

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

PUBLICACIONES DE LA FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICOMATEMÁTICAS

DIRECTOR : INGENIERO VICENTE AÑÓN SUÁREZ

CONTRIBUCIÓN

AL

ESTUDIO DE LAS CIENCIAS

FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

SERIE MATEMÁTICOFÍSICA. — VOLUMEN V, ENTREGA 2ª (ÚLTIMA)

XVIII. E. BAVIOLA, Dualidad y determinismo

(TIRAJE ESPECIAL PARA EL AUTOR)



LA PLATA (REP. ARGENTINA)
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICOMATEMÁTICAS

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

(1931)

Interventor de la Universidad : D^r Federico Walker.

Interventores delegados ante las Facultades : D^r Manuel J. Argañaráz, Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación; Ing^o Vicente Añón Suárez, Facultad de Ciencias Físicomatemáticas; D^r José P. Pellegrini, Facultad de Ciencias Jurídicas y Sociales; D^r Abel Sánchez Díaz, Facultad de Química y Farmacia; Ing^o Agr^o Anibal L. Guastavino, Facultad de Agronomía; D^r Eduardo Coni Molina, Facultad de Medicina Veterinaria, D^r Lorenzo Galíndez, Escuela de Ciencias Médicas.

Directores : D^r Luis M. Torres, Museo; D^r Juan Hartmann, Observatorio Astronómico; Prof. Fernán Félix de Amador, Escuela Superior de Bellas Artes.

Secretario general : S^r Santiago M. Amaral.

Secretario de la Intervención : Ing^o Martín Solari.

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICOMATEMÁTICAS

(1931)

Interventor delegado ante la Facultad : Ing^o Vicente Añón Suárez.

Secretario general : D^r Alberto E. Sagastume Berra.

Institutos, departamentos y publicaciones

Director del Instituto de física : D^r Ramón G. Loyarte.

Jefe del Departamento de Electrotécnica : Ing^o Adolfo Garbet.

Comisión de publicaciones. — *Director* : Ing^o Vicente Añón Suárez; *vocales* : Ing^o Enrique Butty, Ing^o Adolfo Garbet y D^r Adolfo T. Williams.

XVIII

DUALIDAD Y DETERMINISMO

EL SISTEMA DOBLE DE CONCEPTOS USADOS EN LA FÍSICA Y LA LEY DE CAUSA Y EFECTO

Por el doctor ENRIQUE GAVIOLA

Encargado de Investigaciones del Instituto de Física

ABSTRACT

Duality and the causal law. — The possibility of a causal space-time description of experience has recently been often denied, and emphasis has been laid upon the purely statistical validity of quantum-theoretical relations. This denial of a possible causal space-time description has aroused suspicions and diffidence in regard to the newer physics. The purpose of this note is to show that there is no need for the above denial and that we have not only one possibility of a causal space-time description of experience, but actually two of them. This superabundance of possibilities of description is the very reason, as we shall see presently, why some relations can have only statistical validity.

It is well known that light can be described either as a propagation of spherical electromagnetic waves or as the linear translation of corpuscles of energy and momentum (light-quanta); that electrons appear sometimes as point-charges and at other times as matter-waves; that the atom itself can be pictured, in the case of hydrogen, either as a planetary system of attracting particles (Bohr's theory) or as a system of stationary waves (De Broglie, Schrödinger). Furthermore, it is easy to show, that the process of emission of light can be described either as the sudden spontaneous ejection of a light corpuscle, a finite time (*Verweilzeit*) after the excitation, or as the continuous radiation of a set of spherical damped waves beginning at the very moment of excitation, the inverse of the damping coefficient of which is equal to the extinction-time (*Abklingzeit*); that absorption can be interpreted either as the sudden jump of the molecule from one stationary state to another owing to the impact of a high quantum, or as a classical damped resonance of the molecule with the on-coming wave; that optical resonance appears either as sudden absorption with subsequent sudden emission after a time determined by a coefficient of « spontaneous » transition or as continuous scattering (dispersion), in which the secondary radiation is coherent with the primary (Wood's experiment showing regular reflection of mercury vapour for $\lambda 2537$). Photo-effect and electron-collisions can also be described equally well from either viewpoint.

All of the examples given above show clearly that there are many physical phenomena which can be described in two ways, using either one of two essentially different systems of concepts and definitions. The two systems by no means complement each other: *they exclude each other*. Every attempt to superpose the two descriptions in order to reach a unified one leads necessarily to breaks in the laws of conservation of energy and momentum, as has been shown by the many unsuccessful attempts to describe light as energy-momentum centres moving along the Poynting's vector of a wave-field (virtual or probability waves).

Now it is easily seen that a space-time description is readily possible using either one of the two systems of concepts and definitions (waves or corpuscles: so long as we keep inside of one of them, and that in this case there is possibility of predicting the future of a physical aggregate, which is limited only in the case of a corpuscular description by the principle of indetermination of Heisenberg and Bohr. The classical claim of causality can be maintained in each system. In the corpuscular system we must realise that it is impossible to determine all of the initial conditions of a physical aggregate beyond a certain degree of accuracy. This limitation is unnecessary in a wave-description, since the principle of indetermination is superfluous in this case. The classical claim of causality is met here without restriction.

The causal space-time description of the whole of physics remains for the present only a programme in spite of the dual possibility, owing to the fact that certain phenomena, like interference, can be described satisfactorily as yet from only one point of view. In an all-embracing quantum theory, therefore, it is necessary at present to make use of both systems of concepts at the same time and to jump from one to the other according to the exigencies of the case. At the instant of the jump, every possibility of a space-time description disappears, and the magnitudes calculated in one system can have only statistical validity in the other. This is the deeper reason for the purely statistical validity of some relations of quantum mechanics.

This study leads to interesting results in regard to the constant h of Planck: shows that there are no stationary states in a wave description, the sense of the relation $E = h\nu$, the identity between resonance radiation and regular reflection and the need of renouncing to the indivisibility of the electron from the wave point of view.

DUALIDAD Y DETERMINISMO

EL SISTEMA DOBLE DE CONCEPTOS USADOS EN LA FÍSICA Y LA LEY DE CAUSA Y EFECTO

La ley de causa y efecto, que para Spinoza era una necesidad lógica (« de la causa sigue lógicamente el efecto »), para Kant una forma apriorística del pensamiento o sea una ley del pensar, para Hume una necesidad subjetiva producida por la costumbre, y para todos los hombres dedicados a las ciencias naturales e incontaminados de dudas filosóficas, era algo de validez indiscutida para el mundo físico, empieza a ser puesta en duda, más aún a ser negada rotundamente.

Ya Hume dudaba en 1740 de la validez « objetiva » de la ley de causa y efecto y sostenía que era perfectamente posible pensar que en la naturaleza los fenómenos se produjeran sin seguir ley alguna. La existencia y el desarrollo de las ciencias naturales y en especial el de las ciencias exactas demostraban, a juicio de autoridades como Planck, que el determinismo regía en la naturaleza, por lo menos en la naturaleza muerta. No era para él posible concebir la existencia de la ciencia misma sin admitir la ley de causa y efecto. Sin embargo, en la literatura científica de los últimos años se multiplican las opiniones que niegan la causalidad; por lo menos, lo que hasta ahora se entendía por causalidad. Así vemos, por ejemplo, que Bohr escribe (1) : « Con respecto a la luz, su propagación en espacio y tiempo es adecuadamente expresada por la teoría electromagnética. Sin embargo, la conservación de la energía y del impulso durante la interacción entre radiación y materia, como lo muestran el efecto fotoeléctrico y el efecto Compton, encuentra su expresión adecuada justamente en la idea de los cuantos de luz propuesta por Einstein. Esta situación parece indicar claramente la imposibilidad de una descripción causal en el tiempo y el espacio de los fenómenos lumino-

(1) N. Bonn, *Nature*, 121, página 580, 1928.

« sos ». Por su parte Heisenberg dice (1) : « Como todos los experimentos tienen que obedecer las leyes de la mecánica cuántica y con ello la relación $\delta p \delta q \sim h$, la mecánica cuántica prueba terminantemente la no validez de la ley de causa y efecto ».

He creído de importancia hacer un estudio sistemático de los resultados experimentales que han llevado a este estado de cosas y de los conceptos y definiciones usados para describirlos, en la esperanza de evitar confusiones y mal entendidos, bastante comunes al presente, cuyo origen es, como veremos, el uso contemporáneo de dos sistemas fundamentalmente distintos de conceptos y definiciones. Este estudio sistemático nos mostrará : cuándo y por qué las relaciones de la mecánica cuántica tienen sólo valor estadístico ; el significado de la constante h de Planck ; la no existencia de estados estacionarios en una descripción ondulatoria ; el sentido de la condición de frecuencia $E = h\nu$; la identidad esencial entre radiación de resonancia y reflexión selectiva (contrariamente a la opinión reinante) ; la necesidad de renunciar a la indivisibilidad del electrón en una descripción ondulatoria, y algunos otros resultados de menor importancia.

I. RESEÑA CRÍTICO-HISTÓRICA DE LOS HECHOS EXPERIMENTALES

La característica de la física que hoy ha dado en llamarse clásica era la división de los fenómenos en dos grupos o reinos prácticamente independientes y sin conexión entre ellos : los fenómenos de la radiación, que eran completa y exactamente explicados por medio de la teoría electromagnética de Maxwell-Hertz-Lorentz, y los fenómenos de la materia, para cuya explicación el *desideratum* era construir todo sobre la base de la hipótesis atómico-corpúscular de aquella. La teoría de los cuantos debe su origen al intento de establecer relaciones entre estos dos reinos : radiación y materia. Cuando en 1900 Planck trató de darle una base teórica a la fórmula que había obtenido empíricamente para la radiación de un cuerpo « negro », creyó verse obligado a postular que la energía de un oscilador lineal (por medio de los cuales representaba esquemáticamente a un átomo de un cuerpo sólido) podía cambiar sólo en cantidades discretas y proporcionales a la frecuencia del oscilador ; la constante de proporcionalidad siendo una constante universal. Esto implicaba que la radiación emitida por el oscilador tenía que serlo, en gene-

(1) W. HEISENBERG, *Z. Physik*, **43**, página 197, 1927.

ral, en forma interrumpida, pues el acto de emisión no podía comenzar antes de que el oscilador tuviese un cuanto entero de energía disponible. El estudio de la acción producida por radiación al caer sobre materia, ejemplificada en el efecto fotoeléctrico, condujo a Einstein en 1905 a postular la existencia de cuantos de luz (radiación de agujas) cuya existencia significa que la radiación no tan sólo es emitida en cantidades predeterminadas de energía, sino que estas cantidades no se diluyen al recorrer el espacio, sino que se mantienen concentradas en un volumen pequeño de modo a poder ser absorbidas íntegramente en un sólo acto elemental. Los fenómenos fotoquímicos requerían esta misma explicación. El acto de la absorción misma de toda radiación exige la preseneia de corpúsculos de luz, si se explica la absorción valiéndose del átomo de Bohr.

La teoría corpuscular de la materia obligaba pues a admitir una estructura corpuscular también de la radiación para poder explicar los fenómenos de interacción entre ambas.

Si la teoría corpuscular de la luz pudiera explicar también los fenómenos de interferencia, podría abandonarse, en buena parte, la teoría ondulatoria de Maxwell-Hertz-Lorentz, subsistiendo ésta tan sólo como extrapolación para el caso de cuantos de radiación pequeños (ondas Hertzianas) e infinitesimales (electrostática). ¿Puede explicarse la interferencia por medio de cuantos de luz? Trataré de demostrar en forma breve y general que esto no es posible.

Corpúsculos e interferencia. — La imposibilidad de explicar interferencias por medio de cuantos de luz es generalmente admitida. No faltan sin embargo físicos que de cuando en cuando vuelven sobre el problema y hasta pretenden haber explicado interferencias corpuscularmente. Tal vez no sea por ello superfluo el detenerse algo sobre este punto.

La característica común a todo fenómeno de interferencia es la superposición de dos o más haces de luz « coherentes » sobre una pantalla, en el plano focal de un instrumento óptico o sobre una placa fotográfica. Se sabe experimentalmente que, para que dos haces de luz sean coherentes deben provenir de la misma zona, más aún del mismo elemento de volumen de la fuente luminosa. Consideremos ahora un interferoscopio cualquiera, por ejemplo el de Jasmín indicado esquemáticamente en la figura 1.

La luz paralela proveniente de una fuente cualquiera es dividida por la placa semitransparente *a* en dos haces 1 y 2 que, después de ser reflejados en los espejos *b* y *d*, se reúnen más allá de la placa semitrans-

parente c , dando lugar a dos sistemas complementarios de interferencias.

Supongamos que la luz que llega a la primera placa semitransparente está formada por corpúsculos de luz que en lo sucesivo llamaremos fotones. En la placa a pueden suceder dos cosas : o los corpúsculos se dividen en dos partes que siguen cada uno de los caminos 1 y 2 respectivamente, o no se dividen y siguen en su integridad, ya sea el uno o el otro camino. En el primer caso, los fotones de uno de los haces de luz tendrían sólo una parte (por ejemplo la mitad) de la energía del fotón originario. Estos fotones no podrían entonces ser absorbidos por el gas que los emitió, si se trata de radiación de resonancia ; no podrían producir reacciones fotoquímicas que produciría la luz original, y deberían mostrar el

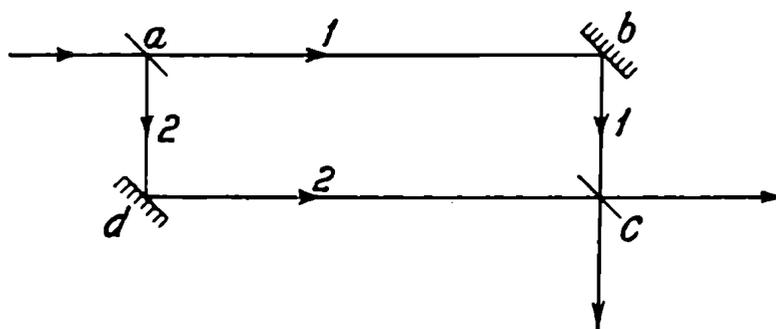


Fig. 1. — Interferoscopio

desdoblamiento de la energía en el efecto fotoeléctrico ; todo lo cual es contrario a la experiencia. Cada uno de los haces 1 y 2 se diferencian experimentalmente del haz original tan sólo en su intensidad total, pero no en su aptitud de producir cambios materiales. Se introdujo la hipótesis cuántica de la luz expresamente para conservar *toda* la energía y el impulso emitidos de una vez, concentrados en un pequeño elemento de volumen, y no tendría por lo tanto sentido renunciar a esa hipótesis para explicar la interferencia, pues renunciaríamos a la explicación de los fenómenos descritos con éxito por la hipótesis cuántica. Los fotones no se dividen, pues. En este segundo caso, si los fotones son independientes, los unos de los otros, las franjas de interferencia deberían subsistir si por medio de una pantalla obstruimos uno de los dos haces 1 y 2. La experiencia muestra lo contrario, luego los corpúsculos no pueden ser independientes.

Supongamos entonces que los fotones se influyen los unos a los otros por medio de atracciones, repulsiones o de una fuerza cualquiera, cuya naturaleza no necesitamos precisar. Para que dos fotones se influyeran en sus trayectorias después de pasar c de modo a producir in-

terferencias, es necesario que lleguen a c más o menos simultáneamente, habiendo seguido ambos caminos distintos entre a y c . Si la influencia mutua no dependiera de la simultaneidad de la llegada, o dicho en otras palabras, de la distancia entre los fotones, llegaríamos en seguida a conclusiones absurdas. Pero se puede impedir la llegada simultánea de fotones disminuyendo la intensidad de la luz primaria hasta que, por ejemplo, transcurran segundos y hasta minutos entre la llegada de dos fotones sucesivos, en promedio. En este caso las interferencias deberían desaparecer. En general, el poder de interferencia, la coherencia, debería depender de la intensidad de luz empleada. Ahora bien, se han hecho experiencias de interferencia con intensidades tan pequeñas, que la probabilidad de la llegada simultánea de dos fotones es infinitésima ⁽¹⁾ con el resultado de que la interferencia subsiste. Esta experiencia es repetida en todo espectrógrafo cuando se trata de fotografiar líneas tan débiles que necesitan varias horas de exposición.

Es, además, un hecho experimental bien establecido el que la coherencia no depende de la intensidad. La acción mútua no explica, pues, la interferencia; a menos que admitamos que los fotones son emitidos a pares por un mismo átomo o por átomos vecinos y que estos pares se mantienen juntos hasta llegar a la placa a , separándose entre a y c para juntarse después de c , dando origen, al hacerlo, a interferencias. Pero si eso fuese cierto, la luz de uno de los haces parciales, donde los pares ya no existen, sería diferente a la luz del haz originario e incapaz a su vez de ser dividida en dos nuevos haces que, al superponerse, produzcan interferencias; y, en cambio, sabemos que el haz parcial cualitativamente no se diferencia en nada del haz primario. Si en lugar de pares originarios postuláramos grupos de un número finito cualquiera de fotones, la situación no mejoraría, pues podríamos dividir sucesivamente por placas semitransparentes al haz de luz, tantas veces cuantas fuese necesario para que los grupos dejaran de existir. La interacción entre fotones no puede pues explicar la interferencia. ¿Qué otra posibilidad queda? Se ha ensayado explicar la interferencia por medio de la interacción entre cada uno de los fotones y el aparato usado para producirla. Así, por un ejemplo, Duane ⁽²⁾ consiguió describir la interferencia producida por un espejo reticulado de los usados comúnmente en los espectrógrafos, suponiendo que el impulso transmitido por el fotón al espejo, al ser reflejado, tiene tan sólo valores discretos cuantificados. Un solo corpúscu-

⁽¹⁾ R. GANS Y PEREYRA MIGUEZ. *Estas Contribuciones*, 1, página 355, 1916.

⁽²⁾ DUANE, *Proc. Nac. Acad. Sc.*, 11, página 175, 1925.

lo de luz, de acuerdo a esta explicación, independientemente de todos los demás y sin dividirse o fraccionarse, sigue después de la reflexión, gracias a la transmisión cuántica del impulso, un camino bien determinado distinto al que seguirá en general otro fotón, pues puede haber entrega de uno, dos, tres, etc., cuantos de impulso; y todos estos caminos no estarán uniformemente distribuidos, sino que darán origen a las líneas o franjas de interferencia. Esta teoría no explica, por supuesto, la influencia de las dimensiones de la superficie rayada de la red sobre la definición obtenida. Más aún, por medio de la cuantificación del impulso no puede explicarse las interferencias en el caso de la figura 1. En efecto, si obstruimos uno de los dos haces parciales, las interferencias

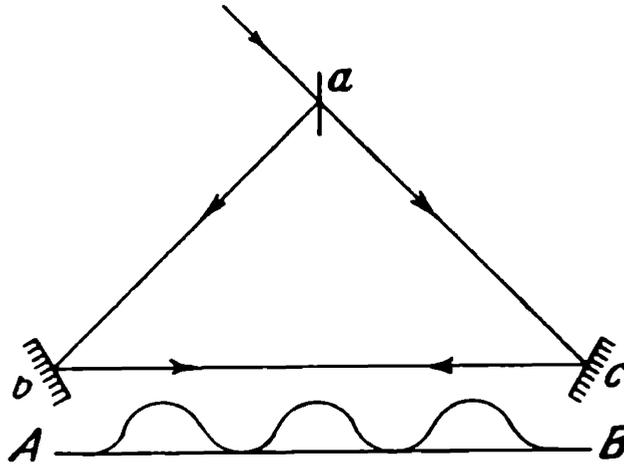


Fig. 2. — Ondas estacionarias

deberán subsistir de acuerdo a la hipótesis de Duane. La hipótesis del impulso cuantificado no explica pues tampoco la interferencia, pues no tiene en cuenta la necesidad de dividir un haz en dos o más haces coherentes, requisito indispensable como vimos más arriba. Pero los fotones tropiezan con un inconveniente más grave aún. Imaginémos el caso de ondas estacionarias producidas por dos haces que marchan al encuentro uno del otro, tal como está esquemáticamente indicado en la figura 2.

En este caso, las zonas iluminadas están separadas entre ellas, y de la fuente de luz, por zonas oscuras. La elongación de la onda resultante está dada por

$$y = 2a \cos 2\pi \frac{x}{\lambda} \sin 2\pi \frac{t}{T}$$

Para $x = \frac{1}{4}\lambda, \frac{3}{4}\lambda, \dots$, resulta $y = 0$ para cualquier valor de t , lo cual significa que en esas zonas nunca se puede encontrar fotones. Ahora bien,

¿cómo llegan los fotones a las zonas de máxima de y sin poder pasar a través de las zonas oscuras? Esta dificultad no existe tan sólo en el caso de las ondas estacionarias; en casi todos los casos de interferencia se presentan zonas iluminadas separadas de las fuentes de luz por zonas oscuras cerradas. Esta es, pues, una dificultad fundamental para toda teoría corpuscular de la luz; y ha obligado a los físicos que sostienen la realidad de los fotones a renunciar a la hipótesis de su existencia continuada en el tiempo y el espacio.

El problema del pasaje de la energía a través de las zonas oscuras de interferencia, ya preocupó a algunos físicos hace treinta años, pues creían que la teoría ondulatoria no podía explicarlo, pero sin razón. En la teoría electromagnética de la luz se disponía de dos clases de energía: una eléctrica (energía del campo eléctrico), que es la que actúa sobre nuestros ojos y sobre la placa fotográfica; y otra magnética que no tiene tal acción. Se dispone, pues, de una energía « visible » y de una « invisible », transformables la una en la otra en forma continua y total. En las zonas oscuras de nuestra figura 2, donde la energía eléctrica es un mínimo, la energía magnética es un máximo, de modo que la suma de las dos energías es constante a lo largo de la recta A-B. La energía se transforma, pues, pendularmente, por así decir, en el caso de las ondas estacionarias, de eléctrica en magnética y viceversa.

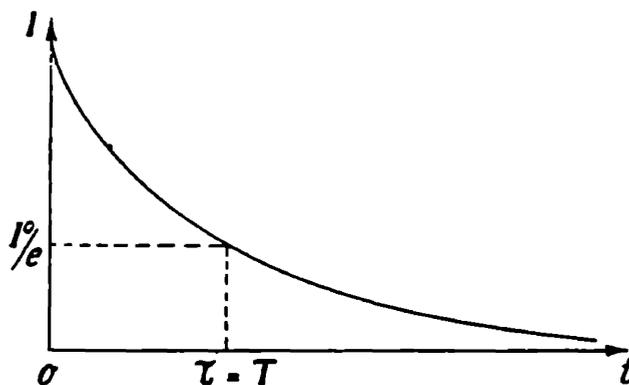
Pudiera pensarse que si complementamos a los fotones « visibles » con otros « invisibles », transformables los unos en los otros en forma continua llegaríamos a poder explicar la interferencia por medio de corpúsculos. Pero no es así, pues como vimos anteriormente, es necesario admitir la subdivisión del corpúsculo, con lo que se renuncia a la explicación del efecto fotoeléctrico, razón de ser de los mismos.

Resumiendo, podemos concluir: la explicación de la interferencia por medio de fotones exigiría la subdivisión de los mismos; pero esto es contrario a su razón de ser, pues los fotones fueron creados para mantener la energía concentrada e individida; luego es imposible explicar interferencias por medio de fotones únicamente.

Dualidad del proceso de emisión. — Hemos visto que el proceso de absorción de la luz por la materia parece exigir la existencia de fotones, a fin de mantener la energía concentrada y disponible para ser absorbida toda de una vez y en un lugar determinado del espacio. ¿Qué nos dice el proceso de emisión de la luz? ¿Es la energía de excitación de un átomo emitida continuamente y en forma de ondulación durante un tiempo finito y medible, que llamaremos tiempo de extinción (*Abklingzeit*), o lo

es abruptamente después de haber residido en el átomo un cierto tiempo finito y medible que llamaremos tiempo de estada (*Verweilzeit*)? ¿Tarda la energía tiempo en ser emitida o lo es instantáneamente?

Las conocidas experiencias de Wien y sus discípulos, perfeccionadas recientemente por Port (1), en las cuales se observa el decrecimiento de la intensidad de la luz emitida por rayos canales al entrar a un alto vacío muestran que dicho decrecimiento es exponencial y que el tiempo medio de emisión (*Leuchtdauer*), (tiempo que tarda un grupo de átomos o moléculas para que su luminosidad decrezca a $\frac{1}{e}$ del valor que tenía al dejar el canal y entrar al alto vacío) es del orden de magnitud de 10^{-8} de



acuerdo a lo previsto por la teoría electromagnética. Ahora bien, la curva de emisión del rayo canal, indicada en la figura 3, puede ser interpretada de dos maneras esencialmente diferentes. Por una parte, podemos interpretar el proceso como análogo a la descomposición radioactiva, decir: el proceso de emisión de cada átomo es instantáneo, pero la energía de excitación de un átomo reside un cierto tiempo en el mismo, teniendo una cierta probabilidad de ser emitida en un instante dado. La probabilidad de que en cierto instante dt sea emitida una intensidad dI será proporcional al número de átomos que en ese instante conservan todavía su energía de excitación, número que es simplemente proporcional al valor de I en ese instante. Por lo tanto

$$dI = -CI dt \quad (1)$$

ecuación inmediatamente integrable, que conduce a

$$I = I_0 e^{-Ct} \quad (2)$$

La ecuación (2) representa perfectamente a la curva experimental de la figura 3, siendo I_0 la intensidad inicial y la constante C la inversa del tiempo medio de estada de la energía de excitación en el átomo, que llamaremos τ .

La hipótesis de la emisión instantánea o cuántica está, pues, de acuerdo con los resultados experimentales de Wien-Port.

Pero la curva de la figura 3 puede ser interpretada, por otra parte, del modo siguiente: cada átomo comienza a emitir su energía de excitación en el instante mismo de ser excitado, y la emite paulatinamente en forma de oscilación amortiguada, tal como lo hace un oscilador de Hertz. Como es bien sabido, la ecuación diferencial de una oscilación amortiguada es:

$$\ddot{y} + 2b\dot{y} + (\nu^2 + b^2)y = 0,$$

y su solución está dada por

$$y = Ae^{-Ct} \sin(\nu t + \alpha)$$

(véase Abraham I, pág. 281). La amplitud de la oscilación decrece exponencialmente. Si calculamos la energía del oscilador en un momento dado, obtendremos

$$W = W_0 e^{-Ct}$$

y la intensidad de la radiación emitida por el mismo, proporcional simplemente a la energía, será

$$I = I_0 e^{-Ct}$$

fórmula exactamente igual a la fórmula (2). Como cualquier parte de una curva exponencial es una curva exponencial, y la suma de curvas exponenciales de igual amortiguamiento da una curva exponencial con la misma constante de amortiguamiento, tenemos, pues, que nuestra curva experimental de la figura 3 puede ser interpretada como la suma de las radiaciones emitidas por cada uno de los átomos excitados que pasan el canal, emitiendo cada uno de ellos su energía paulatina y exponencialmente. La inversa de la constante de amortiguamiento C , común a todos los átomos, será llamada en lo sucesivo tiempo de extinción y designado por la letra T .

Las experiencias de Wien-Port permiten, pues, una doble interpretación; y no es posible decidir, basándose en ellas, si la energía de excitación es emitida cuánticamente (instantáneamente) o en forma continua durante todo el tiempo de estada y tiempo de extinción. Tiempo de estada y tiempo de extinción aparecen aquí como equivalentes. Para tratar de decidir entre ambos, tenemos que recurrir a otra clase de experimentos.

Experiencias favorables al tiempo de estada. — Las experiencias de Franck y Hertz, en las cuales átomos o moléculas de un gas son excitados por medio de choques con electrones provistos de cierta energía cinética, igual o mayor que la energía de excitación, son bien conocidas y no necesitan ser descritas aquí. Ahora bien, bombardeando un gas con electrones homogéneos (de igual energía cinética), no se observa tan sólo la emisión de líneas cuya energía de excitación es igual o menor que la de los electrones, sino también la de líneas para cuya emisión se requiere una cantidad casi doble de la susodicha energía. A este hecho se lo explica admitiendo que es posible acumular en un átomo la energía de dos choques sucesivos de electrones. Para que esto suceda, es necesario que la energía entregada por el primer choque permanezca en el átomo un cierto tiempo, hasta que el segundo choque se produzca. Este tiempo no puede ser infinitamente pequeño, pues la probabilidad de que dos electrones choquen con un átomo en el mismo instante es nula. Estas experiencias parecen exigir, pues, la existencia de un tiempo finito de estada. Al mismo resultado conducen las experiencias de Füchtbauer-Wood-Gaviola (¹) sobre excitación escalonada de las líneas del mercurio. En ellas se consigue la emisión de líneas espectrales que provienen de niveles que no pueden ser alcanzados por un acto único de absorción. Se explica esto suponiendo que la energía entregada al átomo por el choque del primer fotón permanece en aquél un tiempo finito, hasta que el segundo fotón choca con el mismo átomo. Es posible también combinar ambos métodos, bombardeando a la vez con electrones y con fotones de energía determinada, obteniendo la emisión de líneas que no serían emitidas con el bombardeo de uno de los dos agentes exclusivamente. Parece, pues, necesario admitir que la energía entregada por el electrón, por ejemplo, puede permanecer íntegra en el átomo hasta la llegada de un fotón absorbible. Todas estas experiencias, y muchas otras que no es necesario enumerar, parecen indicar que el tiempo de emisión revelado por

¹, C. FÜCHTBAUER, *Phys. Zeits.*, **21**, página 635, 1910; R. W. WOOD, *Phil. Mag.*, **50**, página 774, 1925; E. GAVIOLA, *Phil. Mag.*, **6**, páginas 1154-1167, 1928.

los rayos canales de Wien, es en realidad tiempo de estada, y hacen innecesaria la hipótesis de la existencia de un tiempo de extinción.

Experiencias favorables al tiempo de extinción. — Como es sabido, se llama longitud de coherencia a la diferencia máxima de fase que puede dárseles a dos haces de luz capaces de producir interferencias, sin que éstas desaparezcan. Esta longitud de coherencia es, pues, una cierta medida del largo del tren de ondas armónicas ininterrumpidas que llegan de un átomo. La longitud del tren de ondas tiene que ser siempre mayor que la longitud de coherencia. Esta longitud de coherencia es fácilmente determinable por medio de un interferómetro cualquiera. Ahora bien, si admitimos que la velocidad de la luz es constante, no tan sólo para « el centro de gravedad » de un tren de ondas, sino también para cada una de sus partes, el tiempo que dure el acto de emisión será igual a la longitud del tren de ondas dividida por la velocidad de la luz. A este tiempo lo hemos llamado tiempo de extinción. La longitud de coherencia, dividida por la velocidad de la luz será pues el tiempo mínimo de la extinción. Es sabido que la longitud de coherencia de la luz, común oscila entre unos 50 y 100 centímetros, de modo que el tiempo mínimo de extinción aparecería ser el orden de la magnitud de $\frac{1}{6}$ a $\frac{1}{3}$ de 10^{-10} segundos. Ésta es una buena fracción del tiempo total de emisión determinada por las experiencias de Wien. Como esta longitud de coherencia pudiera estar influenciada por la interacción entre átomos cercanos o por la excitación frecuente y sucesiva de un mismo átomo, Rupp (1) hizo una serie de investigaciones sobre la longitud mínima de coherencia de la luz emitida por rayos canales, en los cuales los átomos pueden emitir sin ser disturbados por influencias exteriores. Rupp obtuvo, con un interferómetro análogo al de Michelson, que el tiempo mínimo de extinción era, por ejemplo para la línea 5461 del mercurio, $2 \cdot 10^{-9}$ seg. El tiempo de emisión de esta línea es, según Wien, de $2 \cdot 10^{-8}$ segundos. Las experiencias de Rupp muestran, pues, que existe un tiempo finito de extinción del orden de magnitud del tiempo total de emisión y Rupp concluye : « Un tiempo de estada no ha podido ser demostrado a base de las observaciones de interferencia, sin que con ello quede decidida la cuestión sobre la coexistencia de dos tiempos : de estada y de extinción ».

A fin de decidir si un átomo de un rayo canal que penetra en el vacío emite su energía de excitación instantáneamente, es decir, cuando llega a

(1) E. Rupp, *Ann. d. Physik*, **79**, página 1, 1926.

un cierto lugar de su recorrido, de acuerdo a la hipótesis cuántico-estadística, o si, al contrario, tarda un cierto tiempo en emitir la luz, tiempo durante el cual recorre una cierta distancia en el tubo, Einstein ⁽¹⁾ propuso una experiencia ingeniosa que fué ejecutada por Rupp ⁽²⁾. Se trata de decidir si un átomo es capaz de emitir luz coherente en instantes distintos y en lugares distintos. El dispositivo experimental usado está indicado en la figura 4.

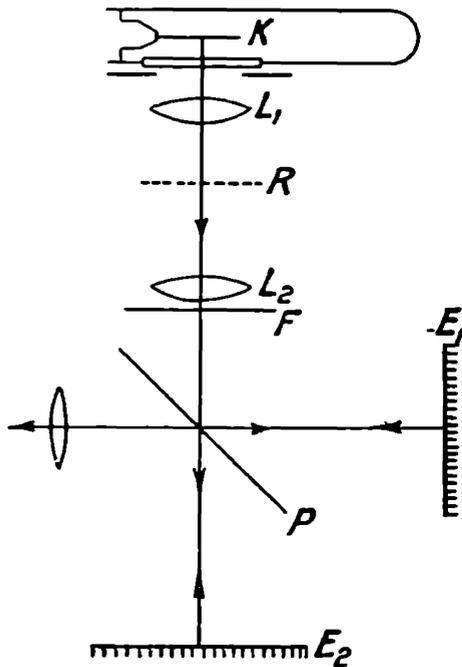


Fig. 4. — Dispositivo interferométrico Einstein-Rupp

El dispositivo experimental usado está indicado en la figura 4.

La lente L_1 forma una imagen del rayo canal K sobre la red R , la que a su vez se encuentra en el plano focal de la lente L_2 . La red R está formada por bastones verticales (el rayo canal es horizontal), cuyo espesor es igual al espacio entre dos de ellos. Si un átomo emitiera toda su energía luminosa en un punto dado de su recorrido, la imagen de ese punto caería o sobre uno de los bastones de la red R , o entre dos de ellos, o parte sobre uno y parte sobre el otro. De todos modos la luz que pase la red R será un tren no interrumpido de ondas. En cambio si el átomo emite luz durante su recorrido en el tubo K , la luz emitida

irá llegando *sucesivamente* a la red R y la imagen del átomo luminoso recorrerá la red R uniformemente de un extremo al otro. La luz que pase la red estará pues formada por grupos de ondas separados en el tiempo y el espacio. La placa semitransparente P del interferómetro dividirá a la luz que pase la red R , una vez hecha paralela por la lente L_2 , en dos haces coherentes, que, después de ser reflejados por los espejos E_1 y E_2 , volverán a superponerse, pero con una cierta diferencia de fase, regulable por medio de los espejos. Ahora bien, si la luz está formada por un sólo tren ininterrumpido de ondas (caso de la emisión cuántica), al aumentar paulatinamente la diferencia de fase decrecerá lenta y monótonamente la claridad de las franjas de interferencia hasta desaparecer cuando se llegue a la longitud de coherencia; si la luz en cambio está formada por

(¹) A. EINSTEIN, *Berl. Ber.*, página 334, 1926.

(²) E. RUPP, *op. cit.*, página 341.

grupos de ondas espaciados entre ellos por una distancia igual a su profundidad, al aumentar paulatinamente la diferencia de fase, partiendo de cero, las interferencias desaparecerán cuando el grupo de ondas de uno de los dos haces caiga sobre el espacio obscuro comprendido entre dos grupos sucesivos del otro haz, para volver a aparecer cuando nuestro grupo de ondas caiga sobre el grupo siguiente del otro haz. Esto se repetirá un cierto número de veces al seguir aumentando la diferencia de fase, pero cada vez reaparecerán las franjas con una nitidez menor, hasta desaparecer cuando llegemos a la longitud de coherencia.

La experiencia dió como resultado que las interferencias aparecían y desaparecían alternativamente, mostrando que « luz capaz de producir interferencias es emitida por una partícula en lugares distintos y en tiempos distintos ». Esta experiencia muestra pues que la luz es emitida como si se tratara de una oscilación amortiguada, siendo el tiempo de extinción finito y del orden de magnitud del tiempo de emisión. Las experiencias no dejan entrever ninguna influencia que pudiera ser producida por la emisión cuántica de la luz. El tiempo de estada, si existe, no se pone de manifiesto en forma alguna. Sin embargo, estos resultados no excluyen la posibilidad de la existencia de un tiempo de estada, que se sumaría al tiempo de extinción para dar el tiempo de emisión. Pero experiencias hechas por Wood y otros, hace ya varios años, y que a mi juicio no han sido hasta hoy correctamente interpretadas, excluyen esta posibilidad.

Wood (¹), el descubridor de la radiación de resonancia del vapor de mercurio, observó que, al iluminar un recipiente de cuarzo con la línea 2537 (llamada línea de resonancia), de un arco de mercurio y al aumentar paulatinamente la densidad de dicho vapor aumentando la temperatura del recipiente, el cual contiene una gota de mercurio líquido, la radiación de resonancia, que es emitida difusamente y en todas las direcciones del espacio, se concentraba alrededor de una cierta dirección hasta convertirse en reflexión selectiva de la luz incidente. Tenemos, pues, el caso de un gas (transparente para la luz blanca) que refleja una cierta radiación, como si se tratara de un espejo. Característico es el hecho de que el poder reflectivo se limita a la línea 2537 y a su cercanía inmediata únicamente. Ahora bien, la reflexión por parte de una superficie metálica pulida se explica ondulatoriamente por medio de la interferencia de los trenes secundarios de ondas emitidos por cada una de las partículas iluminadas por la luz incidente. Todos estos trenes secunda-

(¹) R. W. Wood, *Phil. Mag.*, **23**, página 689, 1912.

rios de ondas tienen que ser pues coherentes. Si tratamos de explicar la reflexión selectiva del vapor de mercurio cuando su densidad es tal que la luz primaria es absorbida en una profundidad menor que un cuarto de longitud de onda, desde un punto de vista ondulatorio, tenemos que admitir : 1° que *cada átomo* iluminado por la radiación incidente emite una radiación secundaria de la misma frecuencia y 2° que todas estas radiaciones secundarias son coherentes. Para que las radiaciones secundarias emitidas por cada uno de los átomos iluminados sean coherentes es necesario que la relación de fase entre la luz incidente y la secundaria sea común a todos los trenes de onda secundarios. Esto implica la imposibilidad de la existencia de un tiempo de estada de la energía absorbida regulado y determinado por una ley estadística (fórmula 1). Todos los átomos que absorben energía tienen que empezar a emitirla de inmediato (salvo un retardo de una media longitud de onda) para que haya coherencia, de modo que el tiempo de estada tiene que ser cero. El tiempo de emisión tiene que ser pues en su totalidad tiempo de extinción. Se podría tratar de explicar la reflexión selectiva desde un punto de vista cuántico en la siguiente forma : el diámetro de un fotón es igual a la longitud de onda, y la reflexión selectiva se produce cuando la distancia media entre los átomos es menor que un cuarto de onda. El fotón, al caer sobre la superficie del gas choca, pues, por lo menos con diez y seis átomos de mercurio a la vez. Como esos átomos se encuentran en la inmediata vecindad de la superficie interior del recipiente que es plana y pulida, podría esperarse una especie de reflexión elástica del fotón. La reflexión elástica de una pelota en una pared lisa, se produce a pesar de que la pared no es « lisa » microscópicamente, sino que está formada por gran cantidad de corpúsculos ordenados más o menos regularmente. Este mismo caso se presenta en el caso del mercurio. La reflexión regular quedaría pues explicada ; pero no así el hecho de que el fotón no sea absorbido por uno de los diez y seis átomos y reemitido después de un tiempo de estada « casual » en una dirección cualquiera.

Todas estas experiencias, y muchas otras que no es necesario enumerar, parecen indicar que el tiempo de emisión revelado por los rayos canales de Wien es en realidad tiempo de extinción y hacen innecesaria la hipótesis de la existencia de un tiempo de estada. Más aún, la explicación de la reflexión selectiva hace la existencia de un tiempo de estada imposible.

Tiempo de emisión = tiempo de estada + tiempo de extinción. — En varias ocasiones se ha tratado de resolver el dilema suponiendo que tan-

to T como como τ existen, que ambos son del mismo orden de magnitud y que el tiempo de emisión t es simplemente.

$$t = T + \tau.$$

Esta hipótesis fué propuesta, entre otros, por el físico español Palacios (1). Ahora bien, Wien (2) ha mostrado, y es fácil verificarlo, que si T y τ fuesen del mismo orden de magnitud, la curva que da la intensidad de la emisión de los rayos canales al entrar al vacío (fig. 3) debería presentar un máximo después de pasar el canal, lo que está en contradicción con los hechos experimentales (Port, *loc. cit.*). Más aún, el mismo Wien ha mostrado que la hipótesis de Palacios haría esperar que la intensidad total del rayo canal debería crecer al principio si aumentamos la presión del gas para llegar a un máximo y decrecer enseguida. La experiencia muestra que por el contrario la intensidad crece constantemente con la presión hasta acercarse asintóticamente a un cierto valor constante. Estos hechos experimentales pueden ser interpretados o con la hipótesis de la existencia de un tiempo de estada únicamente, o de un tiempo de extinción. Wien concluye que o el tiempo de estada es menor que 0,01 del tiempo de extinción o sino el tiempo de extinción es menor que 0,01 del tiempo de estada. Ambos no pueden ser, pues, del mismo orden de magnitud. Todo el tiempo de emisión tiene que ser o el uno o el otro, pero no puede ser la suma de los dos.

La paradoja y soluciones propuestas. — Hemos visto que el estudio de los fenómenos de interacción entre radiación y materia (efecto fotoeléctrico, disociación fotoquímica, absorción) parecen conducir obligadamente a la hipótesis corpuscular de la luz. Por lo menos la hipótesis corpuscular de la luz explica aquellos fenómenos en forma breve, sencilla y completa. Pero hemos visto también que es imposible explicar la interferencia por medio de corpúsculos, de modo que la interferencia parece conducir obligadamente a la hipótesis ondulatoria de la luz. Hemos visto, por otra parte, que el estudio de los fenómenos de choque electrónico y de absorción escalonada de la luz, en conjunción con los resultados de Wien, parecen indicar que el tiempo de emisión de átomos excitados es, en su integridad, tiempo de estada. Pero hemos visto también que los estudios hechos sobre la longitud de coherencia de la luz

(1) J. PALACIOS, *Ann. d. Physik*, **79**, página 55, 1926.

(2) W. WIEN, *Handb. d. Exp. Phys.*, **14**, páginas 738-739; *Ann. d. Physik*, **76**, página 109, 1925.

y sobre reflexión selectiva, en conjunción con los resultados de Wien, parecen indicar que el tiempo de emisión de átomos excitados es, en su integridad, tiempo de extinción. Desde que hace ya más de cinco años empezó a entrecerse con cierta claridad el carácter fundamental e irreductible de esta paradoja, varias soluciones han sido propuestas. Aquí podré ocuparme tan sólo de algunas de ellas.

Bohr, Kramers y Slater ⁽¹⁾ propusieron una teoría que parecía resolver todas las dificultades, si se renunciaba a la hipótesis de la conservación de la energía y el impulso para el mundo atómico. Estos físicos negaban la propagación de corpúsculos, fotones, en el espacio. Lo que se propagaba era una onda con todas las características geométricas de las ondas electromagnéticas, pero desprovista de energía e impulso. La onda era por ello llamada « virtual ». El papel de la misma era producir en los átomos que iluminaba una cierta probabilidad de que un proceso cuántico se produjera, probabilidad que sería proporcional a la intensidad de la onda. Los procesos o saltos cuánticos en los átomos se producían sin compensación energética alguna. Como vemos, renunciando a la propagación de los fotones desaparecían las dificultades ofrecidas por la interferencia; y renunciando a la conservación de la energía para procesos atómicos, desaparecían las dificultades ofrecidas por la interacción entre radiación y materia. Pero, como Bothe ⁽²⁾ mostró, esta teoría conducía a esperar que, en el caso del efecto Compton, la emisión de un electrón no tenía por qué coincidir en el tiempo con la absorción de la radiación secundaria (se desprecia el tiempo empleado por la radiación entre el proceso de difusión Compton y la absorción cercana). Ahora bien, Geiger y Bothe ⁽³⁾ realizaron una experiencia que probó que los dos procesos aquellos coinciden en el tiempo tal como lo haría esperar la teoría corpuscular de Einstein y contrario a lo previsto por Bohr, Kramers y Slater. Esta experiencia y especialmente otra realizada poco después por Compton y Simón ⁽⁴⁾ demostraron que la hipótesis de la conservación de la energía y el impulso valía también para procesos atómicos. Esto condujo al abandono de la teoría de las ondas virtuales, pero, como veremos más adelante, varios de los conceptos introducidos por ella subsisten en las actuales teorías estadísticas.

Otra teoría propuesta para resolver las dificultades planteadas es la que

⁽¹⁾ BOHR, KRAMERS Y SLATER, *Phil. Mag.*, **47**, página 785, 1924.

⁽²⁾ W. BOTHE, *Naturwissenschaften*, 1924.

⁽³⁾ H. GEIGER Y W. BOTHE, *Z. Physik*, **32**, página 639, 1925.

⁽⁴⁾ A. H. COMPTON Y A. W. SIMON, *Phys. Rev.*, **26**, página 289, 1925.

llamaremos de la dualidad ~~superpuesta o complementaria~~. Esta teoría fué avanzada por Thomson ⁽¹⁾ y repetida después por muchos autores, entre ellos últimamente por Wataghin ⁽²⁾. Las experiencias de Rupp, Einstein y Wood y los fenómenos de interferencia, tienen que hacer con un campo ondulatorio, pero no necesariamente con la « energía » del mismo. Podría por ejemplo describirse todo usando simplemente el concepto de amplitud, sin introducir el concepto de energía. En cambio los fenómenos de interacción entre radiación y materia y las experiencias sobre choques electrónicos y excitación escalonada tienen que hacer sobre todo con la energía y el impulso que ganan o pierden las partículas materiales. Parece, pues, posible superponer un campo ondulatorio que se encargaría de explicar los fenómenos de interferencia y coherencia a los fotones, corpúsculos de energía e impulso, que se encargarían de transmitir estas magnitudes. El camino a recorrer por los fotones estaría, por ejemplo indicado por el vector Poynting del campo ondulatorio. Tiempo de estada y tiempo de extinción se referirían entonces a dos cosas distintas y sería posible superponerlos sin necesidad de sumarlos, evitando los inconvenientes anotados más arriba. El proceso de emisión se efectuaría en la forma siguiente: si una partícula es excitada instantáneamente por choque con un fotón en el momento $t=0$, esta partícula empezará inmediatamente a emitir un tren de ondas amortiguadas esféricas ⁽³⁾, con una constante de amortiguamiento C tal, que su inversa sea igual al tiempo medio de emisión. Este tren de ondas será emitido hasta que su amplitud se acerque exponencialmente a cero. La onda emitida será « virtual », en el sentido de que estará desprovista de energía e impulso. La energía y el impulso permanecerán en el átomo excitado durante un tiempo medio τ (tiempo de estada) para ser emitidos siguiendo la ley estadística (1, pág. 252) en forma de corpúsculo o fotón. Esta teoría parece a primera vista disponer de todas las dificultades. Sin embargo, como veremos, no puede explicar la interferencia. Con efecto, si los fotones han de seguir la dirección indicada por el vector Poynting, en un campo de interferencias sus trayectorias serán curvilíneas. Ahora bien, trayectorias curvilíneas implican cambio de impulso para un fotón determinado. Las experiencias de Compton y Simón indican que el impulso se conserva en el acto elemental. Para que haya conservación sería necesario que

⁽¹⁾ J. J. THOMSON, *Phil. Mag.*, **50**, página 1181, 1925.

⁽²⁾ G. WATAGHIN, *Z. Physik*, **51**, página 593, 1928.

⁽³⁾ P. SELENYI, *Ann. d. Physik*, **35**, página 444, 1911; E. SCHRÖDINGER, *idem*, **61**, página 69, 1920.

la onda que guía al fotón se hiciera cargo de la diferencia de impulso. Pero la onda no puede hacerlo, pues es « virtual » y por lo tanto desprovista del atributo de impulso. Como vemos, pues, ondas « virtuales » no pueden guiar corpúsculos « reales ». Para que un ente físico tenga influencia sobre otro es necesario que ambos tengan por lo menos un atributo en común. Este problema es semejante al que se presenta en psicología sobre el modo cómo el espíritu influencia la materia o viceversa. La teoría de la luz propuesta por De Broglie en 1926 y que él mismo ha abandonado después, es una dualidad superpuesta y tiene por lo tanto los inconvenientes anotados más arriba.

El principio de indeterminación de Heisenberg-Bohr (1) en conexión con la teoría estadística actualmente en boga, salva algunas de las dificultades anotadas más arriba, pero en cambio crea otras. La teoría estadística se asemeja a la de Bohr, Kramers y Slater, en cuanto utiliza ondas virtuales, a las que se les niega toda « realidad », para predecir los fenómenos físicos. La intensidad de la onda en cada lugar e instante indicaría la probabilidad de encontrar un corpúsculo en ese lugar e instante. Esta teoría se diferencia de la de Bohr, Kramers y Slater en cuanto postula que lo único real son los corpúsculos, que pueden existir fuera de los átomos y que la onda virtual que se usa como medio del cálculo no tiene existencia independiente del fotón. Así en el momento de la absorción del corpúsculo, la onda virtual esférica deja instantáneamente de existir. (Para mayores detalles véase el libro de De Broglie *Wellenmechanik*, capítulo X, recientemente aparecido). El principio de indeterminación, llamado también relación de inexactitud, basándose en el hecho de que es imposible determinar a la vez con un error menor que un cierto límite mínimo, dos de las magnitudes llamadas en la mecánica variables conjugadas (por ejemplo coordenada e impulso de una partícula), permite, por lo menos formalmente, salvar la paradoja referente al tiempo de emisión. Con efecto, energía y tiempo son dos variables conjugadas, de modo que el producto de las incertitudes de sus determinaciones no puede ser menor que h , la constante de Planck. Al hacer experiencias sobre longitud de coherencia, determinamos la energía con gran exactitud y como resultado de ello, el tiempo, el instante en el cual la energía es emitida, no puede ser determinado con una precisión mayor que el tiempo de emisión. Con efecto, la relación de inexactitud reza

$$dE \cdot dt = h$$

(1) Ver notas de las páginas 245 y 246 del presente trabajo.

donde E es la energía y dt la incertidumbre en el momento de su emisión. Pero

$$E = h\nu$$

luego

$$d\nu \cdot dt = 1.$$

Ahora bien, al determinar la longitud máxima de coherencia, determinamos ν , en el mejor de los casos, con una precisión equivalente a la determinación de la longitud de onda al milésimo de Angstrom. Si se trata de luz visible, será pues

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = \frac{0,001}{5000} = 2 \cdot 10^{-7} = \frac{d\nu}{\nu}$$

y como

$$\nu = \frac{3 \cdot 10^{10}}{5 \cdot 10^{-5}} = \frac{3}{5} \cdot 10^{15}$$

resulta que

$$d\nu = 10^8$$

y por lo tanto

$$dt = 10^{-8} \text{ seg.}$$

Como vemos pues la incertidumbre en el momento de emisión que debemos esperar, es justamente del orden de magnitud del tiempo de emisión. Con esto queda salvada formalmente la paradoja respecto al tiempo de emisión.

En la teoría estadística, como dijimos, lo real son los corpúsculos de energía e impulso; sin embargo, esta teoría niega el derecho a preguntar por la trayectoria de un corpúsculo. Esto se debe a que, si se planteara esta pregunta, caeríamos en la dificultad de que en un campo de interferencias las trayectorias no pueden ser rectilíneas y, por lo tanto, no habría conservación del impulso. Pero la experiencia de Compton y Simon demostró que el impulso se conservaba para los fotones. Además, en el caso de las ondas estacionarias, del que nos ocupamos más arriba, los corpúsculos no podrían salvar las zonas oscuras. Ahora bien, negar el derecho a preguntar por la órbita de un corpúsculo, equivale a negar la existencia continuada del corpúsculo en el tiempo y el espacio. Como el corpúsculo es una cierta cantidad de energía y de impulso, esto implica negar la existencia continuada de estas magnitudes y, por lo tanto, la ley de conservación de las mismas para el acto elemental. Esto está en contradicción con los resultados de Compton y de Simon, según los cuales energía e impulso se conservan en el acto elemental.

La teoría estadística pretende que no tiene sentido alguno preguntar qué camino ha seguido un corpúsculo, ya sea fotón o electrón, entre dos

observaciones sucesivas. No hay duda que este punto de vista tiene un cierto justificativo, si pretendemos hacer ciencia a base de un positivismo extremo, sin introducir en ella ninguna hipótesis no observable. Sin embargo, la misma teoría introduce las ondas como método de cálculo; y por más que se les niegue realidad física, no dejan de ser por eso hipótesis no demostrables. Por otra parte, el preguntar qué camino ha seguido un fotón o un electrón, tiene exactamente el mismo sentido y la misma justificación que el preguntar por la trayectoria de un proyectil lanzado por un cañón.

✦ La teoría estadística se vale, pues, de las ondas para predecir el futuro, y sin embargo niega a las ondas realidad física; afirma, en cambio, la realidad física a los corpúsculos, pero tiene que renunciar a su existencia continuada en el tiempo y el espacio, a pesar de lo cual postula la validez de las leyes de conservación para el acto elemental. Esta teoría no es pues, a mi juicio, satisfactoria.

2. LA DUALIDAD EXCLUYENTE

Yo voy a proponer aquí un punto de vista que significa la aceptación lisa y llana de los hechos experimentales tal como se nos presentan. La física se encuentra abocada a la siguiente situación: por una parte, tenemos una gran cantidad de hechos físicos que encuentran su explicación más sencilla en las hipótesis corpusculares; por otra parte, todos los fenómenos de interferencia pueden ser comprendidos, tanto para fotones como para electrones, sólo admitiendo su esencia ondulatoria. Las numerosas tentativas que se han hecho para tratar de conciliar la teoría corpuscular con la ondulatoria, asumiendo, por ejemplo, que un cuanto de luz es a la vez corpúsculo y onda, llevan como hemos visto, sin poderlo evitar, a la negación de la ley de causa y efecto. A este rechazo del determinismo en los procesos atómicos se han resignado numerosos físicos. Para evitar la negación del determinismo en los procesos atómicos, y para explicar por qué ciertas relaciones de la física cuántica tienen tan sólo valor estadístico, es que propongo una nueva teoría.

En la física se han desarrollado paralelamente, en los últimos doscientos años dos sistemas distintos y hasta antagónicos de conceptos y definiciones. Por un lado, los conceptos corpusculares que tratan de explicar todos los fenómenos por el movimiento de partículas muy pequeñas, sean ellas moléculas, átomos, electrones, protones o fotones; por el otro, los conceptos ondulatorios, que interpretan los hechos físicos como os-

cilaciones elásticas, acústicas, magnéticas o eléctricas de medios continuos y homogéneos. Al principio, cada uno de estos dos sistemas tenía su campo propio y exclusivo de acción : el sistema corpuscular explicaba los movimientos de los cuerpos de la esfera celeste y los de los cuerpos sólidos en general ; mientras que el ondulatorio interpretaba los fenómenos de la elasticidad, de la acústica, de la óptica y después del electromagnetismo. Mientras las zonas de influencia de ambos sistemas permanecían distintas y separadas, no podía producirse conflicto serio entre ellos. Pero, durante el siglo pasado y comienzos de éste, el sistema corpuscular comenzó a invadir el reino ondulatorio, desalojándolo de sus posiciones tradicionales. Las propiedades de flúidos y gases fueron explicadas corpuscularmente, incluyendo elasticidad y acústica ; el electromagnetismo fué interpretado por Lorentz como debido al movimiento de átomos de electricidad (electrones e iones) ; y últimamente, como hemos visto, aún la óptica se vió invadida por hordas corpusculares. El triunfo de la corpuscularidad hubiera sido completo si la experiencia de Young, la interferencia, no hubiera permanecido como torreón invulnerable al bombardeo cuántico. Los últimos cinco años nos han sorprendido con una contraofensiva formidable del sistema ondulatorio : De Broglie, en París, llega a la conclusión de que todos los corpúsculos pueden ser interpretados al mismo tiempo como ondas, lo cual es confirmado experimentalmente por Davison y Germer, en Nueva York ; y Schrödinger, en Zürich, muestra cómo toda la mecánica corpuscular de Newton puede ser reducida a la propagación de ondas continuas de acuerdo a los principios de la óptica ondulatoria ; la mecánica común resultaría ser, simplemente la óptica geométrica de la materia. Como resultado de esto, se ha producido un combate entre ambos puntos de vista por el dominio, no solo ya de una parte, sino del todo de la física. Resultado de este combate es una cierta confusión de conceptos. Es común el tratar de explicar un fenómeno valiéndose de ambos sistemas de conceptos a la vez. El resultado es que, al pasar de un sistema a otro, siendo ambos fundamentalmente distintos e irreconciliables, es inevitable el romper con la ley de causa y efecto. De ahí que muchos físicos nieguen su validez. Pero esta negación es innecesaria mientras el físico se mantiene dentro de uno solo de los sistemas de conceptos, cualquiera de los dos que sea.

Así, por ejemplo, hemos visto que : si nos aproximamos a la luz por medio de experiencias interferométricas, la luz aparece como onda y el tiempo de emisión como tiempo de extinción ; si hacemos en cambio experiencias corpusculares (utilizando tácitamente la hipótesis de que la materia está formada por corpúsculos), aparece la radiación también co-

mo corpuscular y el tiempo de emisión como tiempo de estada. La razón de la dualidad está, pues, en los distintos puntos de vista y es lógico concluir con W. Wien: « Tiempo de extinción y tiempo de estada deben ser considerados como descripciones distintas de un mismo proceso ». El fenómeno de la emisión de la luz es, pues, un fenómeno único cuya esencia nos escapa, y que puede ser descrito de dos modos distintos y equivalentes; ya sea como la emisión amortiguada de un tren esférico de ondas continuas, o como el lanzamiento repentino de un corpúsculo de energía. Los dos reinos o grupos de conceptos en que se encontraba dividida la física clásica: conceptos ondulatorios que se aplicaban a la radiación, y conceptos corpusculares con los que se interpretaba la materia, son pues capaces de explicar el fenómeno de la emisión cada uno de por sí e independientemente. Las dificultades y paradojas surgen únicamente del hecho de pretender aplicar *al mismo tiempo* a un fenómeno dos sistemas de conceptos fundamentalmente distintos. Vamos a ver que, si separamos cuidadosamente los conceptos en ondulatorios y corpusculares, es perfectamente posible describir muchos fenómenos en forma continua (causal) en el tiempo y el espacio, tanto desde el punto de vista corpuscular como ondulatorio independientemente. Las dos descripciones son, como veremos en el párrafo siguiente, fundamentalmente distintas e irreconciliables.

La radiación de resonancia. Dualidad de la absorción. — Ya dijimos que si se ilumina un recipiente de cuarzo transparente, que contenga vapor de mercurio a baja presión, con luz de la línea de resonancia 2537 de un arco de cuarzo, esta misma línea es reemitida en todas las direcciones por el vapor iluminado. Este proceso puede ser descrito corpuscularmente usando la teoría « cuántica clásica », diciendo que corpúsculos luminosos, fotones, de la energía E son absorbidos por algunos de los átomos del vapor de mercurio. El acto de la absorción consiste en el salto del átomo de un nivel estacionario de energía a otro. Después de un tiempo de estada, regulado por una ley estadística (fórmula 1), los átomos excitados lanzan los fotones al espacio en una dirección cualquiera, sufriendo el retroceso consiguiente, siempre que no hayan perdido anteriormente la energía de excitación, debido a choques de segunda especie u otras causas. Si la densidad del vapor es aumentada hasta que la luz primaria sea absorbida en una capa de espesor menor que la cuarta parte del diámetro de un fotón, éste, o no es absorbido por ninguno de los átomos con los que choca, en cuyo caso se produce reflexión elástica y regular, o es absorbido y la energía se disipa en calor.

Este mismo proceso puede ser descrito ondulatoriamente en la forma siguiente : ante todo, si queremos explicar la reflexión selectiva de la línea 2537 para altas densidades del vapor, tenemos que admitir que *cada uno* de los átomos iluminados por la radiación primaria, contesta con un tren secundario de ondas coherente con el primero. Si la profundidad a que penetra la luz primaria es menor que un cuarto de onda, obtendremos entonces, y sólo entonces, reflexión regular y selectiva. Este resultado, al que nos lleva el fenómeno descubierto por Wood, es de gran trascendencia. Con efecto, el número de átomos que toman parte en el proceso de resonancia, desde el punto de vista corpuscular, es normalmente tan sólo algo así como un millonésimo del número total de átomos (el número de cuantos que llegan a un cm^2 de superficie del tubo de resonancia no pasa, en condiciones normales, de 10^{15} por segundo); estos fotones serán absorbidos, en su casi totalidad, por los átomos contenidos en el primer centímetro de profundidad; como la vida media de un átomo de Hg excitado es de 10^{-7} seg, el número total de átomos excitados será de $10^{15} \cdot 10^{-7} = 10^8$ por cm^2 ; el número total de átomos por cm^3 en vapor de mercurio saturado a 18° de temperatura es de 10^{14} ; hay pues tan sólo un átomo excitado por cada millón de átomos normales. Desde el punto de vista ondulatorio, tenemos que admitir que todos los átomos iluminados toman parte en el proceso de resonancia y, por lo tanto, es imposible que cada uno de ellos absorba y reemita un cuanto entero de luz. Los procesos de absorción y de emisión tienen, pues, que producirse ondulatoriamente con cantidades arbitrariamente pequeñas de energía, y ésta tiene que variar continuamente con la variación de la intensidad de la luz primaria. No existe, pues, absorción o emisión cuántica en una descripción ondulatoria. La resonancia del vapor de mercurio se nos presenta, pues, como un caso de dispersión o resonancia clásica : los resonadores, con los que podemos simbolizar a los átomos, tendrán un coeficiente de amortiguamiento característico, el que será en general aumentado por choques u otras molestias, con lo que aumentará el ancho de la línea emitida, disminuyendo al mismo tiempo el rendimiento.

Describiendo a la radiación de resonancia en esa forma, la reflexión selectiva aparece como una consecuencia natural del aumento de densidad del vapor; cuando la profundidad a la que la luz penetre sea menor que un cuarto de longitud de onda, los trenes ondulatorios secundarios interferirán entre ellos, anulándose en todas las direcciones menos la de reflexión regular. La radiación de resonancia se concentrará, pues, en la dirección de reflexión regular al aumentar la densidad, de modo que la intensidad en esta dirección aumentará, pero la intensidad total de la luz

reemitida deberá disminuir, pues al aumentar la densidad aumenta el número de choques y con ellos la constante de amortiguamiento, a menos que la eficiencia de los choques no se mantuviera constante. A menudo se ha expresado la opinión de que, al producirse reflexión regular, la intensidad total secundaria aumenta (ver, por ejemplo, P. Pringsheim, *Fluoreszenz und Phosphoreszenz*). Esto, que es sin duda cierto para la dirección de la reflexión regular, no puede ser cierto, de acuerdo a nuestra teoría, para el conjunto de la radiación secundaria. Es mi intención estudiar este punto experimentalmente.

Como vemos, pues, la resonancia puede ser explicada satisfactoriamente desde ambos puntos de vista. El carácter fundamental e irreconciliable de la dualidad, aparece claramente en el hecho de que en la descripción corpuscular sólo unos pocos átomos toman parte en el proceso de resonancia, dependiendo su número de la intensidad de la luz primaria; en la descripción ondulatoria, en cambio, todos los átomos iluminados dispersan la luz primaria y su número no depende de la intensidad de la misma. Átomos que desde el primer punto de vista no toman parte en el proceso y que no deberían tener por ello noticia de él, participan en el proceso, desde el segundo punto de vista y tienen, por lo tanto, energía de excitación. La contradicción no puede ser más clara.

Dualidad del átomo. — En el párrafo anterior vimos que un átomo iluminado reacciona en forma fundamentalmente distinta, según se describa el proceso, ondulatoria o corpuscularmente. El átomo mismo tiene que ser, pues, descrito de dos modos fundamentalmente distintos.

El átomo corpuscular es el átomo de Bohr. Está constituido en su esencia por un sistema de estados estacionarios o niveles de energía, en los cuales puede permanecer durante tiempos regidos por leyes estadísticas sin emitir radiación alguna. El « salto » del átomo de un estado estacionario a otro, salto que durará un tiempo corto en relación al tiempo de estado, pero que no necesita ser cero, estará acompañado por absorción o emisión de energía.

El átomo ondulatorio tiene que ser un sistema de resonadores acoplados. Son los resonadores virtuales de Bohr. Absorción y emisión de luz son procesos continuos que duran tiempos medibles. El tiempo de emisión del átomo excitado está determinado por la constante de amortiguamiento característica del mismo y por las condiciones exteriores (choques, etc.). El átomo excitado tiene que empezar a emitir radiación en el instante mismo en el que adquiere energía de excitación, y seguir emitiéndola hasta su agotamiento. En el átomo ondulatorio no existen, pues,

estados estacionarios fuera del estado normal o no excitado. Lo único estacionario son las frecuencias emitidas. Un mismo átomo emitirá en general, todas las frecuencias de su espectro al mismo tiempo y cada una de las líneas con un ancho correspondiente a la constante de amortiguamiento.

Ninguno de los modelos atómicos construídos hasta ahora satisface todas estas condiciones. El átomo de Schrödinger se acerca al átomo ondulatorio sin serlo en su totalidad. Baste recordar que en él, el núcleo ha sido introducido como un punto carga, es decir, como un corpúsculo. Además, en el átomo de Schrödinger existen estados excitados estacionarios, lo cual es contrario a la experiencia de la reflexión selectiva. La construcción de un modelo atómico exclusivamente ondulatorio es, pues, una obra que está por hacerse.

Dualidad del electrón. — Vimos al principio que la excitación de líneas espectrales por medio de choques electrónicos y el efecto fotoeléctrico fueron aceptados en su época como pruebas de la corpuscularidad de la luz. Ese punto de vista era justificado mientras no se conocía el carácter ondulatorio del electrón. Como veremos, si se describe al electrón como onda, choques electrónicos y efecto fotoeléctrico pueden ser descritos ondulatoriamente en forma continua y sin salto cuántico alguno.

a) *Choque electrónico* : cuando un electrón tiene energía disponible suficiente para hacer pasar un átomo a un estado excitado (hablando corpuscularmente), ese electrón tiene una frecuencia dada por la relación cuántica

$$E = hv$$

de acuerdo a la teoría de De Broglie-Schrödinger (dejando de lado la energía relativística que no es disponible). Ahora bien, la luz emitida tiene una frecuencia dada también por la fórmula anterior y por lo tanto igual a la del electrón. La excitación de una línea espectral por choque electrónico se reduce pues, ondulatoriamente, a un caso de resonancia, no siendo necesarios saltos cuánticos de ninguna especie. Si el electrón tiene una frecuencia mayor que la de la línea a emitir, se producirá un fenómeno análogo al que se utiliza en la recepción heterodina de la radio : el átomo emitirá radiación de su frecuencia propia y la onda electrónica proseguirá su camino con una frecuencia igual a la diferencia de la originaria y la propia del átomo :

$$\nu' = \frac{(eV - E)}{h}.$$

Como vemos, la energía se transforma continuamente y en cantidades arbitrarias.

b) *El efecto fotoeléctrico* : el efecto fotoeléctrico es, en cierto sentido, la inversión del choque electrónico. Si este último se produce contra un ion positivo, es posible que el electrón que choca sea absorbido por el átomo, resultado de lo cual será la emisión de una o más frecuencias luminosas.

A la inversa, la absorción de una frecuencia luminosa puede provocar la emisión de un electrón y este es nuestro efecto fotoeléctrico. Siendo un fenómeno la inversión del otro, la explicación ondulatoria del choque electrónico tiene que ser aplicable, *mutatis mutandis*, al efecto fotoeléctrico. Esto nos llevará a conclusiones interesantes respecto a la futura teoría ondulatoria del electrón.

Una onda luminosa de la frecuencia ν entra en interacción con un resonador del átomo de la frecuencia ν_1 , como resultado de lo cual la frecuencia heterodina $\nu' = \nu - \nu_1$ es emitida en forma de onda electrónica. Como la onda luminosa llega en forma continua y paulatina, la onda electrónica será emitida en la misma forma, es decir, tardará un tiempo medible en ser emitida. La amplitud de la onda electrónica será en cada instante y lugar proporcional a la amplitud de la onda luminosa. A la frecuencia ν_1 se la llama frecuencia de separación. Como vemos no es para nada necesario admitir que toda la energía de la onda, o que toda la energía de un fotón es absorbida por un átomo para poder emitir un electrón. Ni el concepto de fotón ni el concepto de electrón deben entrar para nada en la descripción. Se trata de ondas luminosas y de ondas eléctricas, con amplitudes, frecuencias y fases que bastan para describir el efecto en su totalidad. Pero, como era de esperarse, es necesario renunciar por completo a la concepción corpuscular del electrón, como es necesario renunciar por completo al concepto de fotón en la descripción ondulatoria de la resonancia. En efecto, en la descripción corpuscular de un proceso atómico, el acto elemental no determina ni la repartición de frecuencias en el espectro, ni la repartición de intensidades en el espacio. Para obtenerlas es necesario hacer estadística : tomar el promedio sobre un gran número de actos elementales. En una descripción ondulatoria, en cambio, es característico el hecho de que la repartición de frecuencias e intensidades no depende de la intensidad total que entre en el proceso. Cualesquiera que sea la intensidad de la onda primaria, obtendremos de una sola vez todas las frecuencias e intensidades.

Si determinamos, pues, experimentalmente, en el caso del efecto fotoeléctrico producido al caer luz sobre una placa metálica, por ejemplo, la

repartición en el espacio de la corriente electrónica, la curva así obtenida de la repartición de la intensidad de la onda electrónica en las diversas direcciones del espacio será válida cualquiera sea la energía que caiga sobre la placa metálica. La onda electrónica se expande pues en general en todas direcciones a la vez. No tiene, por lo tanto, sentido tratar de construir ondulatoriamente un electrón de apariencia corpuscular formando paquetes de ondas. La explicación de por qué nuestra onda electrónica deja sobre la placa fotográfica o en la cámara de Wilson una traza linear es un problema para el futuro. Sin embargo, un comienzo de solución ha encontrado ya este problema en un interesante trabajo de Mott ⁽¹⁾ aparecido recientemente.

Como vemos, pues, ni el choque electrónico ni el efecto fotoeléctrico prueban la corpuscularidad de la luz.

3. DUALIDAD Y DETERMINISMO

Los pocos ejemplos estudiados más arriba, que podrían ser aumentados si se lo descase, bastan para mostrar que es perfectamente posible describir fenómenos atómicos, en forma causal y continua, en el tiempo y el espacio, siempre que usemos para ello un sistema único de conceptos y definiciones. Y no existe sólo una posibilidad de descripción causal y continua en el tiempo y el espacio, sino dos : ondulatoria y corpuscular. Esta superabundancia de posibilidades es, precisamente, la que ha producido la confusión de ideas, que llevan a negar el determinismo aun como hipótesis de trabajo. Con efecto, hay algunos fenómenos que pueden ser descritos en forma corta y sencilla usando uno de los dos sistemas de conceptos, siendo en cambio su explicación con el otro sistema difícil y complicada, Tal por ejemplo el efecto Compton ⁽²⁾. Hay otros fenómenos en cambio, para los cuales la inversa es cierta. Como la tendencia natural de la ciencia es ser lo más económica posible, es lógico que se explique cada fenómeno particular en la forma más corta y fácil, usando aquel de los dos sistemas de conceptos que más se adapte a la necesidad especial. La descripción general resultará pues una especie de mosaico compuesto de baldosas de dos colores. Una descripción causal en el tiempo y el espacio es posible

⁽¹⁾ MOTT, *Proc. Roy. Soc. London*, diciembre de 1919

⁽²⁾ E. SCHNÖDINGER, *Ann d. Physik*, **82**, página 257, 1927; G. WENTZEL, *Z. Physik*, **43**, páginas 1 y 779, 1927.

mientras uno se mantiene dentro de una de las baldosas, cualquiera de ellas que sea, pero al saltar de una a otra, como los dos sistemas son irreconciliables, resulta inevitable un rompimiento en la descripción causal. Las relaciones calculadas dentro de uno de los sistemas no pueden tener sino validez estadística para el otro.

Por supuesto, sería deseable describir a la naturaleza desde un sólo punto de vista y usando un sólo sistema de conceptos, pero eso no será posible mientras la ciencia no llegue a explicar desde un solo punto de vista por lo menos todos los fenómenos explicables desde el otro. Cuando se llegue a ello tendremos una física unitaria, causal y continua en el tiempo y el espacio. Por ahora, ni el sistema corpuscular puede explicar interferencias, ni el sistema ondulatorio puede explicar los rastros lineales dejados por electrones o partículas alfa en la cámara de Wilson. Tenemos pues que resignarnos por ahora a usar dos sistemas de conceptos irreconciliables y a aceptar leyes cuya validez es puramente estadística, en la esperanza de que el futuro las substituya por leyes causales.

Quando Bohr encuentra necesario negar la causalidad es porque describe la propagación de la luz ondulatoriamente y en cambio su interacción con materia corpuscularmente. Si se quiere tener causalidad, es necesario describir ambos fenómenos corpuscular u ondulatoriamente, tal como lo hicimos para la radiación de resonancia. La negación de Heisenberg de la ley de causa y efecto es más bien de carácter formal : es cierto que es imposible predecir el futuro con una precisión ilimitada, como tal vez soñaron algunos físicos ilusos del tiempo clásico, debido a la imposibilidad de conocer exactamente todas las condiciones iniciales, pero podemos conocer las condiciones iniciales con una cierta precisión y por ello predecir el futuro con una precisión correspondiente. Además, y esto es lo fundamental, esta imprecisión no excluye la posibilidad de postular arbitrariamente una causalidad rigurosa por razones de simple comodidad. La causalidad no es, en última instancia, sino una hipótesis *a priori*, un esquema de trabajo. Puede hacerse esta hipótesis o puede no hacérsela, como ya observó Hume en 1740. Pero lo que está por demostrar es que pueda hacerse ciencia abandonándola. Aun los partidarios de la escuela cuántico-estadística no abandonan la causalidad en realidad, pues cuando calculan algo lo hacen valiéndose de ecuaciones ondulatorias (Schrödinger, Dirac), es decir, valiéndose de ondas (las que por más que se les niegue realidad física no dejan de ser ondas, aunque lo sean en espacios polidimensionales) y para las ondas rige la causalidad clásica. La relación de Heisenberg limita su aplicación al sistema

corpúscular. En el sistema ondulatorio, como lo ha mostrado Frenkel en su libro reciente, la relación de inexactitud es superflua, pues está ya contenida en las definiciones mismas de los conceptos usados, lo cual se prueba obteniendo aquélla deductivamente de éstos.

4. LA RELACIÓN DE FRECUENCIA $E = h\nu$.

Bohr ha llamado la atención sobre el hecho de que la condición de frecuencia $E = h\nu$ indica ya la imposibilidad de una descripción de la luz, causal en el tiempo y el espacio y la validez puramente estadística de las leyes cuánticas. Como E significa la energía de un corpúsculo localizado por medio de coordenadas espaciales, mientras que ν indica la frecuencia de una onda que se extiende sobre una gran región del espacio, la relación de frecuencia no puede ser una igualdad en el sentido clásico. La explicación de esto es muy sencilla : desde nuestro punto de vista en el sistema corpúscular no hay frecuencias y $\nu = \frac{E}{h}$ significa simplemente la energía del cuanto de luz, expresada en unidades distintas a las de E . La igualdad es pues una simple identidad y no tiene por ello sentido físico alguno. En el sistema ondulatorio E significa una frecuencia, medida sólo en unidades distintas a las de ν , y nuestra igualdad es nuevamente una identidad sin sentido. La condición de frecuencia tiene sentido e importancia como relación entre ambos sistemas. Si medimos E corpúscularmente y ν ondulatoriamente, la igualdad cobra sentido ; pero entonces no puede tener sino validez estadística. La constante h de Planck, desempeña, como vemos, el papel de constante de conversión de un sistema al otro.

5. LA HIPÓTESIS CUÁNTICA DE PLANCK

Hemos visto repetidamente que en el sistema ondulatorio, la energía es absorbida y emitida continuamente y en cantidades arbitrarias. ¿Cómo puede conciliarse esto con el resultado que obtuvo Planck en el año 1900, según el cual un oscilador lineal absorbe y emite energía tan sólo en cantidades $E = h\nu$, donde ν es la frecuencia propia del oscilador ? La contestación ya fué dada en el párrafo anterior. El decir que sólo cantidades discretas de energía entran en interacción con materia es ciertamente exacto en el sistema corpúscular. Pero este hecho, traducido al lenguaje ondulatorio, significa simplemente que un oscilador sólo entra

en interacción con radiación de una frecuencia igual a la propia, lo cual no es nada nuevo. Las amplitudes no quedan con ello fijadas en modo alguno. Con efecto, si tenemos la ecuación diferencial mecánico-cuántica del oscilador

$$\ddot{q} + 4\pi^2\nu_0^2 q = 0,$$

e introducimos como ensayo de solución

$$q = ae^{2\pi i\nu t},$$

obtenemos

$$(\nu_0^2 - \nu^2) q = 0.$$

Esta ecuación significa que q es distinto de cero tan sólo para $\nu = \pm \nu_0$. En este último caso, q puede tener valores cualesquiera sin herir por ello nuestra ecuación diferencial del oscilador. Ahora bien, $\nu = \pm \nu_0$ significa en el lenguaje corpuscular, como en él ν indica una energía, que sólo cuantos de la magnitud $E = h\nu$ pueden ser emitidos o absorbidos; en el lenguaje ondulatorio, en cambio, que el oscilador sólo entra en interacción energética con radiaciones de frecuencia igual a la propia. El valor de q queda en ambos casos indeterminado: corpuscularmente significa q la raíz cuadrada de un número de fotones; ondulatoriamente la amplitud de una onda. Cuantificar la amplitud atribuyéndole valores discretos, como se hace generalmente, es pues innecesario e injustificado.

6. LA CONSTANTE DE PLANCK

¿Qué significa la constante h de Planck, a la que se le atribuyen a menudo místicas propiedades? Como vimos, la constante h es simplemente la llave de conversión o traducción del lenguaje corpuscular al ondulatorio y viceversa. La constante h no puede aparecer en ninguna fórmula mientras nos mantengamos dentro de uno solo de los dos sistemas de conceptos.

La aparición de una h en una fórmula significa que en ella se usan conceptos ondulatorios y corpusculares a la vez. Así la aparición de h en el exponente de la fórmula de Planck significa simplemente que se está midiendo la energía de un cuanto ondulatoriamente por medio de la frecuencia ν , mientras que a la energía media del oscilador se la mide corpuscularmente por medio de kT . Si medimos la energía del fotón corpuscularmente por medio de E , o también, si medimos la energía media del oscilador ondulatoriamente por medio de ν_0 , poniendo $kT = h\nu_0$ (esto

implica una definición ondulatoria de la temperatura) desaparecerá h del exponente de la fórmula de Planck : en un caso rezaría el exponente $\frac{E}{kT}$ y en el otro $\frac{v}{v_0}$.

La constante h desaparecerá pues de la física el día que sea posible describir todos los fenómenos desde un punto de vista único.

CONCLUSIÓN

La crisis del determinismo se debe pues a dos causas diferentes : por una parte, al uso contemporáneo de dos sistemas irreconciliables de conceptos, y por la otra, al descubrimiento de Heisenberg de la relación de inexactitud que vale para el mundo corpuscular. Creo haber mostrado claramente que ninguna de las dos causas es suficiente para abandonar definitivamente la hipótesis determinista en las ciencias físicas. La imposibilidad de una descripción continua en tiempo y espacio desaparecerá una vez que se haya conseguido explicar los fenómenos conocidos con un solo sistema de concepto. La incertidumbre respecto al futuro, en el sistema corpuscular, implica si se quiere una modificación del concepto clásico de determinismo, pero en ningún modo hace necesaria su negación. Más aún, en muchos casos puede describirse el pasado, como Heisenberg mismo lo admite, en forma estrictamente determinista en el sentido clásico, pues la relación de imprecisión vale para el futuro, pero no para el pasado.

La afirmación, bastante corriente hoy en día, de que la física atómica haya demostrado « el libre albedrío de la materia », carece pues de todo fundamento.

ENRIQUE GAVIOLA.

Instituto de Física, La Plata, 16 de julio de 1930.

PUBLICACIONES DE LA FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICOMATEMÁTICAS

Una lista completa de las publicaciones (86) se encontrará agregada al final del número 85, *Saneamientos urbanos y rurales*, tomo II. Pueden solicitarse a la Facultad tiradas aparte que contienen además, las nuevas publicaciones 86-90.

Últimas publicaciones.

	Peso m/n
89. <i>Contribución al estudio de las ciencias fisicomatemáticas</i> , volumen V, entrega 1ª. R. G. LOYARTE, Una nueva forma de energía cuantificada en el átomo de mercurio. La rotación cuantificada del átomo de talio. R. G. LOYARTE y A. T. WILLIAMS, El espectro de absorción de los vapores de nickel. Nuevos multipletes del Ni (I). E. GAVIOLA, Una prueba experimental de la teoría de Schrödinger. La probabilidad de transición de la «línea prohibida» 2656 del mercurio. R. GRINFELD, El potencial de ionización de la molécula de amoníaco. A. DURANOÑA Y VEDIA y A. E. SAGASTUME BERRA, Una teoría de las integrales entre límites infinitos paralela a la de las series. R. G. LOYARTE y R. GRINFELD, La rotación cuantificada del átomo de potasio. R. G. LOYARTE, El espectro de emisión del mercurio entre 1868 y 3000 Å. I. La rotación cuantificada del átomo de mercurio ionizado. A. T. WILLIAMS y R. GRINFELD, La multiplicidad de los términos espectrales y su relación con la valencia química. A. T. WILLIAMS, El comportamiento de la línea $1^1S_0 - 2^1P_1$ del mercurio. La mecánica ondulatoria y las ligazones homo y heteropolares. F. VIERNHELLER, Sobre la exactitud de la medición de tensiones altas por el método espectrográfico. F. CHAROLA, Los espectros de absorción de los vapores de bismuto y antimonio. J. C. VIGNAUX, La representación de funciones por series de polinomios. A. E. SAGASTUME BERRA, Algunas propiedades funcionales de las integrales de potencias, 242 páginas. Diciembre de 1929.....	4,80
90. <i>Anuario para el año 1930</i> , 94 páginas. Marzo, 1930.....	1,60
91. <i>Contribución al estudio de las ciencias fisicomatemáticas</i> , volumen IV, entrega 2ª. P. LONGHINI, Cálculo de las reacciones de vínculo de una barra rígida con un grado de libertad. A. A. MARCHETTI, Variación del estado de escurrimiento y determinación del nivel de agua correspondiente, 46 páginas. Septiembre, 1930.....	1,20
92. <i>Anuario para el año 1931</i> , 236 páginas. Marzo, 1931.....	3,60

Serie textos y conferencias.

Hay existencia de los siguientes :

30. <i>Mediciones electrotécnicas</i> , C. Simons.....	6,00
44-81. <i>Análisis matemático</i> , H. Broggi, tomos I y II.....	12,00
61-72-85. <i>Saneamientos urbanos y rurales en la República Argentina</i> , E. Artaza, tomos I y II.....	30,00
69. <i>Conferencias sobre cálculo vectorial</i> , R. Gans.....	1,50
80. <i>Física general</i> , R. Loyarte, tomo I.....	8,00
87. <i>Determinación de tiempo y latitud</i> , J. Aramburo.....	4,00

PUBLICACIONES
DE LA
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICOMATEMÁTICAS

Las publicaciones ordinarias de la Facultad están organizadas de la manera siguiente :

Anuarios; que contienen para cada año escolar, las disposiciones relativas a estudios, autoridades y personal docente, planes de estudio, programas e informaciones generales.

Memorias; informe anual al honorable Consejo superior sobre el funcionamiento general de la Facultad, desarrollo de la enseñanza, datos del movimiento de las Escuelas, personal docente, alumnos, etc.

Textos y conferencias. Se publicarán en esta serie, textos, conferencias, etc., dentro de los programas de estudios o útiles en el ejercicio de algunas de las profesiones de los planes de estudios.

Contribución al estudio de las ciencias físicas y matemáticas. Esta publicación se divide en dos series : *matemático-física y técnica*; la primera comprende estudios de ciencia pura y la segunda los de aplicación a las ramas de ingeniería que cultiva la Facultad. Las dos series están destinadas a la inserción de los trabajos científicos del personal de la Facultad o de los extraños que hayan utilizado sus elementos. Los trabajos se publicarán, a medida que sus autores los entreguen, en folletos con paginación corrida formando volúmenes de 500 páginas en cada serie.

AVISO

Con el fin de evitar extravíos en la correspondencia, rogamos se nos hagan los envíos a la siguiente dirección :

Facultad de Ciencias físicomatemáticas

Av. 1 esq. 47. — LA PLATA.

República Argentina.

PUBLICATIONS
DE LA
FACULTÉ DE SCIENCES
PHYSICOMATHÉMATIQUES

Les publications ordinaires de la Faculté se groupent de la façon suivante :

Anuarios; qui contiennent les dispositions concernant les études, autorités et personnel d'enseignement, plans d'études, programmes et informations générales, propres de chaque année scolaire.

Memorias; compte rendu annuel du Conseil Académique concernant le fonctionnement général de la Faculté, le développement de l'enseignement, donnés sur le mouvement des Écoles, professeurs, élèves, etc.

Textos y conferencias. En cette série sont publiés : des cours, leçons, etc., professés à la Faculté selon ses programmes officiels et des livres convenant à ses professionnels.

Contribución al estudio de las ciencias físicas y matemáticas; cette publication se compose de deux séries : *mathématique-physique et technique*. La première concernant les sciences pures, la seconde, les applications aux branches de la science de l'ingénieur que la Faculté cultive. Les deux séries sont destinées à la publication des travaux scientifiques du personnel de la Faculté et de tous ceux qui ont réalisé dans son sein des travaux pareils. Les travaux sont publiés au fur et à mesure de leur livraison, en fascicules à paginación suivie, jusqu'à former pour chaque série des volumes de 500 pages.

AVIS

Afin que la correspondance ne s'égarre, prière, de l'envoyer à l'adresse ci-dessous :