que los rayos X son capaces de ionizar el aire, y por esta ionización se puede muy bien valorar su intensidad.

En los descubrimientos de Becquerel y de Roentgen hay un parecido, es el elemento de casualidad. Sin embargo, la casualidad por sí sola nunca interviene, origen de un importante descubrimiento científico. Al igual que después del descubrimiento de Roentgen había personas quienes, con antelación de varios años, «habían visto» los rayos X, de la misma manera, después del descubrimiento de Becquerel se esclareció que por lo menos tres personas habían observado el ennegrecimiento de la placa fotográfica que se encontraba cerca de las sales de uranio. Pero, ¡no basta con «ver»! Es necesario fijarse y poner en claro la verdadera causa del fenómeno, Roentgen y Becquerel lo hicieron, y no sus precursores. Esta es la razón de que ellos, precisamente, se granjearon el honor y la fama.

El camino hacia el descubrimiento de Becquerel pasó por las siguientes etapas. Como hemos relatado ya, los rayos Roentgen en los primeros tubos incidían sobre el vidrio. Por acción de los rayos catódicos el vidrio se ponía fluorescente. Debido a ello, lógicamente surgía la idea de que los rayos penetrantes acompañan la fluorescencia. Becquerel inició sus trabajos efectuando, precisamente, experimentos con sustancias que se ponen fluorescentes por impacto de la luz solar. Bastante pronto el científico averiguó que los rayos penetrantes tienen su origen en

diferentes minerales que contienen uranio. Esto de por sí ya era un descubrimiento. Sin embargo, Becquerel no tenía prisa de anunciarlo al mundo científico. Era necesario repetir los experimentos varias veces. Pero el sol, como a despecho, durante algunos días se empeñó en no aparecer en el cielo. Las placas fotográficas, junto con los minerales estudiados, en espera del cariñoso sol se encontraban en el cajón de la mesa de laboratorio. Por fin, el 1 de marzo de 1896 relució un día de sol. Podían comenzarse los experimentos. Pero antes de comenzar el trabajo Becquerel decidió comprobar la calidad de las placas. Se dirigió al cuarto oscuro, reveló una de las placas y vio en ésta siluetas nítidas de las muestras del mineral. Más no había fluorescencia alguna. Por consiguiente, no en ésta reside el quid de la cuestión.

Becquerel repite los experimentos «a oscuras», cerciorándose de que sus minerales dan origen a una radiación penetrante que se crea «por sí misma», sin asistencia alguna de la luz externa.

El minucioso examen de numerosas muestras llevó a Becquerel a la idea de que el manantial de los rayos es el uranio. Si el mineral no contiene uranio, tampoco aparece la radiación penetrante. Para que la demostración fuese completa era necesario investigar uranio puro. Y este elemento constituía una gran rareza. Becquerel consiguió uranio de su amigo químico Moissan. En la misma reunión de la Academia de Ciencias francesa, Moissan informó sobre su método de obtención de uranio puro y Becquerel comunicó que el uranio emite rayos. Estos informes fueron hechos el 23 de noviembre de 1869. Tan sólo cincuenta años separan este descubrimiento de la bomba atómica lanzada sobre Hiroshima.

Transcurrió un año. En otoño de 1897 comienzan sus experimentos dos jóvenes físicos, los esposos Curie. Los jóvenes entusiastas trabajan en un frío cobertizo. María Curie (1807-1934) eligió como tema de su tesis la investigación de las particularidades químicas de las muestras que dan la radiación penetrante de Becquerel.

El intenso trabajo conduce a un descubrimiento tras otro. En primer término, se esclarece que además del uranio también el torio emite rayos penetrantes. La intensidad de los rayos se mide por la intensidad de la corriente de ionización. Curie corrobora la conjetura de Becquerel de que la intensidad de los rayos penetrantes

no depende del hecho de en la composición de cuáles compuestos químicos entran el uranio y el torio, sino es estrictamente proporcional al número de sus átomos. Y, de repente, un tiro fallado: la pechblenda, la mena de uranio con que trabajaban, da una ionización cuatro veces mayor de lo que le convendría de acuerdo con su contenido de uranio. Precisamente en los momentos de encontrarse en tales puntos cruciales se revela el talento del investigador. Una persona sin talento no se hubiera renunciado a sospechar que la culpa de todo la tenían los átomos de uranio.



María Sklodowska Curie (1807-1934), destacada mujer de ciencia. En 1898, al investigar la radiación (cuya naturaleza en aquel entonces se ignoraba) del uranio y del torio, puso de manifiesto que en las menas de estos elementos se contienen sustancias cuya capacidad de radiación es mucho más fuerte. Separó el polonio y el radio. Madame Curie junto con su esposo Pierre Curie introdujeron en uso el término “radiactividad”. Los descubrimientos de María Sklodowska-Curie en el acto,

fueron mantenidos por Rutherford llevando al establecimiento de las leyes de la desintegración radiactiva de los átomos.

Más María Curie se da cuenta de que este fenómeno puede tener otra explicación. Puede suceder que la pechblenda contiene, en una cantidad pequeña, algún elemento químico hasta entonces desconocido que acusa la propiedad de producir una radiación penetrante intensísima. La conjetura resultó ser justa. La gigantesca labor de María Curie, que, sin hiperbolizar, puede llamarse heroica, conduce a que, al principio, ella separa el elemento polonio (este nombre no es casual, y es que Maria Curie, nacida Sklodowska, es de nacionalidad polaca) y, seguidamente, el radio (de «radiante»). El radio manifestó ser casi mil veces más activo que el uranio puro.

Sin embargo, prosigamos nuestra conversación en un ritmo más acelerado, sin tocar la sucesión histórica de los acontecimientos.

Después del descubrimiento del radio se hallaron también otras sustancias manantiales de rayos penetrantes. Todas éstas recibieron el nombre de sustancias radiactivas.

¿Qué es, en fin de cuentas, la radiación radiactiva?

El preparado radiactivo se colocaba en una caja de la que, bombeándolo, se eliminó el aire. Tras el preparado se situaba un obturador con ranura. El rayo pasaba a través de la ranura, incidía en una placa fotográfica y dejaba en ésta una huella. Pero, apenas la caja fue puesta entre los polos de un imán, en la placa revelada se detectaron tres trazas. El rayo radiactivo se separó en tres componentes. Una se desvió hacia el lado a que debía doblar el flujo de partículas cargadas negativamente, la segunda componente no era sino un flujo de partículas positivas y la tercera componente no se desviaba. Por lo visto, era pariente del rayo X.

Empleando los métodos que ya hemos discutido se logró demostrar que, en el caso general, la radiación radiactiva se compone del flujo de electrones (antes de haber averiguado que se trata de electrones, estos rayos llevaban el nombre de rayos beta), del flujo de núcleos de los átomos de helio (partículas alfa) y de una radiación electromagnética dura (rayos gamma).

Desintegración radiactiva

¿Ocurren algunos acontecimientos con los átomos fuentes de radiación radiactiva? Sí, ocurren. Y estos acontecimientos son absolutamente sorprendentes. En 1902, el mismo Rutherford (sobre cuyo descubrimiento de la estructura del átomo en 1911 hemos relatado ya hace mucho, despreciando la sucesión histórica de los acontecimientos) demuestra que a resultas de la radiación radiactiva tiene lugar la transformación de una clase de átomos en otra.

Rutherford presumía que los químicos recibirían a bayoneta calada su hipótesis aunque ésta se basaba en rigurosas pruebas experimentales. Electivamente, al demostrar que existen las transmutaciones de los átomos, atentamos contra el sanctasanctórum: contra la indivisibilidad del átomo. Y al afirmar que podemos obtener plomo a partir del uranio realizamos el sueño de los alquimistas cuya «fama» no era, en modo alguno, más honorífica que la de los astrólogos.

Sin embargo, muy pronto, los adversarios retrocedieron bajo el peso de las pruebas y, pasado cierto tiempo, el fenómeno de la desintegración radiactiva natural de algunos átomos fue demostrado de una manera incuestionable tanto por los métodos químicos, como por los físicos. ¿En qué consiste, entonces, la transformación radiactiva?

En primer lugar, resultó que los rayos electrónicos que entran en la composición de la radiación radiactiva salen del núcleo. Ahora bien, si es así, la carga del núcleo aumenta en una unidad, y el átomo radiactivo se transforma en átomo subsiguiente, según el orden de la tabla de Mendeleiev.

La partícula alfa es portadora de doble carga positiva y tiene una masa que supera cuatro veces la del átomo de hidrógeno. Si el núcleo expulsa semejantes partículas, debe tener lugar el «desplazamiento» del átomo a la izquierda según el orden de los elementos en la tabla de Mendeleiev con la correspondiente transformación de isótopos.

Será completamente trivial (a semejanza de «el hierro se extrae de las menas de hierro») la afirmación de que están sujetos a la desintegración radiactiva los átomos inestables.

Ignoramos si habían existido muchas clases de tales átomos cuando el globo terráqueo comenzó a enfriarse. Pero sabemos de modo perfecto qué átomos

inestables pueden hallarse en la naturaleza actualmente. Resulta que son miembros de tres clanes. Los progenitores son el átomo de uranio con el número de masa 238, el átomo de uranio con el número de masa 235 y el átomo de torio con el número de masa 232.

En la fig. 5.3 se ilustra la primera familia. La primera transmutación consiste en lo transición de ^{238}U a ^{234}Th que se produce debido a la expulsión de partículas alfa.

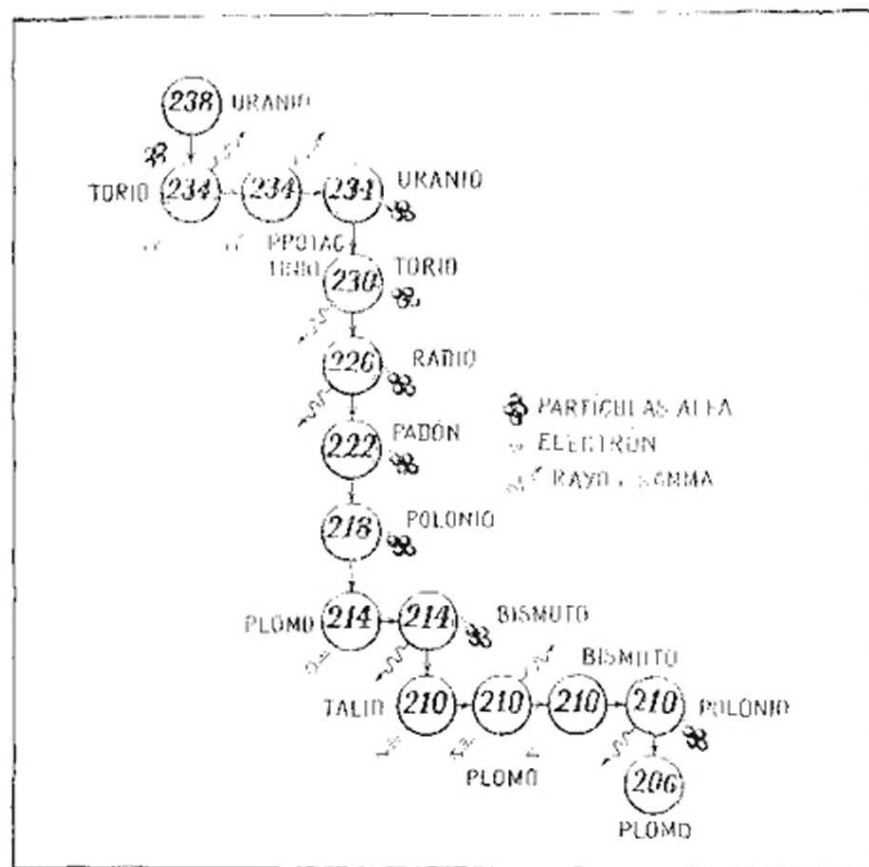


Figura 5.3

Le siguen dos transmutaciones beta que transforman torio en protactinio y protactinio otra vez en uranio, pero ya en isótopo con el número de masa 234. A continuación tenemos cinco transmutaciones consecutivas alfa que nos hacen descender hasta el isótopo inestable de plomo con el número de masa 214. Dos «zigzag» más y el proceso de desintegración se consuma: el isótopo de plomo con el número de masa 200 es estable. La destrucción de cada átomo aislado es

accidental. Existen átomos «felices» que poseen gran longevidad, pero también se dan otros que viven pocos instantes.

Pero cualquiera que sea el caso, es imposible prever cuándo tendrá lugar la transformación del átomo dado. ¿Acaso podemos adivinar el día de «defunción» de nuestro gato casero? Sin embargo, cada especie de animales tiene su plazo medio de vida. De la misma forma, cada especie de átomos tiene su tiempo medio de existencia sumamente estricto. Por lo demás, el comportamiento de los átomos difiere sustancialmente del modo de vida de los animales. La vida de los átomos inestables, a diferencia del plazo medio de vida de los seres animados no depende de ninguna condición exterior. No hay nada que sea capaz de variar el tiempo medio de desintegración. Por cada unidad de tiempo se fisiona siempre la misma parte de los átomos:

$$\frac{\Delta N}{N} = \lambda dt$$

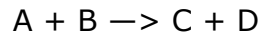
Esta fórmula es idónea tan sólo para el caso de que el quebrado $\Delta N/N$ no es grande. La magnitud λ es constante para cada transición radiactiva. En vez de utilizar esta constante, es más patente caracterizar la velocidad del proceso por el «tiempo de semi desintegración», es decir, por el tiempo que se necesita para que la mitad de cierta cantidad de sustancia radiactiva se someta a transformación. Para distintos elementos radiactivos este tiempo puede oscilar entre enormes límites. Por ejemplo, el período de semi desintegración del progenitor de la familia del ^{238}U que hemos examinado constituye 4,5 mil millones de años. Por el contrario, la mitad de los átomos del isótopo de plomo con el número de masa de 214 se desintegra en una millonésima de segundo.

Reacciones nucleares y el descubrimiento del neutrón

La transformación radiactiva es completamente análoga a la reacción química de descomposición. Había una sustancia química que más tarde, por acción del calor o de la luz, se desintegró en otras dos. Por ejemplo, el ácido carbónico se descompuso en agua y dióxido de carbono, de la misma manera, en el cuadro de

fisión que acabamos de examinar el núcleo del torio con el número de masa 230 se desintegra en el núcleo de radio y en el de helio.

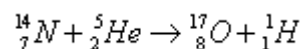
Por cuanto es posible la desintegración radiactiva, también, por lo visto, deben existir las reacciones nucleares que se desarrollan siguiendo el principio



Para conseguir que transcurra dicha reacción química conviene hacer chocar las moléculas de las sustancias A y B. Y para realizar una reacción nuclear es necesario hacer chocar dos núcleos atómicos.

Experimentos de esta índole, precisamente, comenzó a efectuar Rutherford desde 1919. Antes de haber aparecido en la escena los aceleradores de partículas. Las reacciones nucleares se llevaban a cabo bombardeando cierta sustancia con partículas alfa. Después de que se consiguió obtener flujos potentes de protones y de otros núcleos se descubrieron nuevas reacciones nucleares. Quedó claro que, de principio, se puede transformar un isótopo de todo elemento químico en otro. También es posible obtener oro a partir de otras sustancias. El sueño de los alquimistas se convirtió en realidad.

La primera reacción nuclear descubierta del tipo $A + B \rightarrow C + D$ fue la transformación del nitrógeno y helio en oxígeno e hidrógeno. He aquí cómo se anota semejante reacción:



Presten atención a que las sumas de las cifras superiores, así como las de las inferiores quedan invariables. Las cifras inferiores indican la carga del núcleo, y las superiores, la masa redondeada hasta un número entero, es decir, los números de masa, de este modo, actúa rigurosamente la ley de conservación de la carga eléctrica. En cuanto a la ley de conservación de la masa, ésta, como veremos a continuación, se realiza tan sólo aproximadamente. Ahora bien, la suma de los números de masa se conserva con el mismo rigor que la carga.

Aún en 1920 Rutherford sugirió que debía existir una partícula exenta de carga eléctrica y próxima por su masa al protón. A Rutherford le parecía que de otro modo sería difícil comprender cómo la partícula alfa cargada positivamente penetraba en el núcleo también cargado positivamente, pues las partículas de carga homónima se repelen.

La partícula sin carga que recibió el nombre de neutrón fue descubierta en 1932. No es difícil comprender por qué su descubrimiento se «demoró». Es que nosotros divisamos las partículas cargadas por las huellas (estelas) que dejan en el gas o en la emulsión fotográfica debido a su capacidad de ionizar las moléculas que encuentran en su camino.

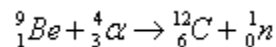


Ernesto Rutherford (1871-1937) ilustre físico y gran experimentador inglés. Por medio de finos y originales experimentos demostró en qué consiste la desintegración radiactiva. Con sus experimentos clásicos referentes a la dispersión

por la sustancia del flujo de partículas alfa fundamentó la teoría moderna de la estructura del átomo como sistema constituido por el núcleo y los electrones que se mueven alrededor de estos. Continuando sus experimentos en que bombardeaba con los núcleos diferentes blancos, fue el primero en realizar la transmutación artificial de los elementos

Pero una partícula eléctricamente neutra no interacciona con los electrones por cuya razón no deja huellas en su recorrido. De este modo, sólo se puede juzgar sobre la existencia de los neutrones por los efectos secundarios.

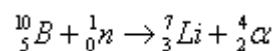
El neutrón fue descubierto al bombardear el berilio con partículas alfa. Esta reacción se escribe así:



El símbolo n pertenece al neutrón. ¿Pero cómo se puede creer en la existencia de una partícula que, por si misma, no deja huellas?

Basándose en sus efectos. Figúrense que en el paño verde de la mesa de billar se halla una bola de billar invisible para el ojo. Por la mesa rueda una bola bien vista la cual, de pronto, «sin más ni más», rebota a un lado. El físico no puede admitir que las leyes de conservación de la energía y del impulso le juegan una mala pasada. Por consiguiente, llega a la conclusión de que la bola visible chocó contra otra, invisible. Más aún, valiéndose de las leyes de conservación, puede determinar todas las características de la bola invisible, averiguando a qué ángulo se desvió la bola visible respecto a la línea de su vuelo y cómo varió su velocidad.

El número de neutrones se determina de la siguiente forma. En el camino del haz de neutrones se coloca una sustancia que contiene átomos de boro. Al encontrarse con el núcleo de este elemento, el neutrón deja de existir. Se desarrolla la siguiente reacción:



El neutrón desapareció, en cambio, hizo su aparición la partícula alfa. Al registrar estas partículas cargadas que dejan una huella visible en los receptores de distinta clase, podremos medir con precisión la intensidad del haz de neutrones.

Existe una multitud de otros procedimientos que permiten determinar de un modo plenamente fidedigno todos los parámetros que caracterizan el neutrón y, en general, una partícula eléctricamente neutra. El conjunto de pruebas indirectas que se ajustan perfectamente es, a veces, no menos convincente que el examen atento de huellas visibles.

Propiedades de los núcleos atómicos

Antes del descubrimiento del neutrón los físicos suponían que el núcleo atómico está constituido por electrones y protones. Esta hipótesis implicaba muchas contradicciones, de modo que se frustraban los intentos de crear la teoría de la estructura del núcleo. Apenas se hubo encontrado el neutrón surgido durante las colisiones nucleares, inmediatamente apareció la idea de que el núcleo atómico estaba constituido por neutrones y protones. Por primera vez esta hipótesis fue enunciada por el físico soviético D. D. Ivanenco.

Desde el mismo principio quedó claro que la masa del neutrón, si bien no es igual a la del protón, por lo menos es próxima a ésta. Debido a ello, inmediatamente surgió la interpretación precisa de las diferencias entre los isótopos de un mismo elemento.

Como vemos, a cada isótopo se puede asignar dos números. Uno de éstos es el número atómico Z en la tabla de Mendeleiev que es igual a la cantidad de protones en el núcleo. Por esta causa, el número atómico determina el número de electrones ligados con el núcleo. Y, siendo así, resulta claro que es precisamente el número atómico el que debe responder por el comportamiento químico de los elementos (ya que las reacciones químicas no afectan los núcleos).

En lo que se refiere al número de masa este es igual al número total de neutrones y protones, de esto modo, los isótopos de un mismo elemento se diferencian entre sí por el número de neutrones en el núcleo.

Por medio de experimentos muy precisos se hallaron las características de ambas partículas que forman el núcleo. La masa del protón es igual a $1,6726 \times 10^{-24}$ g, o

sea, ésta es 1836 veces mayor que la masa del electrón. El espín del protón es igual a $1/2$, y el momento magnético es de $1,41 \times 10^{-23}$ unidades CGS. La masa del neutrón supera insignificadamente la del protón, a saber, es igual a $1,6749 \times 10^{-24}$ g. El espín del neutrón es de $1/2$. El momento magnético del neutrón es antiparalelo al espín y vale $0,966 \times 10^{-23}$ unidades CGS.

Los espines y los momentos magnéticos de los núcleos atómicos se investigan por diferentes métodos: se aplican la espectroscopia óptica, la radioespectroscopía, el estudio de la desviación de los haces de partículas en el campo magnético no homogéneo. Nos hemos detenido en los principios generales de estas mediciones en el libro 3 y en los capítulos anteriores del presente libro. Por el momento, nos limitaremos tan sólo con la exposición de los datos principales obtenidos en los últimos decenios por la gran cohorte de los físicos.

En primer lugar, hay que subrayar que las leyes de la física cuántica referentes al momento de impulso son válidas para todas las partículas. Por esta razón, también para los núcleos atómicos del momento de impulso puede representarse por la fórmula

$$\sqrt{S(S+1)} \frac{h}{2\alpha}$$

Aquí, la magnitud h es la constante de Planck con la que se debe topar en todas las fórmulas de la física cuántica.

Habitualmente, no es esta expresión la que se denomina espín, sino el parámetro S . La teoría demuestra rigurosamente y el experimento confirma a la perfección que el espín de cualquier partícula puede ser igual tan sólo a $0, 1/2, 1, 3/2$, etc.

Examinando las tablas de valores de los espines de distintos núcleos atómicos (obtenidos en diferentes experimentos) podremos ver una serie de regularidades interesantes. En primer término, los núcleos que contienen un número par de protones y, también, un número par de neutrones tienen el espín del núcleo igual a cero (^4He , ^{12}C , ^{18}O). En general, al número de nucleones (es decir, partículas nucleares) que es múltiplo de cuatro le pertenece, por lo visto, un papel grande. En muchos casos (pero no en todos, ni mucho menos) el espín del núcleo atómico

puede obtenerse de la siguiente manera: del número de masa 1 sustraemos el múltiplo de cuatro más próximo a dicho número y multiplicamos el otro que queda por $1/2$. Por ejemplo, el espín del litio-6 es igual a $2 \times 1/2 - 1$; el del litio-7, $3/2$; el del boro-10, 1, y el del boro-11, $3/2$,

Resulta ser una regla la circunstancia bastante evidente: los núcleos con el número de masa A par tienen el espín entero o igual a cero, y el espín de los núcleos con A impar es múltiplo de $1/2$.

El principio de exclusión de Pauli es aplicable a los protones y neutrones del núcleo. Dos partículas idénticas pueden disponerse en un nivel de energía tan sólo a condición de espines anti paralelos. Puesto que el protón y el neutrón son partículas diferentes, en un nivel pueden existir dos protones y dos neutrones. En este nutrido grupo con el espín igual a cero reconocemos el núcleo del átomo de helio (partícula alfa).

La existencia del espín significa la existencia del momento magnético. Entre el impulso mecánico L y el momento magnético M existe, como sabemos, una proporcionalidad directa. Al mismo tiempo, el momento magnético puede ser ya sea paralelo, o bien, anti paralelo al espín.

Bosones y fermiones

Hemos recalcado reiteradas veces que un nivel de energía lo pueden ocupar únicamente dos partículas con espines orientados en direcciones opuestas. Llegó el momento de señalar que este principio (principio de exclusión de Pauli) es válido sólo para una clase de partículas que recibió el nombre de fermiones. Pertenecen a los fermiones los electrones, los protones y los neutrones. También conviene decir que todo sistema conexo compuesto de un número impar de fermiones también es fermión. La segunda variedad de partículas se denomina bosones. Entre éstos se incluyen el fotón, algunas partículas elementales de vida corta (tales como, por ejemplo, el pión) y, lo que es lo principal, todas las partículas que constan de un número par de fermiones.

El número de bosones que encuentran en un nivel de energía no está limitado. Para que el lector asimile mejor la diferencia entre los bosones y los fermiones, insertamos la fig. 5.4. En esta figura cada círculo simboliza una pareja de partículas

con espines opuestos. A temperaturas muy bajas los bosones, fundamentalmente, se acumulan en el nivel de energía más bajo. Los fermiones están dispuestos en la figura en forma de una columna.

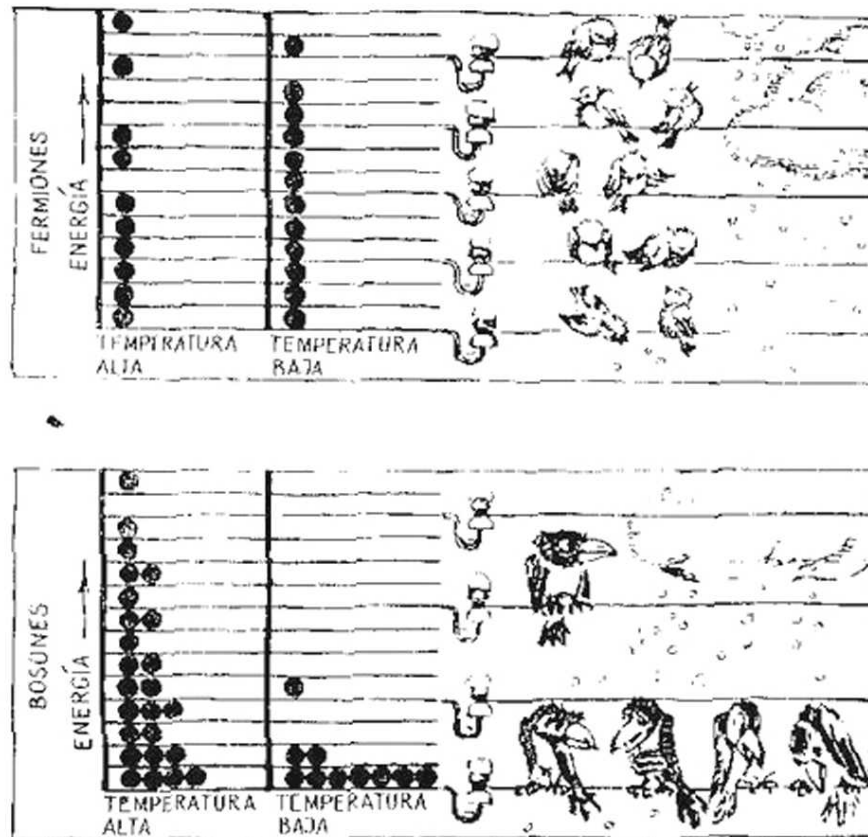


Figura 5.4

Resulta bien evidente que las diferencias en el comportamiento de los fermiones y los bosones se manifiestan con mayor claridad a bajas temperaturas. Y a las temperaturas extremadamente bajas el número de bosones dispuestos en la «bodega» puede ser casi igual al total de estas partículas.

Lo que hemos expuesto hasta el momento dado no es necesario «comprender» ¡basta con retenerlo en la memoria! Pues lo dicho es la verdad en última instancia. No obstante, siento pesar cada vez que me veo obligado a comunicar al lector, sin demostrarlas, algunas tesis que pueden demostrarse pero tan sólo de ecuaciones matemáticas que distan mucho de ser simples. De este modo resulta que los

bosones en algunos casos pueden, y en otros no, acumularse en un nivel de energía en grandes cantidades. Si pueden hacerlo, decimos que tuvo lugar la condensación de Bose— Einstein.

Cuando va a parar a un nivel un número grande de partículas, entonces, en este caso, su movimiento llega a ser idealmente concordado. Las partículas-gemelas, sin hacer caso al caos térmico, se desplazan de una forma absolutamente idéntica.

En el libro 2 hemos relatado sobre un admirable líquido que a baja temperatura posee superfluidez. Este líquido es la acumulación de átomos de ^4He . Los átomos de este isótopo son bosones. A la temperatura de 2,19 K tiene lugar la condensación de las partículas que imparte al líquido la admirable propiedad de superfluidez. La pérdida de rozamiento en rasgos generales puede explicarse de la siguiente forma: si solamente un átomo logra pasar a través de la finísima ranura, en pos de éste signen obedientes todos los demás.

Hemos trabado conocimiento no con uno, sino con dos fenómenos en los cuales el flujo de partículas se mueve sin hacer caso a los obstáculos. El movimiento superfluido de los átomos de ^4He recuerda la corriente eléctrica sin resistencia que se descubre en muchos metales y aleaciones también a bajas temperaturas.

Pero, los electrones son fermiones. No pueden formar una fila única. La salida de la situación fue hallada en 1956 cuando los científicos norteamericanos promovieron una teoría de acuerdo con la cual por debajo de cierta temperatura los electrones pueden concatenarse en parejas. Como hemos dicho desde el mismo principio, una pareja de fermiones es un bosón. Por consiguiente, la superconductividad aparece en el momento en que tales bosones se condensan en un nivel de energía. En esencia, a estos dos admirables fenómenos: la superconductividad y la superfluidez, se da una misma explicación. Una partícula elige el camino que es «más trillado y fácil» y todas las demás la siguen.

Si la idea de transformación de los fermiones en bosones a costa de la concatenación en parejas es justa, entonces surge mía pregunta lícita: ¿no puede el isótopo ^3He que posee un espín y es un fermión también resultar superfluido, al igual que ^4He ?

Desde el mismo principio era evidente que, incluso si dicho fenómeno existe, en todo caso, éste tiene lugar a temperaturas mucho más bajas que la de transición al

estado superfluido del isótopo básico ^4He . La causa está clara: el núcleo del átomo de ^3He consta de dos protones y un neutrón. En consecuencia, pesa un 25% menos que su compañero, se sobreentiende que, por esta causa, el movimiento térmico de ^3He será más intenso, y la organización de un desfile armonioso de los bosones llegará a ser posible a temperaturas más bajas. Pero, ¿a cuáles temperaturas, precisamente? Por desgracia, la teoría no acertó a vaticinar la temperatura de transición del ^3He al estado de superfluidez. Se requirió una tenacidad fantástica y la superación de enormes dificultades antes de que, en 1974, se obtuviera el ^3He superfluido.

¿A qué temperatura se produce esta transición? He aquí la respuesta He aquí la respuesta que merece que la impriman en letra gruesa: a una temperatura igual a 0,0027 K. Es posible que el lector diga: «Qué va, tan sólo dos grados menos que la temperatura de la transición análoga del ^4He ». ¡Cuánto se equivoca! Estos dos grados valen mucho más que, digamos, el enfriamiento en 2 grados desde la temperatura de 20 hasta la de 18 °C. En este suceso cotidiano la temperatura disminuyó 293/291 veces, y en el caso a que nos referimos la temperatura disminuyó mil veces. Este es un enorme éxito de la física experimental y triunfo de la teórica que presagió el apareado de los átomos de ^3He en un par bosónico.

Una imagen patente ayuda a recordar, con este objeto, en la fig. 5.5 inserta el esquema del par. Los momentos magnéticos de dos átomos están orientados en una dirección. De este modo, la transición del ^3He al estado de condensación de Bose— Einstein debe acompañarse por la variación a salto de la frecuencia de la resonancia magnética. La causa de ello reside en que el par se comporta como un todo único. Precisamente esta circunstancia se puso de manifiesto en el experimento. Es, realmente, una página brillante de la física y sería injusto no contar sobre ésta al lector, a pesar de que falta la posibilidad de esclarecer en qué condiciones y en base de qué causas tiene lugar el apareado de los fermiones en un par bosónico.

La masa y la energía del núcleo atómico

Hemos mencionado de paso que el número de masa redondea el valor exacto de la masa del núcleo basta el número entero.

Hoy en día, se suele elegir la unidad de masa atómica (hablarnos sobre el particular en el libro I) como $1/12$ parte de masa del isótopo de carbono ^{12}C .

Las masas relativas de los isótopos de todos los átomos se diferencian de los números enteros aunque insignificante, pero tan esencialmente que no se puede, de ningún modo, atribuir estas diferencias a los errores del experimento. La masa del ^1H es igual a 1,00807, y la masa del deuterio no es, en absoluto, dos veces mayor, sino constituye 2,01463.



Figura 5.5

Al estudiar con atención las tablas de masas de los isótopos se puede llegar a la siguiente conclusión importante: la masa del núcleo es menor que la suma de masas de las partículas elementales que forman el núcleo. Por ejemplo, la masa del neutrón es de 1,00888, la masa del protón es de 1,008807; la masa de dos neutrones y dos protones es igual a 4,0339 (en unidades de masa atómica: 1 u.m.a. = $1,66 \times 10^{-27}$ kg). Al mismo tiempo, la masa del núcleo del átomo de helio que consta de dos neutrones y dos protones no es igual a este número, sino es de 4,0038. De este modo, la masa del núcleo de helio es menor que la suma de masas de las partículas constituyentes del núcleo en la magnitud de 0,0301 u.m.a. que supera miles de veces la exactitud de las mediciones.

Indudablemente, estas pequeñas diferencias encierran un profundo sentido. ¿Pero qué sentido?

La respuesta a esta pregunta la aportó la teoría de la relatividad. Y su aparición en las tablas en este momento fue, sin duda alguna, más impresionante que en la época en que el experimento había confirmado la dependencia de la masa del electrón respecto a la velocidad de su movimiento. El hecho de que la suma de masas de los protones y neutrones que constituyen el núcleo es menor que la masa del núcleo, fenómeno que recibió el nombre de defecto de masa (una mala traducción del inglés, ya que la masa no acusa una imperfección, sino disminuye) obtiene una interpretación precisa y clara a la luz de la célebre fórmula

$$E = mc^2$$

Cuando un sistema adquiere o pierde la cantidad de energía ΔE , la masa de este sistema aumenta o disminuye, respectivamente en el valor

$$\Delta m = \Delta E / c^2$$

El defecto de masa del núcleo (desde el punto de vista de este principio) obtiene una interpretación natural: es la medida de la energía de enlace (de ligadura) de las partículas nucleares.

En química y física se entiende por energía de enlace el trabajo que se debe invertir para conseguir la completa destrucción de este enlace. Si se lograra dividir el núcleo en varias partes, la masa del sistema incrementaría en el valor del defecto de masa Δm .

La destrucción del núcleo llevaría a la liberación de colosal energía. No es difícil calcular a grandes rasgos que la variación de la masa en una milésima parte de unidad de masa atómica, es decir, en $1,66 \times 10^{-27}$ g equivale a 1 Mev, aproximadamente.

Teniendo conocimiento de la masa atómica del núcleo, el lector, sin dificultad, descubrirá el siguiente hecho interesante. Si la energía que liga los protones y los neutrones en el núcleo se divide por el número de partículas, se obtiene el mismo

resultado, a saber: 8 MeV, para todos los núcleos (salvo algunos, los más ligeros). De aquí, incuestionablemente, deriva una importante consecuencia: entran en acción recíproca tan sólo los más próximos protones y neutrones, o sea, las fuerzas nucleares actúan a distancias cortas. Se convierten en prácticamente iguales a cero si se aleja del protón o del neutrón a una distancia del orden del tamaño de estas partículas (es decir, a 10^{-13} cm).

Es aleccionador comparar la magnitud 8 MeV con las energías de enlace químico de las moléculas. Dichas energías, habitualmente, son iguales a varios electronvoltios por átomo. Por consiguiente para desintegrar una molécula en átomos se requiere un consumo de energía varios millones de veces menor que para la fisión de un núcleo.

Los ejemplos aducidos evidencian de modo claro que las fuerzas nucleares alcanzan enormes valores. También es evidente que las fuerzas nucleares representan una nueva clase de fuerzas, puesto que son capaces de concatenar partículas cargadas de electricidad homónima. Las fuerzas nucleares no pueden reducirse a las eléctricas.

Las leyes a que se subordinan estas dos clases de fuerzas son sumamente distintas. Las fuerzas electromagnéticas disminuyen lentamente y los instrumentos registran los campos electromagnéticos a enormes distancias de las partículas cargadas. Por el contrario, las fuerzas nucleares se reducen con la distancia de una manera muy rápida. En realidad, fuera de los límites del núcleo cesan su acción.

Otra importante diferencia consiste en que las fuerzas nucleares (aproximadamente como las fuerzas de valencia químicas) acusan la propiedad de saturación. Cada nucleón, o sea, el protón o el neutrón entra en interacción con un número limitado de vecinos más próximos. En cambio, para las fuerzas electromagnéticas no existe tal limitación.

En consecuencia, ¿existen tres géneros de fuerzas: gravitacionales, electromagnéticas y nucleares? Por ahora, no se puede contestar con certidumbre a esta pregunta. Los físicos conocen también la cuarta clase de fuerzas que recibió el nombre poco acertado de «interacción débil». No hablaremos con el lector sobre ésta, tanto más que se abriga la esperanza de reducir esta interacción a las fuerzas electromagnéticas.

Energía de las reacciones nucleares

Hemos dilucidado dos hechos importantes. En primer término, entre los núcleos atómicos pueden desarrollarse reacciones de acuerdo con los esquemas muy parecidos a aquellos que conocen los químicos; en segundo término, los núcleos originarios y las nuevas partículas surgidas siempre se diferenciarán algo por la masa (ya que se conserva la suma de números de masa, y no la suma de masas de los moleos antes y después de la reacción).

Además, hemos visto que las más insignificantes diferencias en las masas se acompañarán de liberación o absorción de enormes cantidades de energía.

Las energías que se liberan o se absorben para las transformaciones nucleares no tienen punto de comparación alguno con el calor de las reacciones químicas. Con el fin de hacer una confrontación patente insertemos los siguientes ejemplos. Un gramo de carbón durante la combustión desprende una cantidad de calor suficiente para calentar hasta ebullición medio vaso de agua. Y he aquí qué cantidad de calor da la transformación nuclear: si se hubiera conseguido desintegrar por medio de partículas alfa todos los núcleos de un gramo de berilio, entonces, se desprendería una cantidad de calor suficiente para llevar a ebullición mil toneladas de agua.

Todo ello conocían perfectamente Rutherford y sus colaboradores. No obstante, el científico consideraba absolutamente irrealizable la utilización de las reacciones nucleares para fines prácticos (en aquel período a ninguno de los físicos se le ocurrió la idea sobre, la posibilidad de las reacciones en cadena). Recalquemos que en su falta de previsión de la revolución a la que dio origen su descubrimiento, Rutherford se unió a Faraday y Hertz, de lo que ya hemos hecho mención en el libro 3 citándolo como un interesante enigma psicológico. Pero, por cuanto sabemos qué siguió tras los modestos experimentos de Rutherford, se sobreentiende que necesitamos poco espacio para recordar al lector cuál es la esencia del mecanismo de desprendimiento y absorción de energía durante las reacciones.

Ante todo, quiero destacar no la diferencia, sino la semejanza de las reacciones químicas y nucleares.

Las reacción es del tipo en que las partículas A y B se transforman en partículas C y D liberan o absorben calor en dependencia de si se formaron partículas rápidas a

partir de las lentas, o bien, partículas lentas a partir de las rápidas. Así se desarrollan los acontecimientos en las reacciones químicas y, de manera idéntica, también en las reacciones nucleares. Prosigamos. Si de partículas lentas se formaron rápidas, esto significa que aumentó la energía cinética del sistema. Pero la ley de conservación de la energía admite semejante hecho sólo en el caso de que disminuyera la energía potencial del sistema. Es decir, en este caso la suma de energías internas de las partículas A y B es mayor que la suma de dichas energías de las partículas C y D. Así van las cosas en las reacciones químicas y precisamente así se comportan las energías internas de los núcleos.

De acuerdo con la ley de Einstein en la disminución de la energía interna está ligada de una manera unívoca con la disminución de la masa. El incremento de la energía interna conduce al crecimiento de la masa. Esto es característico para las reacciones químicas y también para las reacciones nucleares.

Pero en la química la ley de conservación de; la masa sí que se realiza. La suma de masas de las moléculas de A y B es igual a la suma de masas de las moléculas de C y D. En cambio, en las reacciones nucleares esta igualdad no se observa. De este modo, ¿se da una diferencia? No, de ningún modo. Se trata tan sólo de divergencias cuantitativas. Durante la transformación química las variaciones de energía y, por consiguiente, también de la masa, son tan insignificantes (insignificantes desde el punto de vista de la teoría relativista) que es imposible detectar en el experimento el cambio de las masas de las moléculas. Por lo tanto, la analogía entre ambos tipos de reacciones es de cien por cien.

Debido al importante carácter de lo dicho (con mucha frecuencia piensan que el desprendimiento de la energía nuclear es cierto proceso especial, mas no conviene pensar de esto modo) voy a exponer un razonamiento análogo para el caso en que la partícula A se desintegra en partículas B y C. Si la partícula se divide en partes «por sí misma», se dice de la partícula A que ésta es inestable. Si A es una molécula, se dice de la sustancia que ésta se descompone; si A es un núcleo, la sustancia es radiactiva. En ambos casos tiene lugar el desprendimiento de calor. Las partículas B y C poseerán cierta energía cinética que antes «no había». Esta energía surgió de la energía potencial. Hablando metafóricamente, se rompió el muelle que unía las partículas B y C en un todo único, y, empleando el lenguaje científico,

desapareció la energía de enlace. A costa de esta energía obtuvimos las partículas rápidas B y C, o sea, liberamos energía en forma de calor.

En el caso de reacción química no se descubre diferencia entre la masa de la molécula A y la suma de masas de las moléculas B y C formadas de ésta debido a la pequeñez de la energía. Pero en el caso de reacciones nucleares esta diferencia con facilidad se pone de manifiesto en el experimento. Los núcleos B y C se diferenciarán por su masa del núcleo A en el valor del defecto de masa.

El hecho de que cierta reacción produce calor no significa todavía, de por sí, que dicha reacción tendrá valor práctico. La condición de inestabilidad del sistema, el hecho de que la sustancia inicial se encuentra en un nivel de energía más alto que los productos de reacción es, como dicen los matemáticos, una condición necesaria pero no suficiente.

En el libro 2 hemos discutido detalladamente qué requerimientos deben ser llenados para que una sustancia pudiera servir de combustible químico. Sólo nos queda continuar la analogía entre las reacciones químicas y nucleares.

Así, pues, recordemos: no es suficiente que la reacción química produzca calor; es necesario que este calor «encienda» las moléculas vecinas.

De aquí queda claro que los físicos, también después de aprender a hacer chocar entre sí los núcleos atómicos con liberación de enormes cantidades de energía, no se acercaron, ni en menor grado, a la creación del combustible atómico.

En la transformación con partículas alfa tanto el berilio, como el litio no se comportan como combustible. Satisfacen el primer requisito planteado ante el combustible: producen energía. El litio y el berilio se comportan como pedacitos de carbón cada uno de los cuales debe encenderse por separado con un fósforo.

Hasta el mismo final de los años de 1930 la creación del combustible nuclear parecía una tarea absolutamente desahuciante.

Reacción nuclear en cadena

Comenzando por el año 1934, los trabajos realizados en lo fundamental por el físico italiano Enrique Fermi (1901—1954) y sus discípulos demostraron que los núcleos de los átomos de la mayoría de los elementos eran capaces de absorber neutrones lentos y a resultas de esto proceso se convertían en radiactivos.

En aquel tiempo eran conocidas las transmutaciones radiactivas que consistían en la emisión de electrones y partículas alfa (estas transmutaciones se acompañan de radiación gamma). Pero en 1938, una serie de investigadores (es interesante que el descubrimiento fundamental sobre el cual hablaremos ahora no tiene un autor único) revelaron que en el uranio activado con neutrones por el método de Fermi estaba presente un elemento parecido al lantano. Existía una sola explicación: por impacto de los neutrones el átomo de uranio se dividía en dos partes más o menos iguales. Inmediatamente se puso de manifiesto la extraordinaria importancia de este descubrimiento. Se trata de que para aquella época ya se conocía la siguiente ley: cuanto mayor es el número atómico, tanta mayor cantidad de neutrones contiene el núcleo. En el uranio, la relación del número de neutrones al de protones es igual a 1,6, aproximadamente. Y para los elementos tales como el lantano que se encuentran en la parte media de la tabla de Mendeleiev, esta relación oscila entre 1,2 y 1,4.

Pero, si el núcleo del uranio se divide en dos mitades aproximadamente iguales, entonces, los núcleos de los productos de fisión, de un modo inevitable, contendrán un «exceso» de neutrones. Estos núcleos expulsarán neutrones. Y los neutrones, precisamente, hacen las veces de «fósforos».

Se dilucida la posibilidad de una reacción en cadena. El primer cálculo de este fenómeno se remonta al año 1939. El curso dramático de los acontecimientos: la puesta en funcionamiento del primer reactor nuclear, la creación de la bomba atómica y su explosión en Hiroshima, se expone en todos los detalles en decenas de libros. Nos falta espacio para describir estos acontecimientos, de modo que hablaremos sobre el estado contemporáneo del problema.

En primer lugar, tenemos que esclarecer en qué consiste la reacción nuclear en cadena: en segundo lugar, cómo hacerla controlada y, en tercer lugar, en qué caso ésta conduce a la explosión.

En la fig. 5.6 se representa el esquema de una de las más importantes reacciones de este tipo: la de fisión del núcleo del uranio-235.

No habrá problema con el primer neutrón, éste se encontrará en la atmósfera. Pero, en el caso de que se desee poner un «fósforo» más eficiente, se podrá valer de una cantidad despreciable de mezcla de radio y berilio.

Al ir a parar al núcleo del uranio-235 que consta de 92 protones y 143 neutrones empaquetados densamente en una esfera de radio de 10^{-12} cm, aproximadamente, el neutrón penetra en este núcleo formando el isótopo del uranio-236. El forastero deforma el núcleo.

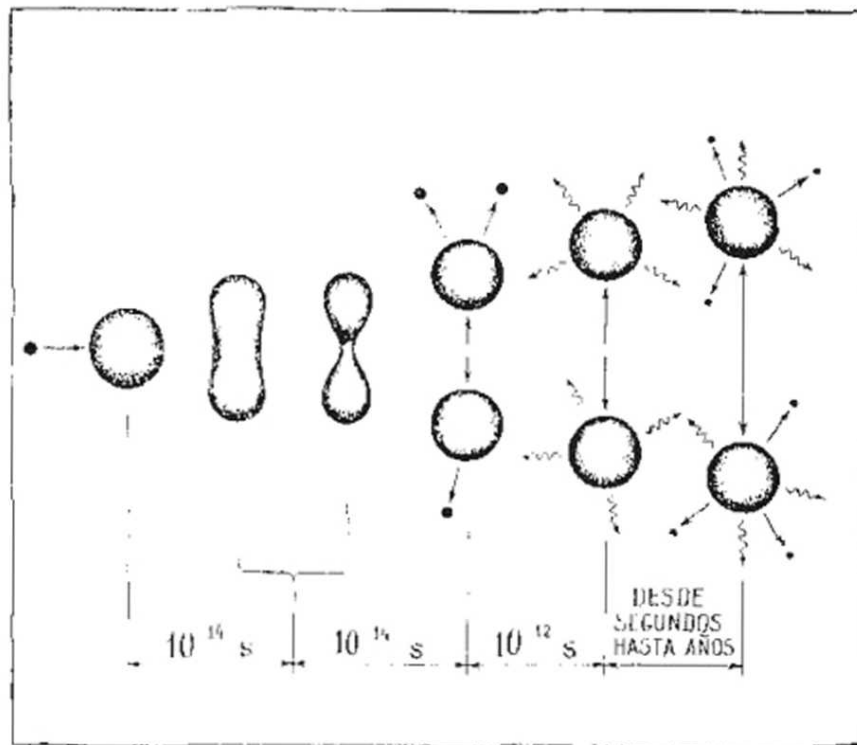


Figura 5.6

Dentro de un intervalo de tiempo del orden de 10^{-14} s, dos mitades del núcleo sólo se mantienen unidas por un pequeño puente. Otro intervalo de tiempo igual de pequeño, y el núcleo se fisiona en dos partes. Al mismo tiempo, ambos fragmentos formados expulsan de su seno dos o tres neutrones (en promedio, 2,56 neutrones). Los fragmentos se separan volando conteniendo colosal energía cinética. Un gramo de uranio-235 da la misma cantidad de energía que 2,5 t de carbón, en otras palabras, 22 000 kWh. Al cabo de 10^{-12} s los núcleos formados después de la fisión se «tranquilizan» más o menos irradiando en este caso ocho fotones de rayos gamma.

Los núcleos engendrados son radiactivos. Según sean los fragmentos que se hayan formado el proceso ulterior de desintegración puede durar desde varios segundos hasta muchos años acompañándose de emisión de rayos gamma y expulsión de electrones.

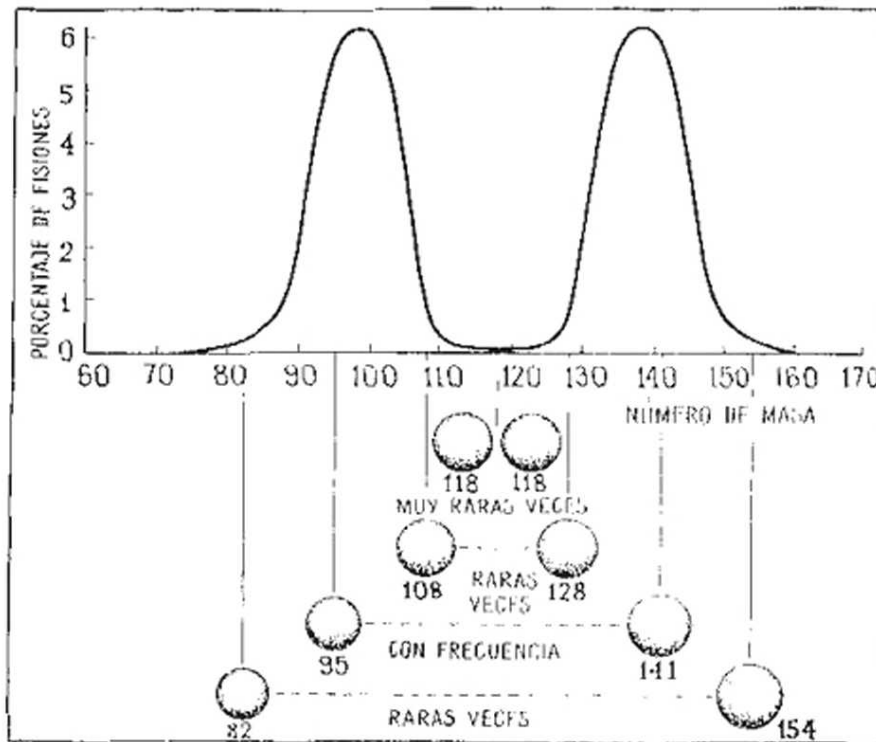


Figura 5.7

La fig. 5.7 muestra que con mayor frecuencia el núcleo del uranio-235 se fisiona en dos fragmentos desiguales. Como se ve de la curva, el número máximo de fisiones corresponde a la formación de núcleos con números de masa 141 y 95.

En todo caso, el surtido de fragmentos radiactivos que se forman es bastante grande. Pueden satisfacerse las más diversas demandas de la industria en elementos radiactivos artificiales.

Si los neutrones formados en la fisión de un núcleo son capaces de desintegrar los núcleos de otros átomos de uranio, la reacción en cadena será realizable.

Puesto que la sustancia es extraordinariamente «agujereada» respecto a su estructura nuclear, resulta en sumo grado considerable la probabilidad de que los

neutrones formados durante la fisión de algún núcleo abandonen la sustancia sin dar lugar a la desintegración de otros núcleos. Además, es necesario tener en cuenta el hecho de que no todo encuentro de los núcleos con los neutrones conducirá a la fisión. La reacción en cadena se desarrollará en el caso de que en cada momento posterior el número de neutrones que se hallan en el interior del pedazo de la sustancia sea igual a mayor que en el momento de tiempo precedente. El físico formula esta condición de la siguiente forma: el coeficiente de multiplicación de los neutrones (factor de multiplicación neutrónica), que es igual al producto del número de neutrones por la probabilidad de los encuentros del neutrón con el núcleo y la probabilidad de captura del neutrón por el núcleo, no debe ser menor que la unidad.

Esta es la razón de que el combustible atómico puro tiene masa crítica. Si esta masa es menor que la crítica, entonces se puede llevar tranquilamente (digamos mejor, más o menos tranquilamente) este trozo de combustible nuclear en el bolsillo. No le cargará mucho pues la masa crítica es próxima a un kilogramo.

Se sobreentiende cuán importante es saber la magnitud de la masa crítica. El primer cálculo de esta magnitud lo dio en 1939 F. Perrin, hijo de Joan Perrin. Hoy en día, este cálculo reviste tan sólo interés histórico ya que en aquella época todavía se ignoraba que en el uranio natural la reacción en cadena es imposible cualquiera que sea la cantidad de éste que se tomaba. Pero se necesitó muy poco tiempo para que el cuadro se aclarase. La coacción en cadena en el uranio natural no se desarrolla debido a que los neutrones obtenidos durante la fisión de los núcleos del uranio-235 se absorben a costa de la captura «de resonancia» por los átomos de uranio-238, formándose uranio-239 el cual, como resultado de dos consecutivas desintegraciones beta, se transforma en neptunio y plutonio. Solamente el uranio-235 y plutonio poseen masa crítica. Precisa monte aquellas sustancias que poseen masa crítica intervienen como combustible nuclear. Tales eran los datos de que los físicos ya disponían a principios de los años 40.

Si se crea una estructura en la cual, con sólo presionar el botón, se pueden unir dos pedazos de combustible nuclear, cada uno de los cuales tiene una masa menor que la crítica, pero cuya masa unida supera la crítica, se producirá la explosión. Sobre este principio sencillo se basa precisamente el funcionamiento de la bomba atómica.

¿Y cómo se debe proceder si se quiere controlar la marcha de la reacción? La respuesta es bastante evidente: hay que crear un sistema en que, además de los átomos del combustible, se encuentren también otros átomos que absorben neutrones y, por decirlo así, los ponen fuera del combate. Son completamente idóneas las barras de cadmio. Este elemento absorbe fuertemente los neutrones y, al crear una estructura constituida por barras de combustible nuclear y las de cadmio, se puede, introduciendo las barras y sacándolas del cuerpo del reactor nuclear (o de la pila atómica porque a este sistema le fue dado semejante nombre), dar inicio a la reacción nuclear en cadena haciendo el factor de multiplicación neutrónico un poco mayor que la unidad y, seguidamente, después de llevar el desprendimiento del calor hasta el nivel deseado, introducir las barras de tal modo que el factor de multiplicación llegue a ser exactamente igual a la unidad.

Capítulo 6

Energía alrededor de nosotros

Contenido:

- *Fuentes de energía*
- *El combustible*
- *Centrales eléctricas*
- *Reactores nucleares*
- *Energía termonuclear*
- *Hayos solares*
- *Energía eólica*

Fuentes de energía

En fin de cuentas, toda la energía de la que podemos disponer nos llega del Sol. En las profundidades de nuestro Astro, a temperaturas del orden de millones de kelvin se desarrollan reacciones entre los núcleos atómicos. Transcurre la síntesis termonuclear no controlarla.

El hombre aprendió a realizar semejantes reacciones, que vienen acompañadas de liberación de cantidades fabulosas de energía, en condiciones terrestres. Se trata de la bomba de hidrógeno. Se llevan a cabo trabajos encaminados a crear la síntesis termonuclear controlada de la cual hablaremos más tarde.

Estas frases introductorias nos sirven ahora para justificar el hecho de que precisamente después de la conversación sobre la estructura de los núcleos es natural pasar a la charla dedicada a las fuentes de energía en la Tierra.

En las condiciones terrestres podemos obtener energía por tres vías. En primer término, podemos extraerla a costa de combustible: químico o nuclear. Con este fin es necesario provocar una reacción en cadena en cuyo curso se produce la reunificación o destrucción de moléculas o de núcleos atómicos. El combustible químico que, por ahora, tiene valor práctico incluye carbón, petróleo y gas natural. El combustible nuclear es uranio y torio (rotura de las partículas) y elementos ligeros, ante todo, hidrógeno (reunificación de las partículas).

El segundo camino es la transformación de la energía cinética en trabajo. Pueden obligarse a realizar trabajo los torrentes de agua. La energía hidráulica —el «carbón blanco»— se convierte en importantísima fuente de energía si el agua se hace precipitar de una gran altura, construyendo presas o aprovechándose de cascadas naturales, como la catarata del Niágara. Este mismo camino de transformación de la energía en trabajo hace girar las aletas de los molinos de viento. Veremos que los flujos aéreos —el «carbón azul»— merecen que se les traten con toda seriedad. Los molinos de viento renacen en un nivel técnico nuevo y harán un aporte notable a la caja energética. A esta categoría de fuentes de energía pertenece también la utilización de la energía de las mareas.

Las leyes de la termodinámica nos sugieren también la tercera solución del problema energético. De principio, siempre es posible crear un motor que utilice las diferencias de temperatura. Como sabemos, el flujo de calor, al pasar de un cuerpo caliente a otro frío, puede convertirse, parcialmente, en trabajo mecánico. Nos encontramos con las diferencias de temperatura tanto en la corteza terrestre y el Océano Mundial, como en la atmósfera. Al internarse en el seno de la Tierra, nos convenceremos de que en cualquier lugar del globo terráqueo se observa el aumento de la temperatura.

Estas tres variantes posibles se originan (lo repetimos una vez más) debido a la llegada a nuestro planeta de la radiación solar. La Tierra recibe tan sólo una parte ínfima de la energía que portan los rayos del Sol. No obstante, hasta esta parte minúscula es colosal y resulta suficiente para que los terrícolas no sólo satisfagan sus necesidades cotidianas, sino también para que realicen los más fantásticos proyectos.

Pero la energía solar puede emplearse también de una forma directa. Nos referimos a que hemos aprendido a transformar la energía de radiación en corriente eléctrica con la ayuda de células fotoeléctricas. Y la obtención de la corriente eléctrica es el camino más importante de utilización de energía para fines prácticos.

Por supuesto, en muchas ocasiones tanto la energía interna de la sustancia, como la de los movimientos de los flujos hidráulicos y aéreos puede aprovecharse directamente, soslayando la etapa de transformación en corriente eléctrica. Pero, probablemente, en todos los casos, excepto el movimiento de los aviones y cohetes,

sea racional obtener del manantial primario la energía eléctrica en las centrales eléctricas y sólo después de haberlo realizado hacer que ésta sirva a nuestros fines. La importancia de la energía eléctrica aumentará todavía más cuando sepamos confeccionar pequeños y ligeros acumuladores de gran capacidad que sustituirán los usados actualmente (pesados y de poca capacidad) en los automóviles.

Antes de pasar a la discusión concreta de los diversos manantiales de energía, otra vez atraigamos la atención del lector a dos importantes clasificaciones de dichos manantiales. En primer término, una divisoria importante pasa entre el combustible y la energía del Sol, entre el carbón blanco y el azul. En el primer caso consumimos irrevocablemente las reservas de las riquezas de la Tierra. En lo que concierne al Sol, el aire y el agua, éstos son fuentes gratuitas de energía. Gratuitas en el sentido de que la utilización de su energía no implica la disminución de cualesquiera valores terrestres. El trabajo de los aeromotores no disminuye la cantidad de aire en el globo terráqueo, el trabajo de las centrales hidroeléctricas no reduce la profundidad de los ríos, tampoco se gastan las reservas de los materiales terrestres durante el trabajo de las máquinas solares.

Existe también otro problema. Es preciso preocuparse por la protección de la flora y fauna que nos rodean: éste es el problema cuya importancia es imposible sobreestimar. La quema del combustible no sólo tiene el inconveniente de consumir los recursos de la Tierra, sino que, además, invade el suelo, el agua y el aire con una cantidad enorme de desechos nocivos. En este respecto, no es muy favorable la situación con las centrales hidroeléctricas.

El cambio del régimen hidráulico de los ríos afecta el clima y lleva a consecuencias desastrosas para una parte considerable de la población de peces en nuestro planeta.

Sin duda alguna, el método óptimo de obtención de energía es la utilización directa de la radiación solar.

Después de estas palabras generales pasemos a la discusión más detallada de las posibilidades de aprovechar la energía en las condiciones terrestres, permitiendo al lector que se forme una idea sobre las cifras que figuran en los manuales de energética.

Empecemos por la característica de la energía solar. A las fronteras de la atmósfera, por cada metro cuadrado, llega energía con potencia media de cerca de 1,4 kW (si calculamos este valor respecto al período de 1 año, obtendremos cerca de 10^{10} J de energía): tal cantidad de calor la proporcionan centenas de kilogramos de carbón. ¿Cuánto calor, entonces, recibe del Sol todo el globo terráqueo? Después de calcular la superficie de la Tierra, teniendo en cuenta, además, que los rayos solares iluminan la superficie terrestre de una forma irregular, obtendremos cerca de 10^{14} kW. Es 100 mil veces más que la energía que obtienen a partir de todas las fuentes de ésta en la Tierra todas las fábricas, las plantas industriales, las centrales eléctricas, los motores de aviones y automóviles, resumiendo, 100 mil veces más que el potencial energético consumido por la totalidad de la población del globo terráqueo (del orden de mil millones de kilovatios).

Hasta la fecha, la energía solar se emplea a escala completamente insignificante. Se razonaba del siguiente modo: es verdad que nuestro cálculo aportó una cifra gigantesca, pero esta cantidad de energía se distribuye por todos los puntos de la superficie terrestre, yendo a parar a las cuevas de montañas inaccesibles, a la superficie de los océanos que ocupan la mayor parte de nuestro globo y a las arenas de los despoblados desiertos. Además, la cantidad de energía que corresponde a una superficie limitada dista mucho de ser grande. Y dudamos que sea racional construir receptores de energía que se extiendan a kilómetros cuadrados. Finalmente, tiene sentido de dedicarse a la conversión de la energía solar en calor en aquellas localidades en que se dan muchos días de sol.

El hambre energética y los enormes éxitos en la producción de células fotoeléctricas a base de semiconductores modificaron de modo radical la psicología de los energéticos. Se confeccionó una multitud de proyectos e instalaciones experimentales con cuya ayuda los rayos solares se enfocan en miles (y, en el futuro, en millones y miles de millones) células fotoeléctricas. A los técnicos no les asustan los días nublados y la absorción de los rayos por la atmósfera. No hay duda de que a la utilización directa de la energía solar pertenece un gran futuro.

De la misma manera, exactamente, cambió nuestra actitud respecto al carbón azul. Nada más que unos veinte años atrás se decía; no cifrábamos grandes esperanzas en el viento como manantial de energía. Este manantial tiene el mismo

inconveniente que la energía solar: la cantidad de energía que corresponde a una unidad de superficie es relativamente pequeña; los álabes de una turbina eólica, si ésta se va a crear para la producción de energía a escala industrial, deberían alcanzar dimensiones prácticamente irrealizables. Otro defecto, no menos esencial, es la inconstancia de la fuerza del viento. Por esta causa, sólo vale la pena emplear la energía del viento en motores pequeños: «aerogeneradores». Cuando hace viento, éstos producen energía eléctrica para alimentar máquinas agrícolas y alumbrar viviendas. Si se forma un exceso de energía ésta se «almacena» en los acumuladores, para poder utilizarlo después en los días de calma. Claro que no se puede contar con el aeromotor: éste sólo es capaz de desempeñar un papel secundario, auxiliar.

Hoy en día, los razonamientos de los ingenieros que se dedican al problema de lucha contra el hambre energética resultan ser completamente otros. Están cercanos a la realización los proyectos de centrales eléctricas constituidas por miles de «molinos» dispuestos con regularidad, con aletas gigantes. La utilización del carbón azul también hará una aportación sustancial al libro de ingresos de energía necesaria para la humanidad.

Un manantial gratuito de energía es el agua en movimiento, o sea, la marea de los océanos que ataca continuamente la tierra firme, así como los torrentes de aguas fluviales que corren hacia los mares y océanos. En la URSS, la producción de energía eléctrica en las centrales hidroeléctricas constituyó en 1969 115,2 mil millones de kWh, y en los Estados Unidos, 253,3 mil millones de kWh, pero en la Unión Soviética los recursos hidráulicos se utilizan sólo en 10,5%, y en los Estados Unidos, en 37%.

Las cifras citadas de producción de energía eléctrica en las centrales hidroeléctricas son muy imponentes, sin embargo, en el caso de privarse nosotros de carbón, petróleo y de otras fuentes de energía pasando exclusivamente a la explotación del carbón blanco, es decir, a la energía de los ríos, tendríamos que disminuir el consumo de energía en el globo terráqueo, incluso a condición de que en todos los ríos hubieran sido construidas todas las centrales hidroeléctricas posibles desde el punto de vista técnico.

Bueno ¿y qué se puede decir con respecto a la ola de la marea? Su energía es bastante considerable, aunque resulta aproximadamente diez veces menor que la de los ríos. Lamentablemente, esta energía se utiliza por ahora tan sólo en un grado extremadamente insignificante, ya que lo dificulta el carácter pulsatorio de la marea. Sin embargo, los ingenieros soviéticos y franceses hallaron caminos prácticos para superar esta dificultad. Actualmente, una central mareomotriz asegura la entrega de una potencia garantizada en las horas de consumo máximo. En Francia se ha construido una central mareomotriz en el estuario del río Rance, y en la URSS, en Kíslaya Guba, en los alrededores de Múrmansk.



Figura 6.1.

Esta última central servirá de planta piloto para la construcción de potentes (cerca de 10 GW) centrales mareomotrices que se proyectan en las rías del mar Blanco.

El agua de los océanos, a grandes profundidades tiene una temperatura que se diferencia de la de las capas superficiales en 10—20 °C. En consecuencia, se puede construir una máquina térmica de cuyo calentador, en las latitudes medias, serviría la capa superior del agua, y de refrigerador, la capa de profundidad. El rendimiento de esta máquina será de 1 ó 2%. Pero ésta también es una fuente muy poco concentrada de energía.

Entre las fuentes gratuitas de energía se cuenta la geotérmica. No nos referiremos a los países ricos en geiseres. Estos países son pocos. Y allí donde los geiseres abundan su calor se utiliza con fines industriales. Sin embargo, no se debe olvidar que casi en cualquier punto del globo terráqueo, profundizándonos a 2 ó 3 km,

encontraremos temperaturas del orden de 150 a 200 °C. El principio de creación de una central geotérmica es evidente. Hay que perforar dos cantiles. A uno de éstos se suministrará agua fría y del otro se bombeará agua caliente (fig. 6.1).

El combustible

Todas las fuentes de energía que describimos hasta el momento poseen grandes ventajas en comparación con el combustible. El combustible se quema. La utilización de la energía del carbón de piedra, del petróleo y de la madera significa la destrucción irrevocable de las riquezas de la Tierra.

¿Cuáles son las reservas de combustible en el globo terráqueo? Al combustible ordinario, es decir, a aquel que arde al acercarle fuego, pertenecen el carbón, el petróleo y el gas subterráneo. Sus reservas en nuestro planeta son muy pequeñas. Con el nivel actual de consumo de petróleo sus reservas comprobadas se acabarán ya para el comienzo del siguiente milenio; lo mismo se refiere al gas. Las reservas de carbón de piedra son algo mayores. La cantidad de carbón en la Tierra se expresa con el número de diez billones de toneladas. Un kilogramo de carbón, durante su combustión, da varios miles de kilocalorías. (Se sobreentiende que el combustible puede ser de la más diversa calidad. La cifra mencionada es una especie de unidad de medida, como se dice, unidad de combustible convencional que se aplica al comparar las fuentes de energía de distinto origen.) De este modo, las reservas energéticas totales de carbón se miden con una cifra del orden de 10^{26} Kcal. Es aproximadamente mil veces más que el consumo anual de energía.

La reserva de combustible para mil años debe apreciarse como muy pequeño. Mil años son mucho tan sólo comparando con la duración de la vida humana, pero la vida humana no es sino un instante ínfimo en comparación con la vida del globo terráqueo y con el tiempo de existencia del mundo civilizado. Además, crece sin cesar el consumo de energía por cápita. Esta es la causa de que si las reservas de combustible se hubieran reducido a petróleo y carbón, la situación en la Tierra referida a los recursos energéticos debería considerarse catastrófica.

Pero, ¿acaso es obligatorio reducir el combustible químico a aquellas sustancias que hallarnos en la naturaleza? Claro que no. En una serie de ocasiones puede resultar

que el combustible sintético gaseoso y líquido sustituye, con ventaja, el petróleo y el gas.

En los últimos años se presta especial atención a la producción industrial de hidrógeno. Como combustible el hidrógeno manifiesta muchos méritos. Puede obtenerse en cantidades ilimitadas mediante distintas vías. Existe en todas partes, de modo que no surge el problema de transportarlo. El hidrógeno se purifica fácilmente de impurezas indeseables. En una serie de casos resultará más ventajoso utilizar directamente el calor de combustión de este elemento. Se puede omitir la etapa de transformación en energía eléctrica.

Actualmente, se estiman rentables tres procesos principales de obtención de hidrógeno: el método electrolítico, la descomposición termoquímica y, finalmente, la irradiación de compuestos hidrogenados con neutrones, rayos ultravioleta, etc. También resulta ventajosa desde el punto de vista económico la obtención de hidrógeno a partir de carbón y de petróleo en reactores nucleares. En estos casos se puede prever el transporte del hidrógeno al lugar de consumo por tuberías, como esto se realiza ahora cuando se trata del gas subterráneo.

Con esto damos por terminada nuestra breve revista de los combustibles químicos y hagamos la pregunta: ¿cómo van los asuntos con el combustible nuclear? ¿Cuáles son sus reservas en la Tierra? Es que se necesita tan pequeña cantidad de éste. Un kilogramo de combustible nuclear proporciona 2,5 millones de veces más energía que la misma cantidad de carbón.

Los cálculos aproximados demuestran que las reservas de combustible nuclear potencial (de lo que vamos a exponer posteriormente el lector se enterará de por qué empleamos este calificativo) pueden representarse por las siguientes cantidades: cerca de 2 millones de toneladas de uranio y 4 millones de toneladas de torio. Estas son las sustancias de las cuales, hoy día, sabemos extraer energía en los reactores nucleares por el método de fisión de los núcleos. ¿Es que a éstas se añadirán otras sustancias? ¿Quién sabe? Esto no puede considerarse exceptuado. El número de reacciones nucleares que dan energía es enorme. La cuestión reside únicamente en cómo conseguir que la reacción se desarrolle en cadena.

Mientras tanto conversaremos sobre aquello que sabemos hacer en el momento presente. Como se infiere del capítulo anterior, existe una sola sustancia —que se

encuentra en la naturaleza— que es combustible nuclear. Esta sustancia es el isótopo uranio-235. El uranio que se extrae de las minas contiene el 99.3 de uranio-238 y tan sólo 0,7% de uranio 235.

A primera vista puede parecer que la idea más simple es separar el isótopo que necesitamos y crear reactores compuestos de trozos o barras de esta sustancia, introduciendo en el volumen de reacción barras de control absorbedores de neutrones, para regular la reacción nuclear.

Ante todo, se debe destacar que no es ventajoso absorber neutrones privándolos de la posibilidad de participar en la reacción en cadena si estamos preocupados por la potencia de la instalación, es decir, si aspiramos a obtener de una unidad de masa del combustible nuclear la máxima cantidad posible de energía en un segundo. En cambio, es sumamente útil retardar los neutrones hasta velocidades térmicas, o sea, conseguir que los neutrones «rápidos» que se forman durante la desintegración del núcleo se tornen «lentos»; repito, esto es sumamente útil para aumentar la eficiencia de trabajo de la pila, ya que los núcleos del uranio-235 absorben los neutrones lentos con mucha mayor probabilidad.

Si hacemos caso omiso de estructuras experimentales que no lograron salir fuera de los laboratorios, podemos decir que se utilizaba como moderador (retardador) ya sea el agua pesada, o bien, agua ordinaria. El mérito del agua pesada radica en que, de un modo absoluto, no absorbe neutrones. Pero ésta retarda los neutrones mucho peor que el agua ordinaria.

De esto modo, el más sencillo camino consiste, aparentemente, en la separación del isótopo uranio-235. Ya hemos mencionado que la realización de esta separación costará un enorme caudal. El quid de la cuestión reside en que no valen los métodos químicos, pues se trata de sustancias idénticas por sus propiedades químicas.

Actualmente se considera como más rentable el método de centrifugación. Antes de proceder a esta operación es necesario obtener algún compuesto gaseoso del uranio. El único compuesto de este tipo que a temperatura ambiente se encuentra en estado gaseoso es el hexafluoruro de uranio. La diferencia entre las masas de las moléculas del gas que contienen los isótopos uranio-238 y uranio 235 es tan insignificante que la mejor centrifugadora enriquece el gas de moléculas más ligeras tan sólo en 12%. Para obtener uranio que contiene 3% del isótopo uranio- 235

(este combustible ya es cómodo utilizar en el reactor nuclear) es necesario repetir el proceso 13 veces. Está claro que la obtención del isótopo puro uranio-235 no se puede considerar como solución acertada del problema ingenieril.

Pero existen también otras razones, tal vez más importantes. Sin uranio-235 es imposible convertir la masa principal del uranio, así como el torio en combustible nuclear. Esta es la razón por la cual los llamamos combustible potencial. En lo que se refiere al propio isótopo uranio-235, este combustible postergará el momento de llegada del hambre energética nada más que en varios cientos de años. Por consiguiente, si se supone que la humanidad debe durante muchos siglos utilizar el combustible nuclear es necesario buscar otros caminos.

¡El combustible nuclear puede producirse en el reactor! Primero, podemos producir en el reactor plutonio-239 que se obtiene del uranio-238, y, segundo, uranio-233 que se obtiene del torio-232. Pero no se puede dar comienzo al asunto sin uranio-235.

Los reactores que producen energía creando simultáneamente nuevo combustible se denominan superregeneradores (reactores *breeder*). Se puede llegar a una situación en que el reactor producirá más combustible nuevo que consume, o sea, como se dice, hacer que el coeficiente (relación) de regeneración sea mayor que la unidad.

De este modo, ya estamos enterados de las vías técnicamente realizables de aprovechamiento de todas las reservas de uranio y torio. Por consiguiente, el combustible que sabemos utilizar nos bastará (valorando a escala más modesta) para muchos miles de años.

Y, no obstante... La incorporación a los combustibles del uranio y del torio no resuelve el problema de principio de liberar la humanidad del hambre energética, ya que las reservas de minerales en la corteza terrestre están limitadas.

Otra cosa es la reacción termonuclear. Si se logra llevar a cabo la síntesis controlada de núcleos ligeros y conseguir que la reacción se auto mantenga, entonces podremos decir, efectivamente, que hemos resuelto el problema energético. ¿Hasta qué punto es real la solución de esta tarea? En el período muy reciente los físicos aprendieron a obtener plasma de hidrógeno que se encuentra a una temperatura de cerca de 60 millones kelvin. La reacción termonuclear

transcurre a esta temperatura. Pero cómo hacer que esta reacción sea auto mantenida, cómo realizar un reactor termonuclear, esto todavía no lo sabemos.

En el Océano Mundial se halla almacenada tanta energía termonuclear que será suficiente para cubrir todas las demandas energéticas de la humanidad durante el período que supera la edad del Sistema Solar. Este sí que es, de veras, un manantial inagotable de energía.

La conversación sobre el combustible se da por terminada. Ahora pasemos al examen de los dispositivos con cuya ayuda el combustible se obliga a trabajar.

Centrales eléctricas

Por supuesto, se pueden citar muchos ejemplos cuando la utilización directa de energía no está relacionada con la producción de corriente eléctrica. Arde el gas en la cocina de su apartamento, se aleja de la Tierra el cohete que se mueve a costa de reacción de los productos de combustión del combustible, además, también las antiguas máquinas a vapor encuentran aplicación en una u otra parte. En una serie de casos es racional transformar en movimiento también la energía que proporcionan tales fuentes gratuitas como el viento

Pero en la absoluta mayoría de los casos necesitamos corriente eléctrica. La necesitamos para que nos dé luz, la necesitamos para alimentar motores eléctricos, crear tracción eléctrica, asegurar el funcionamiento de los hornos de soldadura eléctrica y calentadores y para cargar acumuladores. Y, en todo caso, hoy en día no podemos concebir otra forma de transmitir la energía a distancia que no sea con la ayuda de la corriente eléctrica. Por esta razón, de seguro, no será una exageración decir que la central eléctrica, como antes, sigue siendo la protagonista de la técnica. Hasta la fecha, existen dos métodos industriales básicos de poner en movimiento las partes giratorias de las máquinas eléctricas, o sea, máquinas que engendran corriente eléctrica. Si este trabajo lo cumple la energía de agua que cae, hablamos sobre centrales hidroeléctricas, si la fuerza motriz es la presión del vapor sobre los álabes de una turbina, hablamos sobre centrales térmicas.

De la clase de centrales térmicas se destacan especialmente las atómicas, aunque, en esencia, éstas se distinguen de las ordinarias sólo por el hecho de funcionar a

base de otro combustible. Sin embargo, en ambos casos obtenemos color que sirve para obtener el vapor.

Hoy día, el habitante de una ciudad se encuentra muy a menudo con la denominación «central termoeléctrica» o «central eléctrica de calefacción». Estas se destinan para abastecer a los consumidores no sólo de energía eléctrica, sino también, y, además, en primer término, de energía térmica en forma de vapor de agua o agua caliente.

La energía de agua que cae se emplea por el hombre desde los tiempos inmemoriales. La rueda hidráulica del antiguo molino es el prototipo de la turbina hidráulica moderna. Al chocar contra la paleta de la rueda, el chorro de agua le entrega una parte de su energía cinética. La paleta se pone en movimiento y la rueda comienza a girar.

No es nada simple disponer las paletas de la rueda de modo que se obtenga el máximo rendimiento. Los especialistas resuelven este problema ingenieril de diferente manera, según sean las condiciones de caída del agua. Se sobreentiende que la turbina trabajará tanto mejor cuanto mayor sea la altura (y estas alturas llegan a 300 m) desde la cual se precipita sobre la turbina el potente flujo de agua. Las turbinas hidráulicas fabricadas en correspondencia con el alto nivel del moderno arte de ingeniería se diseñan para las potencias superiores a 500 MW. Por cuanto estas potencias se crean para el número de revoluciones relativamente bajo (del orden de 100 r.p.m.), las turbinas hidráulicas que se construyen actualmente sorprenden por su tamaño y peso.

Por la dirección del flujo en la rueda de trabajo las turbinas hidráulicas se dividen en las de flujo axial y radial-axiales (turbinas de Francis). En la Unión Soviética trabajan con éxito turbinas hidráulicas de Francis de 508 MW de potencia con el diámetro del rodete de 7,5 m.

Actualmente, las centrales eléctricas producen la más barata energía eléctrica, pero su construcción cuesta varias veces más que la de las centrales térmicas y se prolonga más. En las centrales eléctricas están instalados generadores hidroeléctricos que se ponen en rotación por medio de turbina hidráulica. Los generadores (alternadores) hidroeléctricos son máquinas sincrónicas muy grandes y, las más de las veces, con árbol vertical. El diámetro del rotor de esta máquina

supera de 7 a 10 veces su longitud y en las máquinas más grandes llega a ser mayor de 15 m. Esto es necesario para que la máquina pueda funcionar de una manera estable al cambiar la velocidad de la turbina hidráulica que pone en rotación a aquélla. El rotor del generador hidroeléctrico tiene gran número de polos salientes. Por ejemplo, los generadores de la central hidroeléctrica del Dniéper poseen 72 polos. Para la alimentación del devanado de los polos por corriente continua se utiliza un generador de corriente continua, especial llamado excitador. La frecuencia de rotación de los generadores hidroeléctricos no es grande, siendo de 80 a 250 r.p.m.

EL generador de la central hidroeléctrica de Krasnoyarsk (de 500 MW de potencia) tiene la frecuencia de rotación de 93,8 r.p.m., el diámetro de su rotor es de 16 m, y la masa, de 1640 t. Para la central hidroeléctrica Sayano-Shúshenskaya se diseña un generador para 850 MW.

Como ya he mencionado, el empleo de la energía hidráulica cuesta caro al medio ambiente. No obstante, las ventajas de las centrales eléctricas en comparación con las térmicas son incuestionables. En primer lugar, las centrales hidroeléctricas no consumen combustible cuyas reservas son insignificantes. Además, las centrales térmicas tienen otro defecto grande. Durante la conversión de la energía del combustible en eléctrica, una parte considerable de energía se escapa sin ningún provecho.

A pesar de todo, algo como el 80% de energía eléctrica se produce en las centrales térmicas con la ayuda de turbogeneradores en los cuales la fuerza es la presión del vapor.

Para que el rendimiento del generador sea grande, es necesario elevar en un grado máximo posible la temperatura del vapor. Se entiende que este objetivo se puede alcanzar tan sólo aumentando simultáneamente la presión.

En las centrales térmicas modernas con una potencia de 200 a 300 MW a las turbinas se suministra vapor cuya temperatura es de 565 °C y la presión es de 24 MPa.

¿Pero por qué hay que aspirar a altas temperaturas? El asunto consiste en lo siguiente. Una turbina de vapor utiliza, en fin de cuentas, el mismo fenómeno que hace saltar la tapa no apretada de la tetera cuando en ésta comienza a hervir el

agua. En otras palabras, en una turbina de vapor tiene lugar la transformación de la energía térmica en energía mecánica y, sólo después, la energía mecánica se transforma en eléctrica. Y téngase presente que en la primera transformación (lo que se puede demostrar estrictamente) se pierde una cantidad de energía no menor que la parte igual a la relación de la temperatura ambiente a la temperatura del vapor (en kelvin).

Es muy lamentable que en los dispositivos modernos para la extracción de energía sea preciso pasar a través de la «etapa térmica». Semejante transición siempre está ligada a una pérdida enorme de energía, y una central eléctrica ideal del futuro será una planta donde cualquier energía, independientemente de su origen, se transformará de modo directo en energía eléctrica. Ahora bien, mientras este importantísimo problema no está resuelto, lo único que nos queda es afanarse por obtener las máximas temperaturas del vapor, del gas o del plasma.

En las centrales térmicas, aunque esto resulta muy complicado, se logra conseguir un rendimiento de 40%, aproximadamente. El generador de turbina de vapor no es sino una máquina eléctrica con árbol horizontal. El rotor se fabrica junto con los extremos del árbol en forma de una sola pieza forjada, empleando un acero especial para turbinas y rotores, ya que debido a la gran frecuencia de rotación (3000 r.p.m.) las tensiones mecánicas en éste alcanzan valores en el límite de lo admisible para los materiales modernos. Por la misma razón el rotor no tiene polos salientes. En una parte de su superficie cilíndrica se dan ranuras en que se coloca el devanado de excitación. En las ranuras del estator está puesto el devanado trifásico de corriente alterna.

Debido a grandes tensiones mecánicas el diámetro del rotor está limitado, por lo tanto, para obtener suficiente potencia, es necesario aumentar la longitud de la máquina.

Los primeros turbogeneradores soviéticos de 500 kW de potencia fueron construidos en Leningrado, en la fábrica «Elektrosila», en 1925. Y en 1964, «Elektrosila» fabricó un turbogenerador que por su potencia superaba mil veces al «primogénito», o sea, era de 500 000 kW.

El deseo de obtener de una máquina una gran potencia, sin aumentar sus dimensiones, enormes ya de por sí, condujo a complicación muy considerable. Por

ejemplo, con el fin de disminuir las pérdidas en el devanado del estator, este devanado se hace de conductores huecos de cobre por cuyo interior se deja pasar agua. El devanado de excitación se enfría con hidrógeno bajo la presión de cerca de 4 atm. La aplicación del hidrógeno cuya densidad es 14 veces menor que la del aire permitió aumentar la potencia de los turbogeneradores de 15 a 20%.

En el Plan de desarrollo de la economía nacional para 1981—1985, ante la industria electrotécnica se plantea el problema de dominar la producción de los turbogeneradores de 1 a 1,5 millones de kW para las centrales eléctricas térmicas y atómicas.

Se ha creado en la URSS una de las más interesantes centrales eléctricas del mundo. Su nombre es Y-25 y suministra a la red eléctrica cerca de 7000 kW de energía eléctrica, es la instalación mayor en el mundo para generar la energía eléctrica por los métodos de magnetohidrodinámica; en forma abreviada estas instalaciones se denominan instalaciones MHD. Un generador MHD no posee piezas giratorias.

La idea que sirve de base de este interesante generador es extremadamente sencilla. Un flujo de iones poseedores de considerable energía cinética (un chorro de plasma) pasa a través del campo magnético cortando las líneas de inducción magnética. Sobre los iones actúa la fuerza de Lorentz. Como sabemos, la intensidad del campo eléctrico inducido es proporcional a la velocidad del flujo iónico y al valor de la inducción magnética. La f.e.m. está dirigida perpendicularmente al movimiento de los iones. Precisamente en esta dirección aparece la corriente eléctrica que se cierra a través de la carga externa. Los electrodos que reciben la corriente se encuentran en contacto directo con el plasma.

La energía eléctrica se genera a costa de la caída de la energía del chorro de plasma. El generador magneto-hidrodinámico permite llevar el rendimiento de la central eléctrica hasta 60% y más.

El factor crítico durante la obtención de la energía barata desde una instalación MHD es el campo magnético en el canal. Dicho campo debe ser muy intenso. Semejante campo lo puede crear un imán eléctrico ordinario dotado de bobina de cobre, pero será muy grande, complicado por su estructura y costoso; además, el propio imán consumirá mucha energía eléctrica. En relación con ello se elaboró una nueva

concepción referente al diseño de los imanes con devanado superconductor. Un imán de este tipo puede engendrar el campo magnético necesario con un pequeño consumo de energía y un calentamiento insignificante. Como lo demuestran los cálculos, los grandes gastos para obtener temperaturas próximas a cero absoluto se compensan.

El examen somero que hemos hecho en las páginas anteriores nos permite ver que no se han agotado todavía los métodos tradicionales de aumento de la producción de la energía. Sin embargo, es poco probable que a base de ello saquemos la conclusión de que la humanidad seguirá durante un largo período por este camino.

Sin hablar ya de que las reservas de combustible y las posibilidades de utilizar la energía hidráulica se aproximan a su fin, no se puede olvidar del considerable influjo que la construcción de nuevas centrales hidroeléctricas ejerce sobre el medio ambiente. Los ecólogos nos previenen sobre la necesidad de tomar una actitud muy mesurada cuando se trata de la intromisión en la vida de los ríos. También atraen la atención de los energéticos a las enormes cantidades de ceniza que se arrojan a la atmósfera al quemar el combustible. En un año, la atmósfera terrestre recibe 150 millones de toneladas de ceniza y cerca de 100 millones de toneladas de azufre. Es sobre todo alarmante el aumento en la atmósfera de la cantidad de dióxido de carbono. Su incremento anual es de 20 mil millones de toneladas. En los últimos cien años el contenido de dióxido de carbono en la atmósfera creció en 14%.

Existen dos causas de este crecimiento: la destrucción de la flora terrestre y, que es lo principal, la expulsión a la atmósfera de las «cenizas gaseosas» que se forman durante la combustión del combustible ordinario. Este incremento ininterrumpido puede acarrear consecuencias funestas, la más importante entre las cuales es el aumento de la temperatura de la atmósfera en 1,5 a 3 kelvin. Aparentemente, ¡es un aumento pequeño! Sin embargo, éste puede provocar el derretimiento irreversible de los hielos que se hallan en los polos. Los climatólogos suponen que el límite admisible del ulterior crecimiento de la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera no debe superar varias decenas de por ciento.

Reactores nucleares

Como ya hemos dicho, las centrales atómicas pertenecen a la clase de centrales térmicas. La diferencia reside en el procedimiento de generación del vapor de agua que se dirige a los álabes de la turbina. El término «reactor nuclear» con plena razón puede sustituirse por el de «caldera nuclear», subrayando con ello el parentesco de los procedimientos de obtención de la energía.

Al reactor nuclear se le da, habitualmente, la forma de un edificio cilíndrico. Sus paredes deben ser muy gruesas y fabricadas de materiales absorbentes de neutrones y de radiación gamma. Un reactor que produce algo como 1000 MW de energía eléctrica puede tener diferentes dimensiones según sea el combustible que se utiliza y de los procedimientos empleados para retardar los neutrones y derivar el calor. Pero, en todos los casos, estas dimensiones son imponentes. La altura puede alcanzar la de una casa de 5 a 10 pisos y el diámetro será del orden de diez metros. La energética nuclear comenzó a desarrollarse inmediatamente después de haber terminado la segunda guerra mundial. En la Unión Soviética las importantísimas investigaciones en este campo las encabezó Igor Vasílievich Kurchótov, admirable científico y organizador.

Tanto en la Unión Soviética, como en otros países se han probado las más diversas construcciones. En primer lugar, se resuelve el problema sobre la composición isotópica del uranio utilizado o del otro combustible nuclear. Seguidamente, el ingeniero debe decidir en qué forma quiere utilizar el combustible: en forma de disolución de sales de uranio o en forma de fragmentos sólidos. Al elemento combustible sólido pueden darse diversas formas. Se puede trabajar con barras, pero son más adecuadas las varillas largas. Desempeña un papel sustancial la geometría de disposición de los elementos de combustión. Los cálculos ingenieriles ayudarán a hallar la disposición más racional de las barras de control que absorben neutrones. Su desplazamiento (automático, claro está) debe asegurar el valor necesario del factor de multiplicación neutrónica.

La diferencia en el comportamiento de los neutrones lentos (térmicos) y rápidos permite dividir los tipos de los reactores en dos categorías, a saber, en reactores con moderador de los neutrones y reactores superregeneradores (reactores *breeder*). El reactor en que se prevé la retardación de los neutrones puede trabajar a base de uranio natural. La cantidad de moderador debe ser tal que a los núcleos del uranio-

^{238}U no se les ofrezca la posibilidad de absorber un número considerable de neutrones.

Y es que la cantidad de estos núcleos supera 140 veces, aproximadamente, la de los del uranio-235. Si la cantidad de moderador es pequeña, los neutrones no tendrán tiempo para disminuir su velocidad hasta la térmica, se absorberán por los núcleos del uranio-238, y la reacción en cadena no podrá continuarse.

No obstante, el reactor que trabaja a base del uranio natural o del uranio enriquecido en un grado insignificante por el uranio-235 creará un nuevo combustible: el plutonio. Pero éste se formará en una cantidad mucho menor que los núcleos que se «queman».

Por ahora, en las centrales atómicas se utilizan reactores de neutrones térmicos. Con mayor frecuencia se aplican cuatro tipos de reactores: de agua-agua, con agua ordinaria en calidad de moderador y portador de calor; de grafito-agua, con agua como portador de calor y moderador de grafito; reactores en que sirve de moderador agua pesada y de portador de calor, agua ordinaria, y, finalmente, reactores de grafito-gas.



Igor Vasílievich Kurchótov (1903-1960) destacado físico soviético y magnífico organizador que encabezó los trabajos para la elaboración del problema atómico en la Unión Soviética. Comenzó su actividad científica en el campo de la física del sólido, asentó las bases de la teoría sobre los ferroeléctricos. A principios de los años 30 se dedicó a las investigaciones en el ámbito de la física del núcleo atómico. Bajo su dirección se llevaron a cabo importantes trabajos en la esfera de estudios de la isomería nuclear, la absorción de resonancia de los neutrones y la radiactividad artificial.

La causa de que los especialistas en el campo de la energética atómica centraron su atención en los reactores que trabajan a base de neutrones térmicos radica, por lo visto, en que el enriquecimiento del uranio con el isótopo 235 es una tarea difícil. Pero conviene recordar la observación hecha con anterioridad: al aprovechar como combustible tan sólo el isótopo uranio-235 nos privamos a nosotros de la posibilidad de emplear las enormes reservas de combustible nuclear potencial.

Actualmente se perfila la tendencia a pasar hacia los reactores nucleares de otro tipo que trabajan a base de combustible altamente enriquecido y no utilizan el moderador de neutrones.

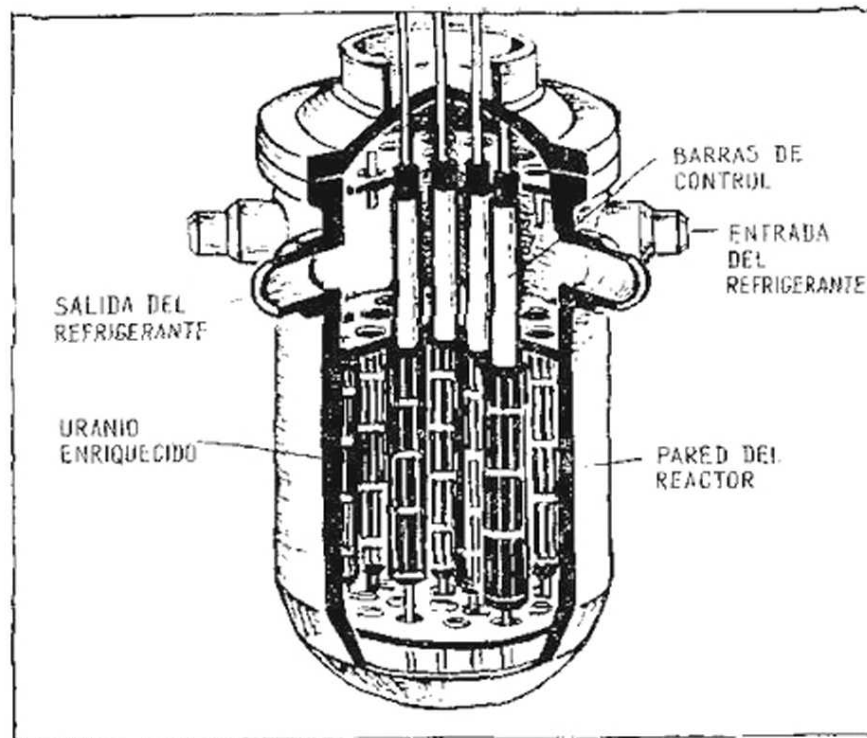


Figura 6.2

Supongamos que en la «caldera» se encuentra una mezcla en la cual a una parte de uranio-235 corresponde una parte de uranio-238. En este caso, el número de neutrones que quedan al margen de la reacción en cadena debido a su captura por el uranio-238 puede ser mayor que el número de neutrones que desintegran los núcleos del uranio-235 y continúan la reacción en cadena. Semejante reactor será, precisamente, reactor superregenerador (reactor *breeder*). Según sea la geometría de disposición de las barras o de los «ladrillos» del combustible nuclear activo y potencial, se puede crear el reactor *breeder* con una relación porcentual más variable de estas dos clases de combustible y con distinto coeficiente de regeneración. Para que el lector se forme la idea acerca de los parámetros de los reactores nucleares insertemos dos ejemplos.

La fig. 6.2 nos da una idea general sobre la estructura del reactor nuclear que hoy día se utiliza en los submarinos norteamericanos. De refrigerador sirve agua ordinaria. Por cuanto esta agua capta los neutrones con una eficacia aproximadamente 600 veces mayor que el agua pesada, semejante reactor puede

trabajar solamente a base de uranio-238 enriquecido con uranio-235. En lugar de la parte natural de 0,72%, el combustible de estos reactores contiene desde 1 hasta 4 % de uranio-235. El reactor capaz de proporcionar 1100 MW de energía eléctrica, tiene el diámetro de cerca de 5 m, la altura de 15 m y el espesor de las paredes de 30 cm (¡una casa de 5 pisos!). Si en este reactor se cargan 80 t de óxido de uranio que contiene 3,2 % de uranio-235, dicho reactor trabajará de 10 a 12 meses (después de lo cual habrá que cambiar las barras). El agua en el reactor se calienta hasta 320 °C. Esta circula bajo presión de cerca de 300 atm. El agua caliente se transforma en vapor y se suministra a los alabes de la turbina.

Detengámonos ahora, en breve, en el proyecto francés de un potente reactor breeder, el cual recibió el nombre de «Superfénix».

Se propone utilizar como combustible una mezcla de plutonio-239 y de uranio-238. No se empleará moderador, de modo que los neutrones no pierden la velocidad desde el momento de su nacimiento durante la fisión del núcleo hasta el encuentro con otro núcleo atómico del material combustible.

El hecho de que el reactor trabaje a base de neutrones rápidos lleva a una mayor compactidad. El núcleo del reactor no excede de 10 m³. De este modo puede liberarse gran cantidad de calor por unidad de volumen.

La evacuación del calor no puede llevarse a cabo con agua puesto que ésta retarda los neutrones. Para este objetivo puede utilizarse sodio líquido. El sodio funde a la temperatura de 98 °C y hierve a 882 °C a presión atmosférica. Por causas técnicas, la temperatura del sodio líquido no debe superar 550 °C. Debido a esta razón no hay necesidad de elevar la presión del líquido refrigerante, procedimiento en el cual se recurre en los casos cuando el refrigerador sirve el agua.

Las dimensiones del «Superfénix» son las siguientes: el diámetro interior, 64 m; la altura, 80 m. ¡Un imponente edificio de 20 pisos! El núcleo del reactor es un prisma hexagonal montado (como un paquete de lápices) de barras delgadas de 5,4 m de longitud. Las barras de material combustible se alternan con las barras de control.

Nos falta espacio (y, además, en un libro de física no es indispensable) para describir de qué modo está organizada la refrigeración del núcleo del reactor. Es suficiente decir que este se lleva a cabo en tres etapas. La primera tubería es sódica, ésta toma el calor del reactor y lo entrega a la caldera de donde el calor se

transmite a la segunda tubería, también sódica, y, luego, a la tercera, por la cual circula la mezcla de agua y vapor. Seguidamente, tenemos un camino ordinario hacia la turbina de vapor.

Los cálculos demuestran que la instalación debe proporcionar 3000 MW de potencia térmica y 1240 MW de eléctrica.

No puedo dejar de recalcar una vez más que la necesidad de transformar la energía nuclear en eléctrica pasando por la etapa térmica depara un sentimiento de gran insatisfacción. Es algo como si instalásemos un motor de automóvil con los accionamientos correspondientes en un carro común y corriente. Sin embargo, por ahora no tenemos idea alguna de cómo podemos prescindir de esta etapa que, tal vez, crea las principales dificultades en la construcción de las centrales atómicas. Al inconveniente general de todas las centrales térmicas se añade aquí la necesidad de introducir tuberías intermedias debido a que es preciso excluir la radiactividad inadmisibles del vapor que llega a la turbina.

Citemos algunos datos más sobre este proyecto. El flujo máximo de neutrones por 1 cm^2 en un segundo debe ser igual a $6,2 \times 10^{15}$. El factor de multiplicación será igual a 1,24. La sustitución de los elementos quemados por los nuevos debe realizarse una vez por año. La rapidez del flujo de sodio líquido (los especialistas le dan el nombre de velocidad de la masa) será de 16,4 t/s (esta cifra se refiere a la tubería primaria). El vapor sobrecalentado que sale se expulsará bajo la presión de 18 MPa y a la temperatura de 490 °C.

Dediquemos varias palabras a las «cenizas» del combustible nuclear. Como resultado de la fisión de los núcleos del combustible se origina un gran número de isótopos radiactivos, y este proceso es incontrolable; sin embargo, tenemos la posibilidad de obtener cualesquiera isótopos colocando en el reactor ciertas sustancias. Absorbiendo neutrones éstas engendrarán nuevos átomos.

Por supuesto, los isótopos radiactivos pueden producirse también en los aceleradores, sometiendo los materiales al bombardeo con protones o con núcleos de otros elementos.

El número de elementos artificiales obtenidos para el momento presente es bastante alto. Se llenaron los «sitios vacantes» en la tabla de Mendeleiev: los elementos con los números atómicos 61, 85 y 87 no tienen isótopos estables de

vida larga y a raíz de ello no se encuentran en la naturaleza. También se logró prolongar la tabla de Mendeleiev hasta el número 105. Los elementos con los números más altos que 92 se denominan transuránicos. Cada elemento transuránico se obtuvo en más de una variante isotópica. Además de nuevos elementos químicos se produjo una gran cantidad de isótopos radiactivos de los elementos químicos que en su forma estable se hallan en la corteza terrestre.

Una serie de aplicaciones de los isótopos radiactivos se conoce ya durante muchos años. La esterilización de los productos con rayos gamma, la defectoscopía, creación de generadores de energía eléctrica que utilizan los electrones producidos durante la fisión... La lista podría prolongarse.

Desafortunadamente, el provecho aportado por los isótopos radiactivos es conmensurable con las preocupaciones que deparan a los ingenieros, debido a la necesidad de proteger a las personas contra sus radiaciones radiactivas.

La ceniza del combustible nuclear contiene 450 variedades de átomos, entre éstas figuran uranio-237 y neptunio-239 que se transforman en neptunio-237 y plutonio-239.

A diferencia del carbón o el petróleo el combustible nuclear no se quema hasta el fin. En una serie de casos, los reactores nucleares trabajan a base de combustible enriquecido, con el contenido de uranio-235 entre 2,5 y 3,5%. En cierto instante el reactor cesa la producción de energía, ya que en el proceso de desintegración se forma una gran cantidad de isótopos que capturan los neutrones impidiendo que se continúe la reacción de desintegración. Al parar el reactor en el combustible nuclear se queda, aproximadamente, 1% de uranio-235 y una cantidad algo menor de plutonio-239.

Huelga decir que es en sumo grado inconveniente desechar esta ceniza que contiene una cantidad tan considerable de combustible valioso. Por esta causa, se puede «fundir» con la central atómica una gran planta química. Dicha empresa debe ser totalmente automatizada por cuanto es necesario someter al tratamiento, materiales de radiactividad muy elevada. La necesidad de medidas serias se impone por el requerimiento de proteger al personal contra la radiación gamma.

En estas plantas los elementos combustibles sometidos al tratamiento deben ser triturados y disueltos. El combustible puro se debe separar (uranio y plutonio) y retornar para la preparación de nuevos elementos combustibles.

Quedan cantidades considerables de disolución fuertemente radiactiva inútil; ésta debe enterrarse en algún lugar. Además, debe existir una seguridad absoluta de que durante muchos siglos con los lugares de entierro no sucederá ningún acontecimiento dramático.

Las opiniones de los especialistas en este sentido son más o menos optimistas. Consideran que la conservación de los recipientes con disolución radiactiva a unas profundidades del orden de 1 km en localidades elegidas especialmente con esta finalidad garantiza una seguridad del cien por cien. ¿Y qué lugares son idóneos? Lo deben decidir los geólogos. Se sobreentiende que se trata de regiones en las cuales se excluye la posibilidad de terremotos. Además, debe garantizarse la ausencia de torrentes subterráneos de agua. Estos requisitos los satisfacen los lugares de yacimientos salinos. No se puede arrojar simplemente los recipientes al pozo de un kilómetro de profundidad. Para asegurar la disipación del calor desprendido por cada recipiente es necesario disponerlos a una distancia no menor de 10 metros uno del otro.

Energía termonuclear

Como ya se ha dicho, las reacciones químicas y nucleares se parecen mucho entre sí. Por cuanto el calor se desprende no sólo en las reacciones de descomposición, sino también, con frecuencia, cuando dos moléculas se combinan en una, se puede esperar que los núcleos atómicos se comporten de una forma similar.

Si se conocen las masas de los núcleos atómicos no es nada difícil contestar a la pregunta de qué reacciones de fusión de los núcleos pueden ser ventajosas desde el punto de vista energético.

El núcleo del deuterio tiene una masa $m_D = 2,0146$ u.m.a. Si dos núcleos se fusionan en uno se forma ^4He . Pero su masa es de $m_{\text{He}} = 4,0038$, y no de $4,0292$. El exceso de masa de $0,0254$ u.m.a. es equivalente a una energía igual, aproximadamente, a 25 MeV, o bien, 4×10^{-11} J. Un gramo de deuterio contiene $0,3 \times 10^{24}$ átomos. De este modo, en el caso de realizarse semejante reacción, 2 g producirían 10^{13} julios de

energía...! Resulta que las más prometedoras son las reacciones de fusión de isótopos pesados de hidrógeno; del deuterio y del tritio. Sin embargo, también el hidrógeno ordinario puede servir de combustible termonuclear.

Los términos que utilizamos revisten carácter plenamente convencional. En todos los casos se trata de energía nuclear. Pero resultó que la energía de fisión de los núcleos atómicos comenzó a llamar energía atómica, y la energía de fusión, energía termonuclear. Poca lógica encierran estos términos. Pero a éstos se han acostumbrado.

Las reacciones termonucleares podrían proveer de energía a los habitantes de la Tierra para millones de años, con la particularidad de que, en este caso, no bajaría notoriamente el nivel de agua en el Océano Mundial. Por consiguiente, la energía termonuclear podría considerarse gratuita.

Pero una idea y la realización de esta idea están separadas por una distancia enorme. Es que todos los núcleos atómicos están cargados positivamente. Y queda claro que, para llevarlos a una distancia próxima entre éstos, se necesita colosal energía.

¿De dónde tomarla? La única posibilidad es hacer pasar la sustancia al estado de plasma, es decir, «desnudar» los núcleos atómicos para, luego, elevar la temperatura del plasma hasta tal grado que los núcleos comiencen a chocar (es decir, que se acerquen a una distancia de 10^{-13} cm), despreciando la repulsión eléctrica.

Los resultados del cálculo son extremadamente desconsoladores. Ofrezco a los lectores la posibilidad de calcular ellos mismos el valor de la energía de la repulsión electrostática por la fórmula e^2/r , y, luego, determinar (con esto fin, hace falta recordar la fórmula que relaciona la temperatura con la energía cinética de cualquier partícula) qué temperaturas se deben alcanzar. Resultará que las de decenas de millones de kelvin.

Bueno, es preciso crear el plasma de altas temperaturas. Existen dos caminos: uno, por el cual los destacamentos de físicos marchan ya más de dos decenios, y otro que es unos quince años más joven.

El primer camino de creación del reactor termonuclear consiste en hacer «entrar» el plasma en una «botella magnética».

Si a un tubo de descarga de gases se superpone al campo magnético que coincide por su dirección con el campo eléctrico, en este tubo se formará un cordón de plasma. Como sabemos, las partículas cargadas del plasma describirán trayectorias espirales. Se puede considerar que el movimiento de las partículas confluye en un flujo superficial circular. Cuanto más intenso es el campo magnético tanto menor es el radio del cordón del plasma. La fuerza que actúa sobre el flujo de partículas cargadas por parte del campo magnético es, precisamente, la causa de formación del cordón que no entra en contacto con las paredes del tubo de descarga de gases. De este modo, de principio, es posible crear el plasma que queda «suspendido en el aire».

El cálculo demuestra que para la presión inicial del hidrógeno del orden de 0,1 mm de Hg, el radio del cordón de 10 cm y la intensidad de la corriente de descarga igual a 500 000 A, la temperatura del plasma debe ser suficiente para que comience la síntesis termonuclear.

En el camino de la realización de la reacción termonuclear controlable se encuentran dificultades muy grandes. Se trata de que el cordón de plasma, debido a una serie de causas, resulta ser muy inestable y al cabo de unos instantes se ensancha. El problema se resuelve solamente en el caso de poder crear una «botella magnética» con «retroacción»: se requiere que las fluctuaciones casuales que ensanchan el cordón conduzcan a la aparición de fuerzas orientadas a contrarrestar el ensanchamiento.

A mediados de 1978 un grupo de físicos norteamericanos que trabajaban en la Universidad de Princeton logró calentar el plasma hasta 60 millones de kelvin. Este éxito fue alcanzado en «botellas magnéticas» cuya estructura había sido elaborada en la Unión Soviética (hemos hablado sobre éstas en el libro 3) y que recibieron el nombre de «Tokamak» (el nombre proviene de la combinación de tres palabras: toroide, cámara, magnético). La temperatura alcanzada es suficiente para que tenga lugar la fusión de los núcleos del deuterio y tritio.

Es un gran logro. Sin embargo, no se ha hecho aún el segundo paso. No se consigue retener el plasma caliente durante un tiempo lo suficientemente prolongado. Las vías de la realización de esta tarea técnica todavía no son evidentes. La creación de la síntesis termonuclear controlable puede resultar un

problema extraordinariamente costoso. Sea como fuere, prosiguen las investigaciones en este ámbito.

Se llevan a cabo trabajos encaminados a crear la síntesis termonuclear controlada valiéndose de la radiación de láser. En la actualidad, se han creado láseres con la potencia de radiación de cerca de 10^{12} W, la cual, en forma de impulsos luminosos de 10^{-9} a 10^{-10} s de duración, puede enviarse a la sustancia que queremos convertir en plasma. Es natural que cuando la luz de esta potencia colosal incide sobre el cuerpo sólido, la sustancia se ioniza instantáneamente y pasa al estado de plasma. Hay que conseguir una situación en que se forme el plasma de deuterio- tritio con una temperatura de 10^8 K, y que esta temperatura se mantenga hasta el momento en que comience la reacción en cadena. Para realizar esta tarea es necesario crear el plasma de una densidad máximamente posible con el fin de aumentar el número de colisiones de los núcleos.

En estas consideraciones se basa el esquema del reactor representado en la fig. 6.3. Una bolita sólida (congelada) compuesta de isótopos de hidrógeno está cayendo en un recipiente bombeado hasta croar alto vacío. Cuando la bolita pasa a través del centro del recipiente se conectan láseres fuertes que transforman el sólido en plasma.

Para que el reactor comience a trabajar hace falta conseguir una situación tal que durante un intervalo de tiempo entre el inicio y el fin de la reacción se libera la energía necesaria para que la reacción se desarrolle.

Los cálculos evidencian que la densidad del plasma debe superar la del sólido de 10^3 a 10^4 veces, o sea, en 1 cm^3 deben caber algo como 10^{26} partículas. El láser es capaz de crear semejante compresión.

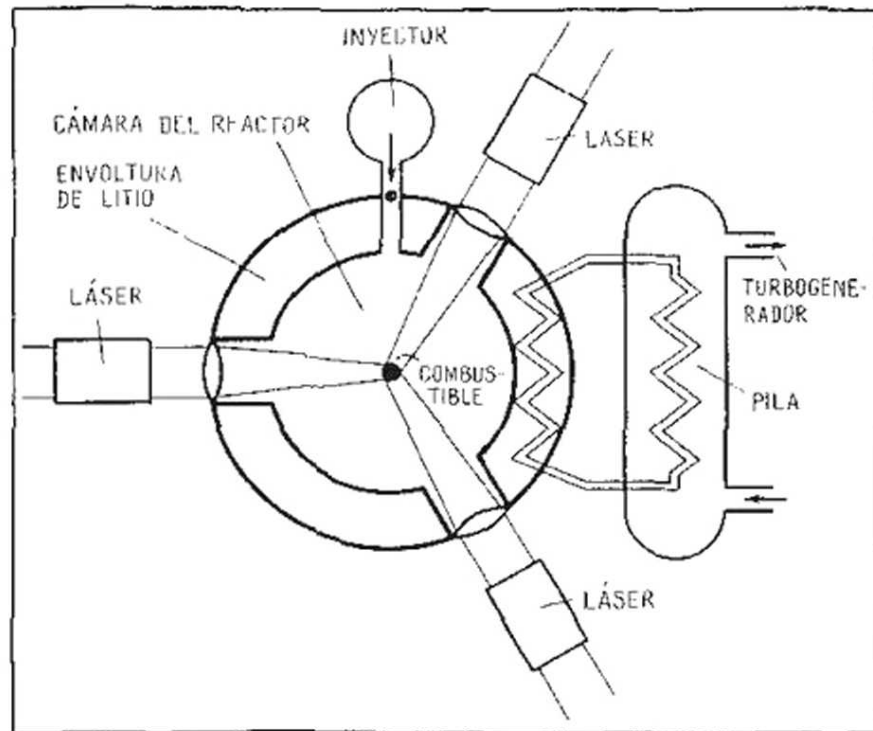


Figura 6.3.

De principio, es posible obtener la temperatura necesaria y la densidad necesaria. ¿Cómo se desarrollarán los acontecimientos a continuación? La energía de fusión de los núcleos se transmite a los neutrones que se liberan durante la reacción. Estos neutrones inciden sobre la envoltura de litio del recipiente. El litio, por medio de un intercambiador de calor, transmite la energía al turbogenerador. Una parte de los neutrones reacciona con el litio dando lugar a la formación de tritio que es necesario como material combustible.

El principio es sencillo. Pero su realización está lejana y, además, es completamente posible encontrarse con nuevos fenómenos inesperados. Por ahora, es muy difícil presagiar qué requisitos deben plantearse ante esta instalación para que se convierta en manantial de energía. Los investigadores están seguros de que en el camino de creación de una potencia tan grande dentro de volúmenes pequeños de la sustancia se descubrirán nuevos fenómenos.

Rayos solares

Ya hace mucho se conoce la transformación de la energía solar en eléctrica por medio de las células fotoeléctricas. No obstante, hasta los últimos tiempos nadie consideraba la posibilidad de poner este fenómeno como base para la acción de una central eléctrica. A primera vista, semejante proposición puede parecer una fantasía descabellada. Para crear una central eléctrica de 1000 MW de potencia conviene emplazar las células solares, así se denominan las células fotoeléctricas adaptadas especialmente para transformar la energía solar en eléctrica, en un área de $6 \times 6 \text{ km}^2$. ¡Y esto se refiere al territorio tan soleado como el desierto del Sahara! Y, digamos, en Europa central donde los días de sol no abundan tanto, el área debe ser duplicada, como mínimo. ¡Es pura fantasía, exclamará el lector, sin hablar ya de cuánto costará semejante empresa!

Es una objeción justa. Sin embargo, coloquen en el segundo platillo de la balanza las ventajas de este procedimiento de obtención de energía. No consumimos materia terrestre alguna ni contaminamos el medio ambiente con ningún género de desechos. ¿Acaso estos dos argumentos no son lo suficientemente sólidos como para obligar a ocuparse de forma seria con investigaciones encaminadas a crear células solares baratas, en la medida de lo posible, así como a elaborar métodos de emplazamiento óptimo de las células y de concentración de rayos del Sol? Muchos investigadores no sólo están convencidos de que el problema merece una seria atención, sino también esperan que las centrales eléctricas del futuro funcionen basándose, precisamente, en este principio. Esta opinión la sostiene también el autor del presente libro. No está excluido que este problema —y no otro cualquiera— se presentará dentro de varios años como problema número uno.

¿No es prematuro semejante optimismo? ¿Cómo van los asuntos en el día de hoy? Ante todo es necesario dar a conocer qué células solares puede ofrecer la industria ya en el momento presente.

La fig. 6.4 nos hace recordar el principio de transformación de la energía solar en corriente eléctrica. La célula está constituida por una unión p — n semiconductor encerrada entre electrodos metálicos. La luz solar crea electrones libres y huecos que por medio de la tensión de contacto se envían en direcciones opuestas y proporcionan corriente.

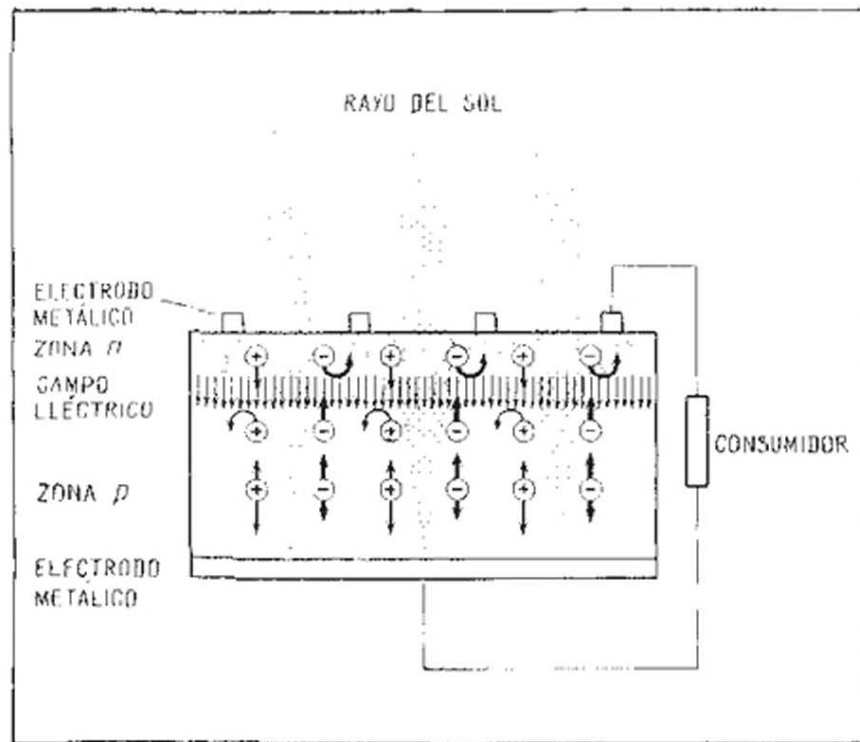


Figura 6.4

Están elaborados tres tipos de dichas células. Primero, de contacto homogéneo, en las cuales el «bizcocho» p — n se produce aleando el silicio. Por medio de proceso de difusión se crea una capa n delgada (de $0,3\ \mu\text{m}$) y una capa p relativamente gruesa (de $300\ \mu\text{m}$). Segundo, de contacto heterogéneo, constituidas por dos semiconductores distintos. Sobre un soporte metálico se polvoriza una capa n de sulfuro de cadmio de 20 a $30\ \mu\text{m}$ de espesor y sobre su superficie, recurriendo a procedimientos químicos, se crea una capa p de sulfuro de cobre de $0,5\ \mu\text{m}$ de espesor. El tercer tipo de células utiliza la tensión de contacto entre el arseniuro de galio y el metal que están separados por una película finísima (de $0,002\ \mu\text{m}$) de dieléctrico.

Para el aprovechamiento óptimo de la energía de todo el espectro solar resultan adecuados los semiconductores con la energía de enlace del electrón de cerca de $1,5\ \text{eV}$. De principio, para una célula solar es posible alcanzar un rendimiento de 28%. Las células de contacto homogéneo a base del silicio que poseen una serie de ventajas técnicas y están estudiadas de la forma más detallada dan un rendimiento

de 11 a 15%. Las células solares a base del silicio se producen ya más de veinte años. De material sirve la arena de cuarzo (el óxido de silicio) a partir de la cual se obtiene silicio puro. De éste se producen monocristales de 0,3 mm de espesor que tiene la forma de una arandela redonda. En los últimos años se ha elaborado el proceso de obtención de una cinta monocristalina. Está bien asimilada la tecnología de introducción de impurezas que permite crear en la arandela de silicio la capa p. Para conseguir que los rayos solares se reflejen lo menos posible del silicio, la superficie se recubre con una película delgada de óxido de titanio. Siendo la intensidad de la luz igual a 100 mW/cm^2 la arandela produce una tensión de 0,6 V. La densidad de la corriente de cortocircuito es de 34 mA/cm^2 . Por medio de diferentes procedimientos las células se pueden montar en baterías. Está organizada la producción de las arandelas monocristalinas de silicio con el diámetro de 5 a 7,5 cm. Estas se fijan entre placas de vidrio. Al conectarlas, se puede montar un manantial de corriente de suficiente potencia.

Pero también se puede elaborar un proceso tecnológico tal en que se producirán células de área mucho mayor.

La principal causa que impide actualmente utilizar las células solares con fines de obtención industrial de energía es su gran costo. Este se debe a la necesidad de obtener la cinta monocristalina de alta calidad.

Grandes esperanzas se cifran en la fabricación de células solares de capas policristalinas finas. Dicho proceso no será costoso, pero disminuirá de una manera considerable el rendimiento. El trabajo de búsqueda de procedimientos baratos para obtener células solares eficientes está en su apogeo.

Simultáneamente, los investigadores buscan los procedimientos para aumentar la energía que recae en una célula.

Se han creado proyectos de centrales eléctricas constituidas por 34 mil espejos que reflejan los rayos solares y los dirigen hacia el receptor que se encuentra en la cumbre de una torre de 300 m de altura.

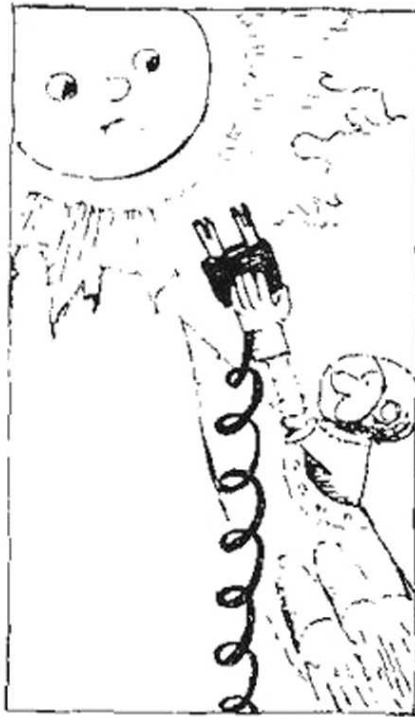


Figura 6.5

Si se utiliza la energía solar concentrada hay que ocuparse de que la elevación de la temperatura de la célula influya en pequeña medida sobre el rendimiento. En este aspecto las ventajas las poseen las células fabricadas del arseniuro de galio.

Se examinan las propuestas de emplazar las centrales eléctricas, que trabajan en base de energía de rayos solares, en las montañas, a grandes alturas, donde están aseguradas las buenas condiciones de iluminación por el Sol. También está elaborado detalladamente el proyecto de creación de centrales eléctricas instaladas en los satélites de la Tierra.

Tales centrales eléctricas cósmicas pueden recibir la energía de los rayos solares sin pérdidas y enviarla en forma de microondas a la Tierra donde aquélla se transformará en energía eléctrica. A primera vista, esta idea puede parecer tomada de una novela de ciencia-ficción. No obstante, los ingenieros piensan seriamente en el proyecto de centrales eléctricas instaladas en un satélite, con una superficie de $25 \times 5 \text{ km}^2$. ¡En tal área pueden caber 14 mil millones de células fotoeléctricas! La central tendrá un peso de 100 000 toneladas. Una central de este tipo puede

proporcionar la misma cantidad de energía que una decena de las más grandes centrales atómicas, es decir, un monto del orden de 10 000 MW.

Los proyectos están elaborados en detalles y se procede a ensayar sus modelos reducidos.

Pasaron tan sólo tres años desde la salida a la luz de la primera edición (rusa; N. del T.) de este libro. Sin embargo, se convirtieron en fenómenos que no pueden ponerse en tela de juicio el crecimiento de la atención prestada a las fuentes no triviales de energía y la tendencia de la técnica moderna de librarse de la utilización de las fuentes de energía peligrosas o aquellas que «saquean» el globo terráqueo.

Para concluir este párrafo citaré un fragmento del reportaje sobre la exposición técnica en Japón donde se exhibían diferentes modelos de fuentes de energía «no estandarizadas» («Literaturnaia Cazeta» del 29 de julio de 1981).

«... Un pabellón que por su forma recuerda una pirámide de Antiguo Egipto. Las paredes son de bloques de vidrio encerrados en brillantes marcos metálicos. Este pabellón está constituido por 800 colectores de rayos solares. El largo de cada colector es de 1820; con ancho, de 860, y el espesor, de 105 mm. Debido a estos colectores el Sol proporcionaba calefacción al pabellón con un área de 4000 m² y una altura equivalente a la de un edificio de cinco pisos, haciéndolo en marzo y abril cuando, con frecuencia se inician días de frío, y ahora, con la llegada del verano, asegura la refrigeración de la sala y produce, además, diariamente, 19 kg de hielo para fines alimenticios que se utiliza aquí mismo, en los quioscos de refrescos.

El pabellón vecino es no menos fantástico por su aspecto exterior e igual de utilitario por su destinación. La diferencia consiste únicamente en que aquí el papel de colectores del calor solar lo desempeñan no los bloques de vidrio llenos de agua, sino tres mil recipientes de vacío.

En uno de los «pabellones solares» hay un espejo esférico. Lo ilumina un potente proyector que imita el Sol. El calor acumulado por el espejo pasa a través de varias etapas de transformación en energía eléctrica, la cual, a su vez, pone en movimiento un motor en miniatura. La construcción de centrales eléctricas solares que trabajan a base de este principio comenzará mañana, mientras que hoy se comprueba qué tipo de tales centrales eléctricas resulta ser el más ventajoso.

En los alrededores de la ciudad de Nio en la isla de Sikoku se alza una torre de 69 m de altura. En su parte superior está dispuesto el colector de rayos solares, y al pie de ésta se halla el generador que produce electricidad. Al lado de la torre está ubicado otro sistema que compite con el primero. El último consta de varias hileras de espejos parabólicos cada uno de los cuales concentra independientemente los rayos del Sol. La energía acumulada por los espejos también se envía al generador. A finales del año en curso se determinará cuál de los sistemas es más rentable y, por consiguiente, resulta más idóneo para las necesidades del futuro próximo.»

Energía eólica

Las masas de aire de la atmósfera terrestre se encuentran en constante movimiento. Los ciclones y tempestades, los vientos alisios que soplan constantemente y las suaves brisas. ¡Cuán variable es la manifestación de la energía de los flujos de aire! Ya en los tiempos remotos la energía del viento se utilizó para el movimiento de los barcos de vela y en los molinos de viento. El total de la potencia anual media de los flujos de aire en toda la Tierra constituye ni más ni menos que 100 mil millones de kilovatios.

Los meteorólogos están bien enterados de las velocidades del viento en diferentes lugares del globo terráqueo y a distintas alturas respecto a la superficie terrestre. El viento es antojoso; esta es la causa de que para todos los cálculos aproximados se operaran la velocidad media: 4 m/s a la altura de 90 m, y ésta es una estimación modesta para la zona costanera.

Por lo visto, los poblados más favorables para la utilización de la energía azul son aquellos que están situados en el litoral de los mares y océanos. Resulta que, contando incluso con un tiempo apacible. Gran Bretaña (entre los países europeos es la más rica en vientos) podría obtener del viento tal cantidad de energía que supere seis veces la producida actualmente por todas las centrales eléctricas del país. Y en Irlanda la energía de los vientos es cien veces mayor que el consumo de energía eléctrica en este país (desde luego, es posible que el problema radique no en tanto ciento, sino en el pequeño número de centrales eléctricas).

Nada más que unos veinte años atrás no se ponían grandes esperanzas en el viento como manantial de energía. Pero las tendencias de la energética moderna varían a

ojos vistas. Una tras otra se organizan comisiones cuya tarea es pensar sobre el empleo de los manantiales gratuitos de energía. Se ha cambiado la actitud —en comparación con el período anterior— para con las riquezas del subsuelo de nuestro planeta: la humanidad comienza a pensar que ha llegado la hora de preocuparse por un aprovechamiento racional, y no saqueador, de las riquezas ocultas bajo la corteza terrestre.

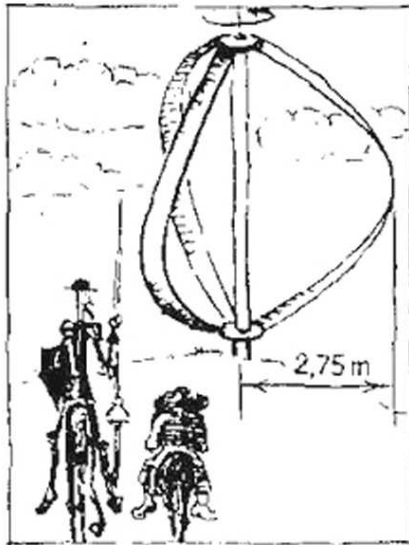


Figura 6.6

Por esta razón, precisamente, se han dedicado con seriedad a la energía eólica. Estimando con cordura las posibilidades técnicas, se puede considerar como real la utilización de fracciones de un tanto por ciento de los cien mil millones de kilovatios. Pero hasta esta cifra es muy grande.

Se han creado proyectos de «molinos» gigantescos. La envergadura de las aletas supera 100 metros, la altura de la torre es aproximadamente del mismo tamaño y la velocidad del extremo de la aleta es de cerca de 500 km/h. La potencia de este molino en el tiempo corriente alcanza de 1 a 3 MW. Varios miles de molinos de este tipo, trabajando en un país donde los vientos fuertes no son raros, pueden abastecerlo de energía. En Europa Occidental, en 1973, fueron producidos 1261,6 miles de millones de kWh de energía eléctrica. ¡De principio (si no se escatiman inversiones básicas) es una fracción minúscula de energía que es posible,

técnicamente, obtener del viento! Ya ha comenzado la construcción de gigantescos «aeromotores».

Los cálculos demuestran que el motor eólico proporciona energía máxima cuando el rotor disminuye la velocidad del viento en un tercio. No conviene pensar que un motor eólico debe imitar, de un modo obligatorio, un molino. Es posible aplicar rotores con un eje vertical de dar una potencia del orden de 20 kW. La ventaja de semejante rotor es su independencia respecto a la dirección del viento, y el inconveniente consiste en que es adecuado tan sólo en el caso de que la fuerza del viento es grande. Los rotores de este tipo se fabrican con un diámetro de 5,5 m.

Es completamente comprensible que los generadores que funcionan a costa del viento deban instalarse en un área pequeña, pero, a pesar de todo, las distancias entre éstos deben ser tales que su acción recíproca no tenga importancia. Para crear una central eléctrica de 1000 MW de potencia se necesita un área del orden de 5 a 10 km².

Capítulo 7

Física del Universo

Contenido:

- *Medición de las distancias hasta las estrellas*
- *El Universo en expansión*
- *Teoría general de la relatividad*
- *Estrellas de distintas edades*
- *Radioastronomía*
- *Rayos cósmicos*

Medición de las distancias hasta las estrellas

Hoy, es casi imposible trazar una divisoria entre la astronomía y la física. Mientras los astrónomos, a semejanza de geógrafos, se limitaban a la descripción del firmamento, el objeto de la astronomía atraía poco la atención de los físicos. Sin embargo, el cuadro cambió radicalmente en los últimos decenios, en particular, cuando empezaron a efectuarse observaciones del cielo estelar desde los satélites y la Luna

Si la atmósfera terrestre no lo impide, se logra recibir todas las señales que llegan hacia nosotros de todos los confines del Universo. Tanto son los flujos de diferentes partículas, como la radiación electromagnética prácticamente del espectro en su totalidad: desde los rayos gamma hasta las ondas radioeléctricas. Se acrecentaron en una forma colosal las observaciones del cielo estelar también a la luz visible.

El estudio de los flujos de partículas y del espectro electromagnético es incuestionablemente de incumbencia de la física. Y si añadimos, además, a lo expuesto el hecho de que el estudio del cosmos nos hace tropezar con una multitud de fenómenos a los cuales, por ahora, no se logra dar una interpretación unívoca, si tomamos en consideración que podemos y debemos estar preparados a que la física del Universo es susceptible de conllevar el descubrimiento de nuevas leyes de la naturaleza, entonces, queda claro por qué hoy en día son los físicos los que

intervienen como investigadores del mundo de las estrellas, los físicos por formación y por el método de razonar.

Comencemos nuestra conversación sobre el Universo por el problema astronómico clásico. ¿Cómo medir la distancia desde la Tierra hasta los cuerpos celestes? En la actualidad, las distancias que nos separan del Sol y de los planetas se miden con una gran precisión valiéndose de los radares. La distancia media hasta el Sol es igual a $141.397.800 \pm 2000$ km.

No obstante, los astrónomos supieron medir las distancias dentro del sistema planetario, así como hasta las estrellas más próximas (que se encuentran de la Tierra a una distancia hasta de 300 años de luz) también sin el radar, utilizando el método que, de principio, es poco sofisticado y que lleva el nombre de triangulación.

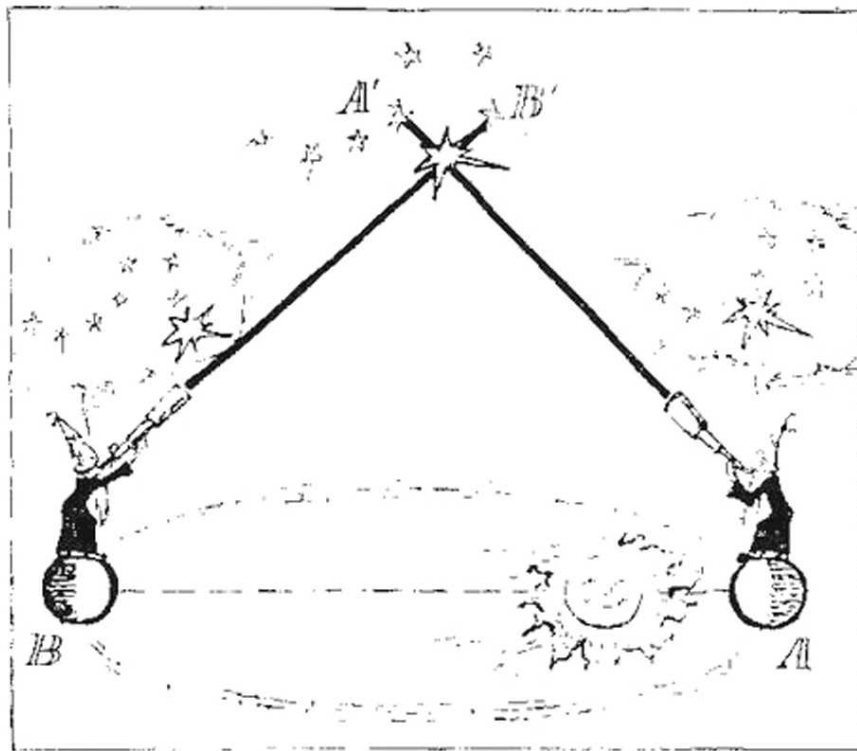


Figura 7.1

Lejos de nosotros se encuentra una alta torre. Llegar hasta la misma es bastante difícil. Digamos, por ejemplo, que nos separan de esta torre pantanos intransitables.

Orientamos a la torre un anteojo y fijamos la dirección. Ahora nos alejamos varios kilómetros, siguiendo una recta perpendicular a la dirección hacia la torre y repetimos nuestra observación. Se sobreentiende que ahora, con respecto al paisaje que está en el lejano fondo, la torre se verá bajo otro ángulo. El ángulo de desplazamiento se denomina paralaje y la distancia a la que nos apartamos desde el primer punto de observación lleva el nombre de base. La paralaje se ha medido y la base se conoce. Construimos un triángulo rectángulo y hallamos la distancia hasta la torre. Precisamente de este método se valen los astrónomos para determinar la paralaje, cuando observan el astro a partir de dos observatorios situados en una recta a una distancia igual al radio de la Tierra. Primero, con la ayuda de unos dispositivos sencillos y, más tarde, por medio de los telescopios, los astrónomos medían los ángulos entre las direcciones hacia distintas estrellas (fig. 7.1). Entonces, prestaron atención a que se puede buscar un grupo de estrellas que se mueve por el cielo como un todo único. Cualesquiera que sean las posiciones de observación los ángulos entre las direcciones permanecen los mismos. Pero entre estas estrellas, con frecuencia, se identificaba una cualquiera que, ostensiblemente, se desplazaba con respecto a sus vecinas. Al tomar una de las estrellas «inmóviles» por una especie de punto de referencia se puede medir el desplazamiento angular de la estrella que cambiaba su disposición respecto a la constelación invariable. Este ángulo de desplazamiento tiene el sentido de paralaje.

Ya en el siglo XVII, después de que Galileo inventara el telescopio, los astrónomos midieron las paralajes de los planetas observando sus desplazamientos respecto a las estrellas «inmóviles». En aquella época se había calculado que la distancia que separa la Tierra del Sol es igual a 140 millones de kilómetros. ¡Una precisión nada mala!

A simple vista, la disposición mutua de las estrellas queda siempre invariable. Sin embargo, al fotografiar el firmamento de diferentes posiciones puede descubrirse el desplazamiento paraláctico de las estrellas. Si se hacen dos fotografías de cierto sector del firmamento encontrándose en un mismo observatorio, pero con un intervalo de medio año, resultará que la distancia entre los puntos de observación será igual casi a 300 millones de kilómetros.

Es imposible medir las distancias hasta las estrellas con la ayuda del radar. Por eso el esquema de medición que ilustra la fig. 7.1 está absolutamente al día.

Las fotos de este tipo nos llevan a la conclusión de que existen estrellas que se desplazan visiblemente con respecto a otras. Sería en sumo grado ilógico suponer que hay estrellas móviles y las hay inmóviles. Surge de por sí la conclusión de que las estrellas cuya disposición mutua permanece invariable se encuentran mucho más lejos que la estrella errante. Sea como fuere, se nos ofrece la posibilidad de medir las paralajes de muchos astros empleando instrumentos de alta calidad. Para muchas estrellas las mediciones de la paralaje se han llevado a cabo con una precisión de una centésima de segundo de arco. Resultó que las más próximas entre ellas se encuentran a distancias superiores a un parsec.

Un parsec es una distancia que da el desplazamiento angular de un segundo si se toma como base el radio medio de la órbita terrestre. Es fácil calcular que un pársec es igual a 30,80 billones de kilómetros.

Para medir las distancias se utilizan, con frecuencia, años de luz. Un año de luz equivale al camino que la luz recorre en un año. Un parsec es igual a 3,20 años de luz.

El método paraláctico sirve hasta las distancias del orden de cientos de años de luz. ¿Y cómo medir las distancias hasta las estrellas más lejanas? Este asunto resulta extraordinariamente complicado, y la seguridad de que las evaluaciones aproximadas son correctas (se puede dar crédito, en lo mayoría de los casos, tan sólo a una cifra significativa) se consigue comparando los resultados de diferentes mediciones.

Uno de los métodos (éstos son muchos y no tenemos la posibilidad de detenernos en ellos) consiste en lo siguiente. Si se conoce la distancia hasta la estrella R y la magnitud estelar visual m (medida de iluminación creada por la estrella en la Tierra), entonces, utilizando la ley de acuerdo con la cual la intensidad varía inversamente proporcional al cuadrado de distancia desde la fuente, se puede deducir la siguiente fórmula:

$$M = m - 5 \log R + 5$$

Aquí M es la llamada magnitud estelar absoluta. Es la magnitud que tendría la estrella si se encontrase de nosotros a cierta distancia normalizada que se toma igual al 10 parsec.

Suponemos con pleno fundamento que esta fórmula es válida también para las estrellas lejanas. Pero, ¿cómo aprovecharla para determinar la distancia hasta la estrella? Por desgracia, precisamente en este problema —el más interesante— no podemos detenernos con mayor detalle: nos falta espacio en nuestro pequeño libro. Resulta que para cierta categoría de estrellas se logra construir un gráfico que muestra cómo varía la relación de las intensidades de los pares determinados de líneas del espectro estelar en función de la magnitud M . Y en cuanto a las intensidades de las líneas espectrales los astrónomos las saben medir.

Para algunas estrellas que cambian periódicamente su brillo (éstas pertenecen a la clase de las llamadas cefeidas) está demostrado que la luminosidad, es decir, la magnitud del flujo luminoso encerrado en una unidad de ángulo sólido (puede referirse tanto a la zona del espectro, como a la radiación total) incrementa paulatinamente con el aumento del período. Se sobreentiende que la luminosidad está relacionada de una manera estrecha con la magnitud M .

Para estas estrellas variables su distancia hasta el observador se establece con considerable exactitud.

He aquí otra idea de la que también se puede hacer uso para medir la «envergadura» del Universo.

Los astros del Universo no están diseminados por éste al azar. A unas distancias inconcebiblemente enormes de nosotros están situados diferentes cúmulos estelares, estos se mueven de la más variada manera respecto al Sistema Solar, este movimiento nos ayuda a determinar las distancias hasta dichos cúmulos. También acude en nuestra ayuda el efecto Doppler.

Las fórmulas que hemos examinado en el libro 3 son válidas para cualesquiera oscilaciones. Por esta razón, las frecuencias de las líneas espectrales observadas en el espectro de la estrella permiten determinar la velocidad de su movimiento en dirección desde la Tierra o hacia ésta. Puesto que c en la fórmula

$$\nu' = \nu \left(1 \pm \frac{v}{c} \right)$$

es la velocidad de la luz igual a 300.000 km/s se comprende que el movimiento de la estrella debe ser lo suficientemente rápido y el espectrógrafo tiene que ser de muy alta calidad para que descubramos el desplazamiento de las líneas espectrales. Nótese que el naturalista está absolutamente seguro de que el hidrógeno que se encuentra en las entrañas de una estrella y que anuncia su presencia en el objeto situado a una distancia cuya enormidad es inconcebible, este hidrógeno es el mismo que aquel con que tenemos que ver en las condiciones terrestres. Si la estrella se encontrase en reposo, entonces, el espectro del hidrógeno estaría obligado a tener un aspecto absolutamente análogo a aquel que manifiesta el espectro de un tubo de descarga de gases (¡tanta es la seguridad del físico en la unidad del mundo!). Pero las líneas resultan visiblemente desplazadas, y las velocidades de las galaxias representan centenares y, a veces, decenas de miles de kilómetros por segundo. Nadie pone en tela de juicio la explicación insertada. Y, además, ¿acaso se puede hacerlo? Es que el espectro del hidrógeno consta de un número muy grande de líneas, y vemos el desplazamiento no de una sola línea, sino de todas las líneas del espectro de acuerdo con la fórmula de Doppler.

Pero retornemos a la medición de las distancias siderales. ¿Qué ayuda puede prestarnos el conocimiento de las velocidades de movimiento de los astros? Todo es muy sencillo... pero, por supuesto, solamente en el caso de advertir que durante un año la estrella se ha desplazado (recordemos otra vez, si lo ha hecho con respecto a otras estrellas que en la medición dada pueden considerarse «inmóviles») a una distancia determinada. Si se conoce el desplazamiento de arco de la estrella, φ , (perpendicularmente al rayo de luz que llega hacia nosotros), entonces, al saber la velocidad tangencial hallaremos la distancia hasta la estrella R por la fórmula

$$\frac{R\varphi}{t} = v$$

En lugar de t conviene poner el tiempo invertido para el desplazamiento de la estrella.

Un momento, dirá el lector, es que en la fórmula entra la velocidad tangencial, mientras que la dirección del movimiento de la estrella la ignoramos. Es una objeción absolutamente justa. Esta es la razón de que es necesario proceder de la siguiente forma. Se selecciona un gran número de estrellas con igual periodo de variación de la luminosidad. Para todas estas estrellas se mide la velocidad radial. Esta oscilará desde cero (si la estrella se mueve perpendicularmente al rayo) hasta el máximo (si la estrella se mueve a lo largo del rayo). Suponiendo que, en promedio, las velocidades tangenciales y radiales son iguales, podemos sustituir en la fórmula insertada al valor medio de las velocidades que hemos medido.

El Universo en expansión

Como resultado de mediciones de las distancias podemos describir el reino de los astros de la siguiente forma. El Universo observable está partido en un número enorme de cúmulos estelares que recibieron el nombre de galaxias. Nuestro Sistema Solar forma parte de la Galaxia que cada uno habrá visto en el firmamento. Es la Vía Láctea. Nuestra Galaxia tiene la forma de disco cuyo diámetro es de cerca de 100 mil años de luz. La Galaxia incluye algo como 10^{11} estrellas de diferentes tipos. El Sol es uno de estos luceros y se encuentra en la periferia de la Galaxia. Las estrellas están alejadas unas de otras a enormes distancias. En promedio, la distancia entre las estrellas supera 10 millones de veces el tamaño de la estrella. Si se quisiera alcanzar un enrarecimiento análogo del espacio aéreo haría falta disminuir la densidad del aire 10^{18} veces.

Ahora bien, en lo que se refiere a la disposición mutua de las galaxias, aquí el cuadro es distinto. Las distancias medias entre las galaxias son tan sólo varias veces mayores que las dimensiones de las propias galaxias.

Los astrofísicos pueden comunicar numerosos detalles acerca del carácter del movimiento recíproco de las estrellas que pertenecen a una misma galaxia. No nos detendremos en esta materia. No obstante, incluso en un libro que expone el ABC de la física no podemos hacer caso omiso de una observación de extraordinaria importancia. Debido al estudio del efecto Doppler en los espectros pertenecientes a

las estrellas de diferentes galaxias, se ha establecido de un modo fidedigno que las galaxias se alejan con grandes velocidades «de nosotros». En este caso se ha demostrado que la velocidad de alejamiento de una galaxia es directamente proporcional a la distancia que la separa «de nosotros». Las más lejanas galaxias visibles se mueven con unas velocidades que se aproximan a la mitad de la de la luz.

¿Por qué puse entre comillas las palabras «de nosotros»? Por la simple razón de que en esta afirmación se encierra una absurdidad explícita. Semejante posición podría satisfacer solamente a una persona creyente en que dios nuestro señor había creado la Tierra y emplazado alrededor de ésta las estrellas. Semejante cuadro había sido adoptado en los tiempos antiguos por Aristóteles y predominaba en la Edad Media. El Universo tenía límites tras los cuales se extendía el reino de dios, el empíreo.

Para el hombre contemporáneo es totalmente inadmisibles la idea del Universo que tiene límites. Si existe un límite, entonces, de inmediato, sigue la pregunta: ¿y qué se encuentra tras éste? De este modo, es necesario pasar sin el concepto del límite del Universo. Por otra parte, de ningún modo se puede creer que la Tierra o el Sol son cuerpos especiales del Universo. Esto contradice evidentemente todos los datos obtenidos por los astrofísicos. ¡Pero es que las galaxias se alejan «de nosotros»! ¿Cómo pueden avenirse a este hecho los requisitos que planteamos ante el modelo del Universo? Queremos que no tenga límites; deseamos que sea más o menos homogéneo: exigimos que el cuadro del Universo sea el mismo desde el punto de vista del habitante de cualquier estrella.

La necesidad intelectual de existencia de semejante modelo llevó a Einstein a la siguiente deducción fundamental. La geometría de Euclides que utilizamos con éxito en nuestra vida cotidiana deja de ser válida cuando se trata de distancias inconcebiblemente gigantescas y con las cuales nos encontramos al estudiar el mundo estelar. La renuncia a la geometría de Euclides significa la renuncia a los modelos patentes del Universo. ¡Qué se puede hacer! No es la primera vez que debemos renunciar a la posibilidad de formar una idea tangible sobre el mundo que nos rodea.

Al despedirnos de la geometría de Euclides, podemos proponer un modelo del Universo que, simultáneamente, está cerrado y no tiene límites ni centro, de este modelo todos los puntos del espacio serán equivalentes.

A primera vista puedo parecer que Einstein exige de nosotros un gran sacrificio. Estamos tan acostumbrados a que dos líneas paralelas nunca se intersectan, que la suma de los cuadrados de los catetos es igual al cuadrado de la hipotenusa. Estamos acostumbrados... Mas, un momento... Recuerden las clases de geografía. En la esfera que representa el globo terráqueo las líneas de las latitudes son paralelas. ¿Y en un mapa geográfico? El lector tendrá pleno derecho a preguntar: ¿en un mapa de qué tipo? Puesto que los mapas geográficos se trazan por diferentes procedimientos. Si el globo terráqueo se representa en forma de dos hemisferios, los paralelos pierden su carácter paralelo. Si se recurre a la llamada proyección rectangular, las distancias entre las latitudes dejan de ser iguales. ¿Acaso queda aquí algo de la geometría de Euclides?

Si el lector quiere, puede cerciorarse de que el teorema de Pitágoras sufrió un fracaso. En el mapa de principales rutas aéreas tracé el triángulo (fig. 7.2) Moscú-Ciudad de El Cabo-Londres.

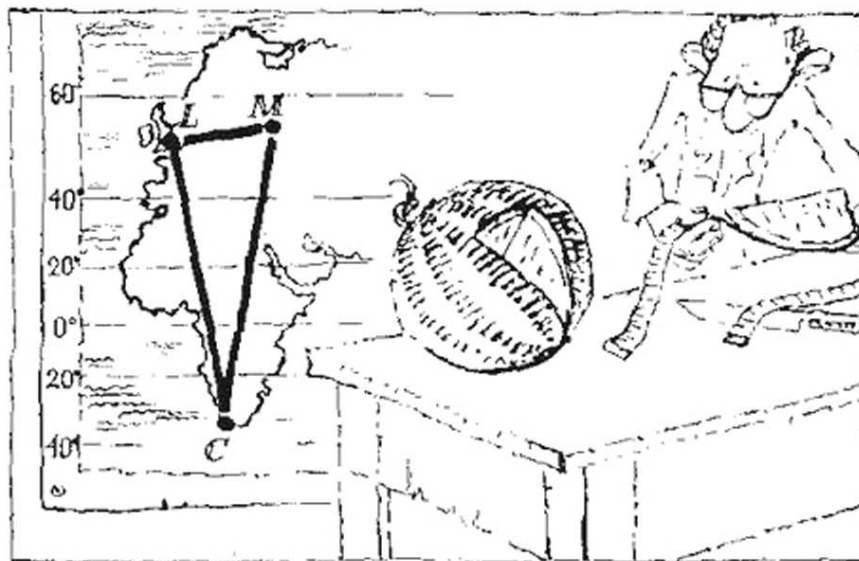


Figura 7.2

Lo escogí ya que, por casualidad, en el mapa es exactamente un triángulo rectángulo. A raíz de ello, la suma de los cuadrados de los catetos debe ser igual al cuadrado de hipotenusa. ¡Nada de eso! Pruebe calcular: la distancia Moscú-Londres es de 2.490 km; la distancia Moscú-Ciudad de El Cabo, 10.130 km, y la distancia Londres-Ciudad de El Cabo, 9.660 km. El teorema no funciona, nuestra geometría no sirve para el mapa geográfico. Las leyes de la geometría sobre el plano que representa el globo terráqueo se distinguen de las leyes «corrientes».

Al examinar al mapa de los hemisferios vemos que éste tiene «bordes». Pero si ésta es una ilusión. En la realidad, al avanzar por la superficie del globo terráqueo nunca llegaremos al inexistente «borde de la Tierra».

Se cuenta una anécdota. El pequeño hijo de Einstein le pregunta: «¿Papá, por qué eres tan célebre?» Einstein le contesta: «Tuve suerte, fui el primero en advertir que un escarabajo, arrastrándose por el globo, puede darle una vuelta por el ecuador y regresar al punto de partida». Por supuesto, ateniéndose a esta forma, no hay descubrimiento. Pero extender este razonamiento al espacio tridimensional del Universo; afirmar que éste es finito y cerrado a semejanza de una superficie bidimensional que limita el globo; sacar de ello la conclusión de que todos los puntos del Universo son completamente equivalentes en el mismo sentido en que lo son todos los puntos de la superficie del globo es evidente que esto exige una audacia intelectual extraordinaria.

De aquí deriva la siguiente conclusión. Si nosotros, los terrícolas, observamos que todas las galaxias se alejan de nosotros, entonces, el habitante de un planeta de cualquier estrella también verá el mismo cuadro. Llegará a las mismas conclusiones sobre el carácter del movimiento del mundo estelar y medirá las mismas velocidades de las galaxias que el morador de la Tierra.

El modelo del Universo propuesto por Einstein en 1917 es un corolario natural derivado de la llamada teoría general de la relatividad que elaboró él mismo (aquella parte de la teoría que hemos expuesto en el capítulo 4 se denomina especial o restringida).

Sin embargo, Einstein no suponía que el Universo cerrado puede cambiar sus dimensiones. Dicha tesis la promovió en 1922—1924 el científico soviético Alexandr Alexándrovich Friedman (1888—1925). Resultó que la teoría requiere ya sea una

expansión del Universo, o bien, expansiones y contracciones alternantes. En todo caso, éste no puede ser estático. Tenemos derecho a adoptar cualquiera de estos dos puntos de vista, es decir, tanto suponer que vivimos ahora en la época de expansión del Universo, a la cual precedían contracciones y expansiones alternantes, como admitir que el Universo, cierto tiempo atrás (el tiempo puede calcularse y éste resulta igual a varias decenas de miles de millones de años), no era sino un «huevo cósmico» que explotó y se expande desde aquel período.

Es necesario comprender, con toda precisión, que la variante de la explosión inicial no está relacionada en modo alguno con el reconocimiento de la creación del mundo. Puede ser que los intentos de mirar demasiado lejos hacia el futuro y hacia el pasado, así como las distancias desmesuradas, son ilícitos dentro del marco de las teorías existentes.

Con arreglo al esquema que ahora nos parece racional examinemos este ejemplo simple. Medimos el corrimiento hacia el rojo de las líneas espectrales de la radiación que llega a nosotros desde las lejanas galaxias. Haciendo uso de la fórmula de Doppler valoramos las velocidades de movimiento de dichas galaxias. Cuanto más lejos de nosotros se encuentran éstas, con tanta mayor celeridad se mueven. El telescopio nos da a conocer las velocidades de alejamiento de las galaxias cada vez más alejadas: diez mil kilómetros por segundo, cien mil kilómetros... Sin embargo, este crecimiento de los valores de la velocidad debe tener un límite. Es que si la galaxia se aleja de nosotros a velocidad de la luz, entonces, de principio, no la podemos ver: la frecuencia de la luz calculada por la fórmula de Doppler se reducirá a... cero. La luz no llega hacia nosotros de una galaxia de este tipo.

¿Cuáles son, entonces, las distancias máximas que sabremos medir cuando tengamos a nuestra disposición unos instrumentos «super excelentes»? Está claro que la evaluación puede ser extremadamente aproximada. Pero, en todo caso, de ningún modo nos toca lamentar que no estemos en condiciones de mirar lo suficientemente lejos: el número de que se trata se mide en miles de millones de años de luz!

En lo que se refiere a distancias todavía mayores, la conversación sobre éstas, a todas luces, carece de sentido. Podemos expresarlo también de la siguiente forma: dentro de los marcos de las ideas contemporáneas la conversación sobre las

distancias que exceden de miles de millones de años de luz carece de sentido físico puesto que no se puede proponer un método de medición.

Aquí los asuntos toman el mismo cariz que en la situación con la trayectoria del electrón: ésta no puede medirse, de ninguna manera, simplemente porque la representación de ella no tiene sentido.

Teoría general de la relatividad

La teoría especial de la relatividad implicó la necesidad de introducir correcciones en las leyes de la mecánica para los cuerpos que se mueven a velocidades próximas a la de la luz. La teoría general de la relatividad introduce correcciones en las ideas acostumbradas sobre el espacio cuando se trata de distancias exorbitantes. Precisamente ésta es la razón de que la conversación sobre esta teoría viene al caso en el capítulo dedicado a la física del Universo.

La teoría general de la relatividad se basa en el siguiente principio; no existen experimentos con cuya ayuda se podría distinguir al movimiento de los cuerpos bajo la acción del campo gravitacional del movimiento en un sistema de referencia no inercial elegido de modo correspondiente.

Examinemos algunos ejemplos elementales. Nos encontramos en un ascensor que cae con una aceleración a . Soltamos de la mano una bolita y recapitamos qué carácter tendrá su caída. Apenas la bolita resulta suelta, desde el punto de vista de un observador inercial comenzará su caída libre con una aceleración g . Por cuanto el ascensor baja con la aceleración a , la aceleración de la bola con respecto al suelo de éste será $(g - a)$. El observador que se halla en el ascensor puede caracterizar el movimiento del cuerpo que cae por medio de la aceleración $g' = g - a$. En otras palabras, el observador en el ascensor puede no hablar sobre el movimiento acelerado del ascensor «variando» la aceleración del campo gravitatorio en su sistema.

Ahora comparemos dos ascensores. Uno de éstos pende inmóvil sobre la Tierra y el otro se mueve en el vacío interplanetario con una aceleración a respecto a las estrellas. Todos los cuerpos que se encuentran en el ascensor el cual pende inmóvil sobre la Tierra poseen la capacidad de caer libremente con la aceleración g . Pero, la

misma capacidad la tienen los cuerpos en el interior del ascensor interplanetario. Estos «caerán» con la aceleración $-a$, al «fondo» del ascensor.

Resulta que la acción del campo gravitatorio y las manifestaciones del movimiento acelerado son indistinguibles.

El comportamiento del cuerpo en un sistema de coordenadas que se mueve con aceleración es equivalente al comportamiento del cuerpo en presencia de un campo equivalente de gravedad, sin embargo, esta equivalencia puede ser completa si nos limitamos a hacer las observaciones en sectores pequeños del espacio. En efecto, figurémonos un «ascensor» con las dimensiones lineales del suelo de miles de kilómetros. Si un ascensor de este tipo pende inmóvil sobre al globo terráqueo, los fenómenos en aquél ocurrirán en forma distinta a la del caso en que el ascensor se mueva con aceleración a respecto a las estrellas inmóviles. Esto se ve claramente en la fig. 7.3: en un caso los cuerpos caen oblicuamente al suelo del ascensor, y en al otro caso, verticalmente.

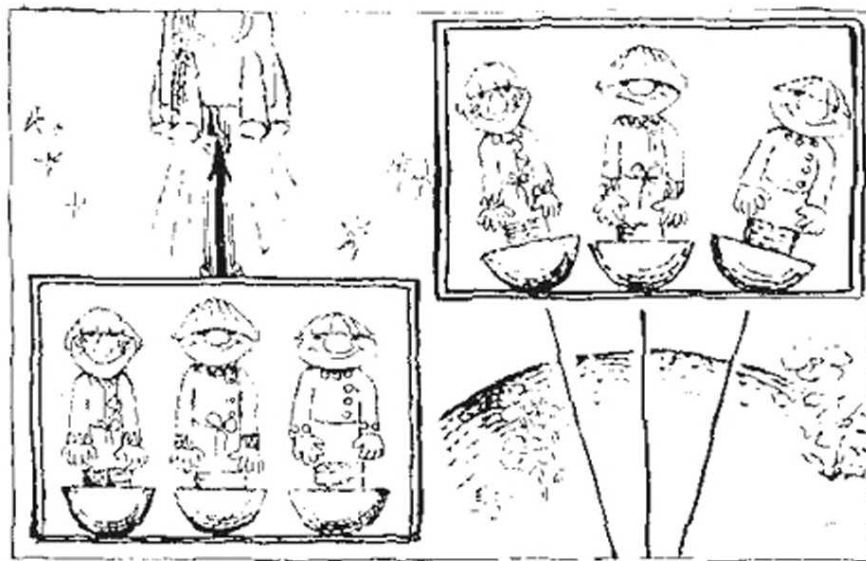


Figura 7.3

De este modo, el principio de equivalencia es válido para aquellos volúmenes del espacio en los cuales el campo puede considerarse homogéneo.

El principio de equivalencia del campo de gravedad con un sistema de referencia local elegido de manera adecuada conduce a una conclusión importante: el campo gravitatorio está relacionado con la curvatura del espacio y la desfiguración del curso del tiempo.

Dos observadores están ocupados en medir la distancia y los intervalos de tiempo. Les interesan los acontecimientos que se desarrollan en un disco en rotación. Un observador se encuentra en el disco y otro permanece inmóvil (con respecto a las estrellas). Desde luego, sólo aquel observador trabaja quien, por decirlo así, es el morador del disco. El observador inmóvil tan sólo mira cómo trabaja su colega.

El primer experimento consiste en medir la distancia radial, es decir, la distancia entre dos objetos instalados en un mismo radio del disco a diferentes distancias del centro. La medición se efectúa de una forma ordinaria, a saber: entre los extremos del segmento que interesa a los investigadores cabe tantas y tantas veces la regla patrón. Desde el punto de vista de ambos investigadores la longitud de la regla dispuesta perpendicularmente a la dirección del movimiento es la misma y, por lo tanto, entre los dos no surgirán discordancias en cuanto a la longitud del segmento radial.

Ahora el morador del disco procede a la realización del segundo experimento. Quiere medir la longitud de la circunferencia. La regla debe colocarse a lo largo del movimiento. Por supuesto, es necesario tener en cuenta la curvatura de la circunferencia. Por esta causa, la medición debe llevarse a cabo con una regla pequeña, de modo que la longitud del segmento tangente se pueda igualar a la longitud del arco. Los observadores no discutirán con motivo de cuántas veces ha cabido la regla en la longitud de la circunferencia. No obstante, sus opiniones no coincidirán en lo que se refiere a la propia longitud de la circunferencia. Se trata de que el observador inmóvil considere que la regla se ha reducido, ya que en este segundo experimento está situada a lo largo del movimiento.

De este modo, al radio de la circunferencia para ambos observadores es el mismo, mientras que la longitud de ésta es distinta. El observador inmóvil llega a la conclusión de que la fórmula de la longitud de la circunferencia $2\pi r$ no es correcta. Para mí, dirá el observador inmóvil, la longitud de la circunferencia es menor que $2\pi r$.

Este ejemplo muestra al lector cómo la teoría de la relatividad llega a renunciar a la geometría euclidiana, o bien (es lo mismo pero expresado en otras palabras) llega a la idea sobre la curvatura del espacio.

«Escándalos» análogos suceden también con los relojes. Los relojes fijados a diferentes distancias del eje de rotación van con distinta velocidad. Todos éstos marcharán más lentamente que un reloj inmóvil. En este caso, además, la desaceleración es tanto mayor cuanto más lejos del centro del disco se encuentra el reloj. El observador fijo dirá que si uno vive sobre un disco puede valerse de relojes y reglas tan sólo en el caso de encontrarse a una distancia determinada del centro. El espacio y el tiempo acusan particularidades locales.

Ahora recordemos el principio de equivalencia. Por cuanto semejantes particularidades locales del tiempo y del espacio se manifiestan en un disco que gira, eso quiere decir de la misma forma se desarrollan los fenómenos también en el campo de gravedad. En un disco los asuntos loman el mismo cariz que en el ascensor representado en la fig. 7.3. El movimiento acelerado es indistinguible del movimiento en el campo gravitatorio dirigido hasta el lado opuesto a la aceleración. De esto modo, la curvatura local del espacio y del tiempo equivale a la existencia de un campo de gravedad.

El carácter cerrado del Universo a que nos referimos en el párrafo anterior puede considerarse, sin duda alguna, como una confirmación de la teoría general de la relatividad. Sin embargo, el lector debe tener en cuenta que la hipótesis sobre el carácter cerrado del Universo no es, hoy en día, la única posible.

Existe la posibilidad de deducir a partir de las ecuaciones ingeniosas de la teoría general de la relatividad, por medio de un razonamiento matemático riguroso, una serie de corolarios cuantitativos. Einstein demostró que, en primer lugar, los rayos luminosos, al pasar en las cercanías del Sol, deben desviarse. El rayo que pasa en una proximidad inmediata al Sol debe desviarlo en $1,75''$. Las mediciones arrojaron un valor de $1,70$. En segundo lugar, la órbita del planeta Mercurio (mejor dicho, su perihelio) debe girar en su plano. El cálculo muestra que este desplazamiento, en un siglo, tiene que ser de $43''$. Precisamente este número lo dan las observaciones. Y un vaticinio más confirmado por el experimento: el fotón consume energía (y, por consiguiente, varía la frecuencia de la luz) al superar las fuerzas de la gravedad.

La teoría general de la relatividad es una de las más grandes conquistas del pensamiento humano. Su creación desempeñó un papel transcendental en el desarrollo de las concepciones acerca del Universo, revolucionando la física.

Estrellas de distintas edades

La física del Universo atraviesa una etapa de desarrollo tempestuoso. De ningún modo puede llamarse rama consumada de ciencia, como, digamos, la mecánica de pequeñas velocidades o la termodinámica. Debido a ello no está excluido que, a medida que prosiguen las investigaciones de las estrellas, se descubrirán nuevas leyes de la naturaleza. Por ahora, no sucedió tal cosa. Sea como fuere, el cuadro del Universo que de cuando en cuando esboza uno u otro físico en algún artículo de divulgación, siempre sufre variaciones. De este modo, también aquello que yo expongo en este capítulo habrá de revisarse dentro de dos o tres lustros.

Los astrónomos, ya hace mucho tiempo, se han dado cuenta de que existen diferentes estrellas. Por medio del telescopio, espectrógrafo e interferómetro se consiguen determinar muchas magnitudes físicas que pueden registrarse en la carta de identidad de la estrella.

Como se puede suponer por analogía con los experimentos realizados en la Tierra, el carácter del espectro determina la temperatura de la superficie de la estrella. Con esta temperatura está relacionado unívocamente el color observado de la estrella. Si la temperatura es de 3000 a 4000 K, el color es rojizo; si es de 6000 a 7000 K, amarillento. Las estrellas blanco-azuladas tienen la temperatura superior a 10 000 a 12 000 K. Al salir a los espacios cósmicos, los físicos hallaron estrellas al máximo de cuya radiación se encuentra en la región de los rayos X e incluso de los rayos gamma. Esto significa que la temperatura de las estrellas puede alcanzar también millones de kelvin.

Otra característica importante de la estrella es la energía total del espectro que llega a nosotros. Es la luminosidad de la estrella. Las diferencias colosales en la luminosidad pueden guardar relación con el tamaño y la masa de la estrella, así como con su temperatura y el alejamiento de nosotros.

En cuanto a la composición química de las estrellas éstas representan, principalmente, los plasmas de hidrógeno y helio. El Sol es una estrella bastante

típica. Su composición química está determinada con mayor o menor exactitud a partir del cuadro de los espectros y basándose en los cálculos teóricos de la energía de la radiación. El hidrógeno constituye el 70% y el helio, 29%. A otros elementos les corresponde cerca de 1%.

En la atmósfera de muchas estrellas se descubrieron campos magnéticos intensos, miles de veces mayores que el campo magnético de la Tierra. Esto nos da a conocer el mismo análisis espectral, por cuanto las líneas espectrales se desdoblan en los campos magnéticos.

El medio interestelar está enrarecido hasta límites inconcebibles. En un centímetro cúbico del cosmos se halla un átomo. Recuerden que en 1 cm^3 de aire que respiramos se contienen $2,7 \cdot 10^{19}$ moléculas. La cifra aducida es media. Existen zonas del espacio en las cuales la densidad del gas interestelar supera sustancialmente a la media. Además del gas nos encontramos también con el polvo que se compone de partículas cuyas dimensiones son de 10^{-4} a 10^{-5} cm .

Se sugiere que las estrellas se forman del medio de gas y polvo. Por influjo de las fuerzas de gravedad cierta nube comienza a contraerse en una bola. Pasados cientos de miles de años esta nube se comprime y la temperatura de la estrella aumentará, haciéndola visible en el firmamento. Se sobreentiende que este tiempo depende en gran medida del tamaño y, correspondientemente, de la masa de la nube que se condensa.

A medida que continúa la compresión, la temperatura en el seno de la estrella se acrecienta alcanzando un valor para el cual se inicia la reacción termonuclear. Cuatro núcleos de los átomos de hidrógeno se transforman en un núcleo del átomo de helio. Acuérdesse que en este caso 4,0339 u.m.a. de los cuatro átomos de hidrógeno se transforman en 4,0038 u.m.a. de helio. Se desprende una energía equivalente a 0,0301 u.m.a.

La quema del hidrógeno que tiene lugar en el centro de la estrella puede durar un lapso distinto, en dependencia de su masa. Para el Sol este tiempo es igual a 10 a 20 mil millones de años. Tal es el período del estado estable de una estrella. Las fuerzas de atracción gravitacional se compensan por la presión interna de los núcleos calientes que tratan de inflar la estrella. De este modo, la estrella es algo

como una botella con gas comprimido. Sólo que el papel de las paredes del recipiente lo asumen las fuerzas de gravedad.

Cuando las reservas de combustible de hidrógeno comiencen a tocar a su fin, la presión interna disminuirá. El núcleo de la estrella empezará a comprimirse.

¿Y qué ocurrirá a continuación? —comenzamos a preguntar al teórico. Este, después de efectuar los cálculos correspondientes, nos contesta que el destino ulterior del astro depende del hecho de si logra o no arrojar su envoltura exterior. Si semejante proceso resulta posible y la masa de la estrella llega a ser dos veces menor que la del Sol, entonces, se crearán fuerzas capaces de contrarrestar las gravitacionales. Se forma una estrella pequeña con una temperatura alta de la superficie. Esta estrella se llama enana blanca.

Bueno, ¿y más tarde? Otra vez el destino de la estrella viene determinado por su masa. Si la masa de la enana blanca es menor que una vez y media la masa del Sol, se extinguirá lentamente, sin que ocurra ningún acontecimiento dramático. Su radio disminuirá y descenderá la temperatura. Finalmente, la enana se convertirá en una estrella fría de tamaño de la Tierra. Tal es la «muerte» de la mayoría de las estrellas.

Pero si la masa de la enana blanca, formada después de que la estrella con el combustible quemado había arrojado su envoltura, es mayor que una vez y media la masa del Sol, entonces la compresión no se detendrá en la etapa de enana blanca. Los electrones se fusionarán con los protones dando lugar a la formación de una estrella de neutrones cuyo diámetro medirá tan sólo varias decenas de kilómetros, de acuerdo con los cálculos, la estrella de neutrones debe tener una temperatura del orden de diez millones de kelvin. El máximo de su radiación corresponde a la región de los rayos X.

Hemos relatado lo que debe suceder con una estrella si ésta logra deshacerse de su envoltura exterior. Pero las ecuaciones matemáticas no imponen la necesidad de semejante pérdida. Ahora bien, si el cuerpo celeste conserva una masa del orden de la del Sol, la atracción gravitacional simplemente aniquilará la estrella. En el lugar donde ésta se encontraba quedará un agujero negro.

¿En qué etapa de compresión debo tener lugar la aniquilación de la estrella y por qué al punto donde ésta se hallaba recibió el nombre de agujero negro?

Recordemos la siguiente sencilla ley en que se basa el lanzamiento de los cohetes que abandonan la Tierra para dirigirse al cosmos (véase el libro 1). Para abandonar la Tierra se necesita una velocidad de 11 km/s. Esta velocidad se determina por la fórmula

$$v^2 = 2\gamma \frac{M}{R}$$

De la fórmula queda claro que a medida que la bola de masa determinada se comprime, la velocidad con que el cohete puede salir al cosmos desde este cuerpo celeste incrementará constantemente.

¡Mas la velocidad límite es igual a 300 000 km/s! Si la bola estelar de masa dada se comprime hasta una bolita cuyo radio será igual a

$$R = 2\gamma \frac{M}{300.000 \text{ km/s}^2}$$

entonces resulta imposible dejar semejante bola. En otras palabras, en el lugar donde se encontraba la estrella puede llegar todo lo que se quiera, incluyendo el rayo luminoso o el rayo de otra radiación electromagnética, pero no logrará salir de esto agujero. Acepten que la denominación «agujero negro» es completamente acertada. No es difícil calcular a ojo, por la formula escrita, que los agujeros negros con las masas de 3 a 50 masas solares tendrán los diámetros de 60 a 1000 km.

Ahora voy a detenerme más o menos pormenorizadamente en las búsquedas de los agujeros negros. Por supuesto, el lector puede decir que es un problema particular al que no convendría prestar atención en el pequeño libro dedicado a la física en general. Pero yo estimo aleccionador el propio método de abordar esta búsqueda. El talento del naturalista se manifiesta, precisamente, en al hecho de hallar los procedimientos para la demostración indirecta de la validez del modelo cuyos propiedades no pueden demostrarse de una forma directa.

A primera vista, el problema, en efecto, parece inmensamente complicado, si no irresoluble. Ni siquiera el más perfecto instrumento es capaz de advertir una

manchita negra de 1000 km de tamaño a distancias inconcebiblemente grandes. El físico soviético Ya. D. Zeldóvich más de 20 años atrás propuso comenzar la búsqueda de agujeros negros basándose en la idea de que su presencia en el firmamento debe influir en el comportamiento de los cuerpos visibles que se encuentran en la proximidad de estos agujeros. Junto con sus colaboradores emprendió el examen sistemático de los catálogos de estrellas con el fin de encontrar una estrella visible que girase alrededor de un agujero negro. Semejante estrella debe parecer solitaria y su rotación da lugar a que las líneas espectrales se desplazarán de manera periódica hacia el rojo o hacia el azul en función de si la estrella se aleja de nosotros o se dirige hacia nosotros.

A este trabajo se incorporaron los investigadores también de otros países y se encontró cierto número de estrellas aparentemente adecuadas. De la magnitud del desplazamiento de Doppler se puede evaluar, a grandes rasgos, la masa de la estrella alrededor de la cual gira el satélite visible. Se eligieron candidatos invisibles con una masa tres veces mayor que la del Sol. De este modo, no podía tratarse ni de enanas blancas, ni de estrellas de neutrones.

Sin embargo, todo ello no es suficiente para afirmar que existe en realidad un sistema tan exótico con el agujero negro. Los oponentes podían promover una serie de otras explicaciones del desplazamiento periódico de Doppler.

Pero existe un fenómeno que puede llamarse en ayuda. Se trata de que el agujero negro posee la capacidad de atraer en su seno el gas de su satélite. Al caer al agujero negro este gas debe calentarse fuertemente emitiendo rayos X. Es cierto que también las enanas blancas y las estrellas de neutrones dan lugar a semejante atracción del gas. No obstante, éstas pueden distinguirse del agujero negro por la magnitud de su masa.

Hace muy poco se ha encontrado una estrella que satisface todos los requisitos a que debe someterse el satélite de un agujero negro. No hay duda de que tras este descubrimiento seguirán nuevos experimentos y cálculos teóricos detallados cuya finalidad es predecir las particularidades del espectro de rayos X que emana del entorno del agujero negro. El futuro muy próximo debe revelar con cuánta frecuencia estos «cuerpos» maravillosos se encuentran en el Universo. Hay fundamento para suponer que es posible la existencia tanto de agujeros negros

grandes como de miniagujeros negros con una masa del orden de 10^{16} g. Estos agujeros cuyas dimensiones son menores que las de un núcleo atómico pueden sucumbir inesperadamente, devolviendo la energía que encierran. Y ésta basta para satisfacer durante muchos años todas las necesidades energéticas de la Tierra. ¡Qué magnífico tema para los autores de las novelas de ciencia-ficción!

Radioastronomía

En la fig. 7.4 se representa la fotografía de una antena parabólica. Esta enfoca los rayos radioeléctricos paralelos que inciden sobre ella. Los rayos se concentran en un punto en que está situado un receptor especial. Seguidamente, la señal se amplifica por métodos radiotécnicos. La antena parabólica mostrada en la figura está instalada en la ciudad de Effelsberg (RDA⁴). Con ayuda de esta antena cuyo diámetro es de 100 metros realizan sus investigaciones los científicos de muchos países, incluyendo la Unión Soviética.

⁴ República Democrática Alemana, fue un Estado socialista de la Europa Central que se estableció en 1949 en el territorio de Alemania ocupado por la URSS, al final de la Segunda Guerra Mundial, y existió hasta 1990, cuando los länder (estados federados) que la formaban se incorporaron a la República Federal Alemana (RFA), dando lugar a la reunificación alemana y a la creación de la actual Alemania. (Nota PB)

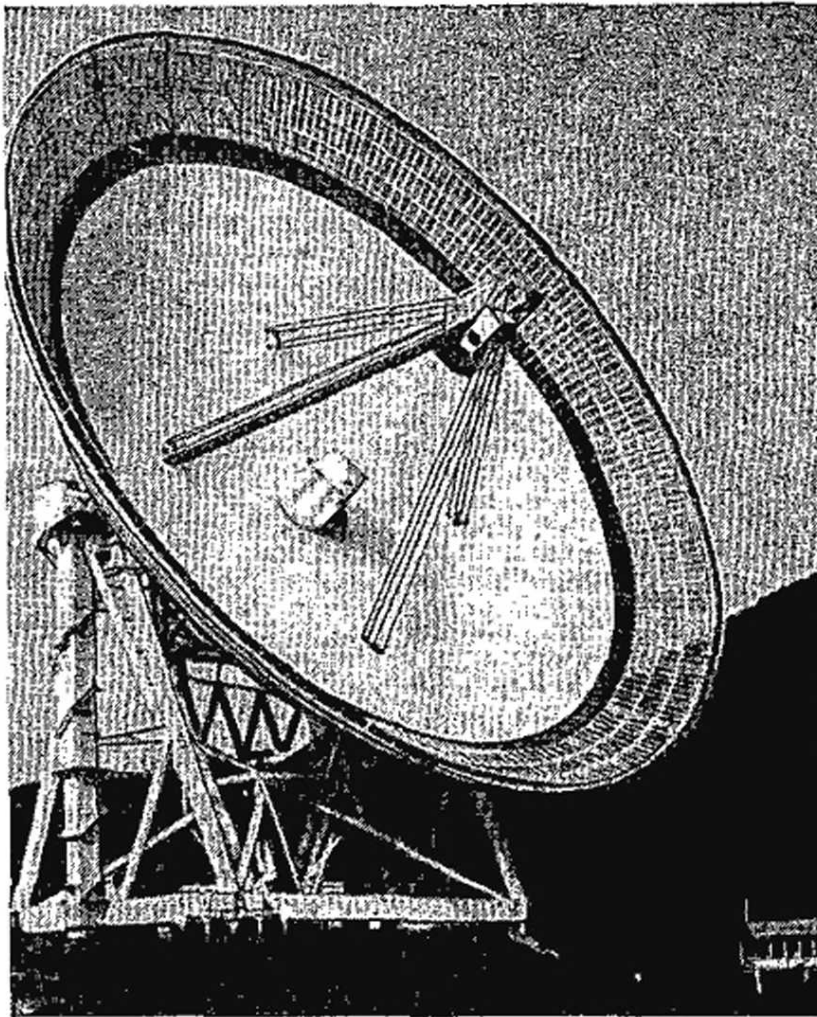


Figura 7.4

Las antenas de este tipo acusan una sensibilidad sorprendente. Al hacerlas girar de modo que el eje del espejo mire a la dirección que nos interesa, estamos en condiciones de captar los flujos de energía del orden de 10^{-28} W s/m^2 . ¿No es verdad que resulta fantástico?

La radioastronomía llevó a descubrimientos fundamentales en el campo de la física del Universo.

En la Luna y en algunos satélites se han instalado radiotelescopios. De este modo, dejan de ser un obstáculo para el observador la absorción y la reflexión de las ondas electromagnéticas por la atmósfera. Por ahora existen dos «ventanas» en el espectro electromagnético. Una de estas ventanas deja pasar la luz visible, y la

otra, la radiación radioelétrica dentro de los límites de las longitudes de onda desde 2 cm (15 000 MHz) hasta 30 m 10 (MHz).

En las observaciones radioastronómicas no influyen las condiciones meteorológicas. El «radiofirmamento» tiene un aspecto completamente distinto de aquel que admiramos por las noches.

La radioemisión proveniente del espacio cósmico no es muy intensa, y su estudio se hizo posible tan sólo debido a los éxitos fenomenales de la radiotecnica. Basta con señalar que la radioemisión del Sol es millones de veces menor por su potencia que la emisión en el diapason luminoso.

A pesar de todas estas circunstancias, sin la radioespectroscopía no habríamos podido establecer muchos datos importantes. Por ejemplo, un papel importante en la comprensión de los procesos que tienen lugar en el Universo lo desempeña la medición de la radiación residual de las explosiones de las supernovas.

El hidrógeno neutro irradia una onda fuerte de 21 cm de longitud. La medición de la intensidad de esta radioemisión dio la posibilidad de esbozar el cuadro de distribución en el cosmos del gas interestelar y seguir el movimiento de las nubes de gas.

Se ha hallado un gran número de radiogalaxias y cuásares que se encuentran a unas distancias tan grandes de nosotros que éstas representan el límite de lo accesible para la observación. Es suficiente indicar que el corrimiento hacia el rojo de la radiación que llega de estos manantiales alcanza el valor de $-3,5$. El corrimiento hacia el rojo se define como la relación de la diferencia de las longitudes de onda recibida al valor de la longitud de onda emitida. De este modo, resulta que la diferencia es 3,5 veces mayor que la longitud de onda de la radiación.

Los radiométodos permitieron echar un vistazo a la periferia misma del Universo. Las investigaciones radioastronómicas dieron la posibilidad de comprender la naturaleza de los rayos cósmicos que llegan hacia nosotros de las profundidades del cielo.

Rayos cósmicos

Las investigaciones que en el día de hoy pueden efectuarse cómodamente en el cosmos demuestran que sobre nuestra Tierra incide sin cesar un flujo de partículas

nucleares que se mueven con velocidades iguales prácticamente a la de la luz. Su energía se encuentra en los límites de 10^8 a 10^{20} eV. ¡La energía de 10^{20} supera en ocho órdenes las energías que pueden crearse en los más potentes aceleradores!

Los rayos cósmicos primarios constan, en su mayoría, de protones (cerca del 90%); además de los protones en estos rayos están presentes también núcleos más pesados. Se sobreentiende, que en las colisiones con otras moléculas, átomos y núcleos los rayos cósmicos son capaces de crear partículas elementales de todos los tipos. Pero a los astrofísicos les interesa la radiación primaria. ¿Cómo se engendrarán los flujos de partículas que poseen tanta energía? ¿Dónde se encuentran las fuentes de estas partículas?

Hace un tiempo bastante grande fue demostrado que no es el Sol el que representa la fuente principal de la radiación cósmica. Pero siendo así, tampoco se puede cargar la responsabilidad por la creación de los rayos cósmicos sobre otras estrellas, por cuanto éstas, de principio, no se diferencian en nada del Sol. ¿Quién, entonces, es el responsable?

En nuestra Galaxia existe la nebulosa del Cangrejo que se formó como resultado de la explosión de una estrella en el año 1054 (no se debe olvidar que los científicos observan el cielo estelar varios miles años). La experiencia demuestra que esta nebulosa es una fuente tanto de ondas radioeléctricas como de partículas cósmicas. Dicha coincidencia nos da la respuesta al enigma de la enorme energía de los protones cósmicos. Basta con admitir que el campo electromagnético formado a resultas de la explosión de la estrella hace las veces de sincrotrón, para comprender que, en este caso, la enorme energía que está acumulándose por la partícula, la cual, en el transcurso de miles de años de luz, viaja, siguiendo una espiral, alrededor de las líneas de inducción magnética, puede alcanzar las cifras fantásticas que hemos citado.

Los cálculos demuestran que la partícula cósmica, al recorrer la distancia igual al diámetro de nuestra Galaxia, no puede acumular más que 10^{19} eV de energía. Por lo visto, las partículas con energía máxima llegan hacia nosotros de otras galaxias.

Evidentemente, no hay ninguna necesidad de suponer que con sólo las explosiones de las estrellas dan lugar a la aparición de partículas cósmicas. Toda fuente estelar de ondas radioeléctricas puede ser simultáneamente una fuente de rayos cósmicos.

La existencia de rayos cósmicos fue descubierta ya a principios de nuestro siglo. El investigador que instalaba electroskopios en un globo aerostático advertía que, a grandes alturas, éstos se descargaban con mucha mayor rapidez comparando con el caso cuando este antiguo instrumento, que tantos servicios prestó a los físicos, se disponía al nivel del mar.

Quedó claro que la aproximación de las laminillas del electroskopio que siempre ocurría no era consecuencia de la imperfección del instrumento, sino se debía a la acción de ciertos factores externos.

En los años 20 los físicos comprendían ya que la ionización del aire que quitaba la carga del electroskopio era indudablemente de origen extraterrestre. Millikan fue el primero quien anunció firmemente esta hipótesis y dio al fenómeno su nombre actual: radiación cósmica.

En 1927, el científico soviético P. V. Skobeltsin, como primero, obtuvo la fotografía de las huellas de los rayos cósmicos en una cámara de ionización.

Por medio de procedimientos ordinarios que hemos expuesto anteriormente se determinó la energía de las partículas cósmicas. Esta resultó enorme.

Al estudiar la naturaleza de los rayos cósmicos, los físicos realizaron una serie de descubrimientos admirables. En particular, precisamente por esta vía fue demostrada la existencia del positrón. De la misma forma, también los mesones, que son partículas con una masa intermedia entre la del protón y la del electrón, fueron descubiertos por primera vez en los rayos cósmicos.

Las investigaciones de los rayos cósmicos siguen siendo una de las ocupaciones más interesantes de los físicos.

* * *

El carácter no consumado de la astrofísica hace difícil su exposición en un solo capítulo de un pequeño libro cuya finalidad consiste en introducir al lector en el círculo de los principales hechos e ideas de la ciencia física. Entre los problemas físicos que atañen al Universo elegí tan sólo varias cuestiones que, a mi parecer, revisten mayor interés.

* * *

Tabla de partículas elementales*

Partícula	Símbolo**	Masa		Tiempo de vida, τ	Espín, $\hbar$	Cargas			Extrañeza, S	Esquema pre- valiente de desintegración
		MeV	m_e			Eléctrica, e	Leptónica	Bariónica		
Leptones	Fotón	0	0	∞	1	0	0	0		
	Neutrino	0	0	∞	1/2	0	+1	0		
	Electrón	0,511	1	∞	1/2	-1	+1	0		
	Muon	105,66	206,77	$2,1 \cdot 10^{-6}$	1/2	-1	+1	0		$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$
Mesones	Mesones π	139,6	273,5	$2,55 \cdot 10^{-8}$	0	-1	0	0	0	$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$
		135,0	264,2	$2 \cdot 10^{-16}$	0	0	0	0	0	$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$
	Mesones K	493,8	966,3	$1,23 \cdot 10^{-8}$	0	-1	0	0	+1	$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$
		498,0	974,5	$K_L^0 1 \cdot 10^{-10}$ $K_S^0 6 \cdot 10^{-8}$	0	0	0	0	+1	$K_L^0 \rightarrow 2\pi$ $K_S^0 \rightarrow 3\pi$

Continuación

Partícula	Símbolo**	Masa		Tiempo de vida, τ	$\hbar$	Cargas			Extrañeza, s	Esquema pre- valiente de desintegración
		MeV	$m_0 c^2$			Eléctrica, e	Leptónica	Bariónica		
Protón	$\tilde{p}p$	938,26	1836,1	∞	$1/2$	+1	0	-1	0	$n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e$
Neutrón	$\tilde{n}n$	939,55	1838,6	$1 \cdot 10^8$	$1/2$	0	0	+1	0	$\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$
Hiperón Λ	$\Lambda^0 \tilde{\Lambda}^0$	1115,4	2182,8	$2,6 \cdot 10^{-10}$	$1/2$	0	0	+1	-1	$\Sigma^+ \rightarrow n + \pi^+$
Hiparones Σ	$\Sigma^+ \tilde{\Sigma}^-$	1189,4	2328	$0,8 \cdot 10^{-10}$	$1/2$	+1	0	+1	-1	$\Sigma^- \rightarrow n + \pi^-$
	$\Sigma^- \tilde{\Sigma}^+$	1197	2342	$1,6 \cdot 10^{-10}$	$1/2$	-1	0	+1	-1	$\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$
Hiparones Ξ	$\Xi^0 \tilde{\Xi}^0$	1192	2333	$< 10^{-14}$	$1/2$	0	0	+1	-1	$\Xi^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$
	$\Xi^- \tilde{\Xi}^+$	1321	2585	$1,7 \cdot 10^{-10}$	$1/2$	-1	0	+1	-2	$\Xi^0 \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0$
Hiparón Ω	$\Xi^0 \tilde{\Xi}^0$	1314	2572	$3 \cdot 10^{-10}$	$1/2$	0	0	+1	-2	$\Omega^- \rightarrow \Xi^0 + \pi^-$
	$\Omega^- \tilde{\Omega}^+$	1675	3278	$\sim 10^{-10}$	$3/2$	-1	0	+1	-3	$\Lambda^0 + K^-$

* Las antipartículas tienen los valores de la masa, el tiempo de vida y del espín idénticos a los de la partícula, y tienen opuestos por el signo, los valores de las cargas eléctrica, leptónica y bariónica.

** A la derecha se indican los símbolos de las antipartículas correspondientes.

