

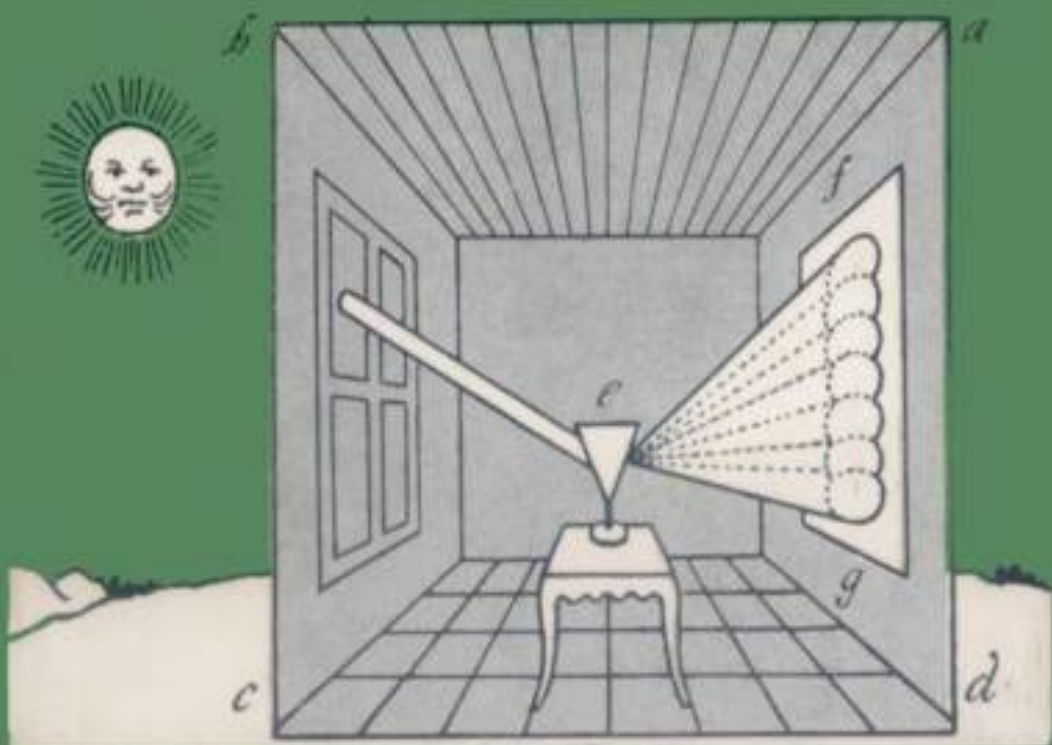
Física para Todos Libro 4

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 energéticamente 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 completamen-

te 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 fórmula 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 fuen-

tes 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.

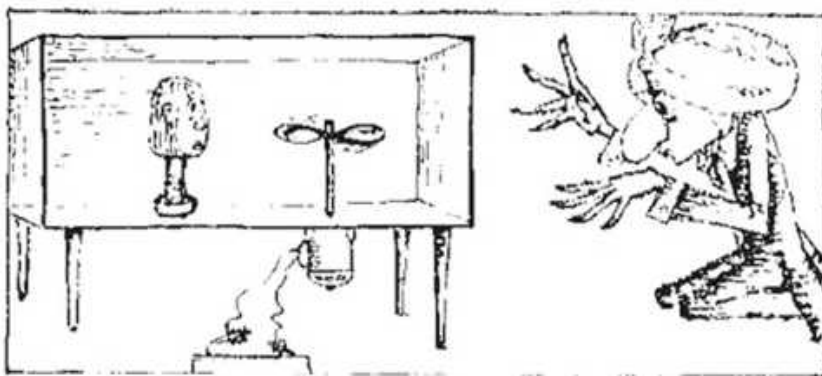


Figura 1.2

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 falla 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, Él 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 soplido 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 desli-