

¿Cómo entender las ondas de la materia?

ANA MARÍA CETTO Y LUIS DE LA PEÑA

Una de las más grandes y prolongadas controversias en el terreno de la física clásica es la que surgió en el siglo XVII en torno a la naturaleza de la luz: ¿es la luz un fenómeno ondulatorio, o está hecha de corpúsculos? Entre la doctrina corpuscular de Newton¹ y la teoría ondulatoria de Huygens no parecía haber conciliación posible; los dos conceptos involucrados son desde el punto de vista clásico opuestos e incompatibles, y no parece que puedan referirse simultáneamente a un mismo sistema.

Aun a la luz de los famosos experimentos de interferencia de Young, y ya en pleno siglo XIX, resultaba difícil que los físicos se sacudieran el enorme peso de la doctrina newtoniana y aceptaran la evidencia del carácter ondulatorio de la luz; fue necesario que la teoría ondulatoria alcanzara una forma matemática muy desarrollada para que se le tomara en serio. Este esfuerzo formalizador pronto empezó a rendir excelentes frutos: no sólo sirvió para describir con detalle la propagación de la luz, sino que permitió explicar y predecir diversos fenómenos propios de la óptica física, que pudieron comprobarse de manera experimental, validando con ello de manera definitiva el modelo ondulatorio. Pero también ofreció frutos mucho más allá de lo previsto: el formalismo se pudo extender por analogía al estudio del movimiento de un sistema de partículas con masa, lo que contribuyó de manera significativa al desarrollo de la poderosa mecánica analítica. La analogía fue llevada muy lejos por Hamilton en el

siglo XIX, quien mostró que a cada función que describe la propagación de una onda corresponde una función asociada al movimiento de partículas.

He aquí una elegante forma de conciliar ondas y partículas: a través de un formalismo común. El problema de esta conciliación, sin embargo, es su carácter puramente formal. En tanto que, por ejemplo, la función de onda tiene un claro significado físico en el caso ondulatorio, para un sistema mecánico la correspondiente *función de acción* es un ente meramente matemático. En el caso luminoso, la óptica geométrica —la que se sirve del simple trazado de rayos para

representar la trayectoria de la luz en la formación de imágenes por espejos, lentes, etc.— se obtiene como límite de la descripción ondulatoria cuando la longitud de onda es muy pequeña comparada con el tamaño de los objetos y pueden desprejarse los efectos de la difracción, interferencia, etc.; lo cual está bien y lo podemos entender intuitivamente. Pero en el caso de las partículas, ¿qué sentido puede tener una formulación ondulatoria, cuál puede ser su significado físico? En otras palabras, si tomáramos la analogía como físicamente significativa, cabría preguntarnos: ¿la mecánica newtoniana que describe la trayectoria de las partículas, es



Ana María Cetto y Luis De La Peña: Instituto de Física y Facultad de Ciencias, UNAM

caso límite de que teoría, de qué situación física?

Dejando de lado especulaciones de este tipo, puede decirse que el siglo XIX casi concluye exitosamente con una idea clara de que las ondas son ondas -la luz entre ellas- y las partículas son partículas, y de que se trata de entes diferentes y fácilmente distinguibles, al menos en principio. En la última década del siglo, J.J. Thomson establece que los rayos catódicos, ya muy famosos en esos tiempos, están constituidos por partículas con carga y masa, los llamados electrones. Pero casi al mismo tiempo Roentgen y Becquerel descubren otras emisiones; sabiamente se les llama rayos X, alfa, beta, gama... en lo que se determina si son ondas o partículas.

En cuanto a los rayos alfa y beta, con el tiempo queda claro que son partículas con carga y masa: núcleos de helio y electrones, respectivamente. La situación de los rayos X (y los rayos gama), sin embargo, se complica, porque de manera alternada se van encontrando en el laboratorio evidencias en un sentido y en el otro. Los rayos X se difractan, como las ondas; pero también ionizan la materia a su paso y se propagan de manera unidireccional, como corpúsculos. Pero además viajan con la velocidad de la luz y son de naturaleza electromagnética, como la luz...

W. H. Bragg, justo en la época en que realizaba las primeras pruebas de difracción de rayos X por cristales, hacia finales de 1912, comentó proféticamente y un tanto salomónicamente: 'Me parece que el problema no está en optar por una de las dos teorías sobre los rayos X, sino en encontrar una teoría que posea la capacidad de ambas'.²

La teoría fotónica de la luz propuesta por Einstein a partir de 1905 constituye precisamente un esfuerzo en esta dirección. En particular, su estudio del comportamiento estadístico de la radiación lo conduce a un resultado difícil de comprender cabalmente: a las fluctuaciones de la energía de esta radiación contribuyen dos términos, uno de naturaleza corpuscular, cuántica, y otro de naturaleza clásica, ondulatoria. Si el primer término domina (por ejemplo, a muy bajas temperaturas), el sistema tiene un comportamiento cuántico; pero cuando es el segundo el dominante, la descripción puede hacerse en términos clásicos y ondulatorios. Comienza a cambiar el esquema conceptual; la gente habla de que la luz y los rayos X, y las otras radiaciones electromagnéticas son combinaciones de onda y partícula; la dualidad onda-partícula irrumpe en el lenguaje de los físicos, y rápidamente se difunde.

Partículas-ondas

En el laboratorio de Maurice de Broglie, dedicado al estudio de los rayos X, también se empleaba el lenguaje de la dualidad onda corpúsculo. Intrigado por esta dualidad, y atraído por la teoría fotónica de Einstein, su hermano Louis de Broglie buscó la conciliación: reconozcamos que la luz está hecha de corpúsculos, pero éstos llevan asociado un fenómeno interno de naturaleza periódica. Al periodo se asocia una frecuencia, a la frecuencia una onda... A mayor frecuencia de la onda se asocia mayor contenido energético del corpúsculo, de acuerdo con la fórmula de Planck $E=h\nu$ (h es la constante de Planck y ν la frecuencia). O bien, a mayor momento del corpúsculo corresponde una menor longitud de onda: $\lambda=h/p$.

Pronto se le ocurre a de Broglie una observación brillante: estas fórmulas que relacionan parámetros ondulatorios con parámetros mecánicos no contienen ninguna referencia específica al fotón. ¿Qué impide que se apliquen a otros corpúsculos, como los electrones, por ejemplo? ¿No será posible que la materia tenga también un carácter dual? De Broglie se aventura a dar el paso: propone, para completar el esquema, que *todas* las partículas llevan asociada una *onda*, de longitud de onda $\lambda=h/p$. Aquí no se trata ya de una solución formal: para de Broglie estas ondas tienen un carácter físico, y debe ser posible exhibirlas mediante un experimento de difracción de electrones por un cristal. Esto es lo que se atrevió a afirmar ante una pregunta del profesor Perrin durante el interrogatorio de su examen doctoral, en 1924. De manera simultánea e independiente, Einstein llega a la misma conclusión y habla de los fenómenos de difracción que deberán producir los haces moleculares.

Y de Broglie y Einstein tenían razón. Curiosamente, los primeros testimonios experimentales del carácter ondulatorio del electrón ya los habían obtenido previamente C. Davisson y C. Ramsauer en diferentes situaciones, sin saberlo. Los caprichosos resultados obtenidos en experimentos de dispersión de electrones comienzan a encontrar explicación.

Una larga serie de experimentos subsiguientes con electrones *difractados* por cristales y por láminas delgadas confirmaron la hipótesis y la fórmula de de Broglie: los haces de electrones se comportan como *paquetes de ondas*. La dualidad on-



Figura s/n (decorativa). Patrón de difracción de electrones producido por un cuasicristal; nótese la simetría pentagonal. (Cortesía del IFUNAM.)



da-corpúsculo se consolida. Irónicamente, la dualidad se presenta aun a nivel familiar: en 1906, J.J. Thomson había recibido el premio Nobel por las investigaciones que lo condujeron a la conclusión de que los rayos catódicos están hechos de partículas, los electrones; en 1937 su hijo G.P. Thomson recibe, junto con Davisson, el premio Nobel por los trabajos experimentales que probaron el carácter ondulatorio de los mismos electrones.

Enterado de los trabajos de Einstein y de Broglie, E. Schrödinger se propuso construir una ecuación para una función de onda que rigiera el comportamiento de las ondas de de Broglie asociadas a partículas. Buscaba una descripción que sirviera no sólo para las partículas libres,

sino también las ligadas a un centro atractivo, como los electrones atómicos, y su famosa ecuación, que dio a conocer en 1926, produjo de inmediato resultados correctos para una gran cantidad de problemas atómicos, moleculares, etc.

¿Qué clase de ondas?

Pero ahora surge la pregunta: de qué son estas ondas representadas por la función de onda, estas ondas que según de Broglie acompañan al electrón y le sirven de guía? He aquí una pregunta nada trivial; un par de observaciones muy simples bastarán para darnos cuenta de ello.

Según la fórmula de de Broglie $\lambda = h/p = h/mv$, la longitud de onda asociada

a un electrón es inversamente proporcional a su velocidad, de manera que depende de su estado de movimiento, o mejor dicho, del movimiento *relativo* entre el electrón y el laboratorio (o entre el electrón y el cristal, por ejemplo, en un experimento de difracción). Luego no se trata de una onda intrínseca al electrón.

Pero, por otro lado, según la ecuación de Schrödinger, la función de onda $\psi(x)$ asociada al electrón depende de las condiciones de frontera a las que está sujeto el sistema. Esto indica que hay efectos *no locales* sobre el movimiento; por ejemplo un electrón que se mueve en una cierta región del espacio *registra* (por medio de la onda) la presencia de un obstáculo, una rendija, etc. en otra región (conectada) del espacio sin necesidad de pasar por ella.

Schrödinger mismo ofreció una interpretación física de la función de onda que difiere de la idea original de de Broglie; pensó en un principio que el cuadrado de esta función puede representar la densidad electrónica en el espacio. Pero al poco tiempo esta interpretación fue descartada —porque los electrones siguen siendo partículas de pequeñísimo tamaño, mientras que la función ψ tiende a extenderse a todo el espacio accesible— y sustituida por la que propuso Max Born, según la cual el cuadrado de ψ representa la densidad de *probabilidad* electrónica, es decir, determina cómo se distribuyen los electrones en el espacio.

Nadie puede negar que Born tenga razón. Por ejemplo, si en una larga serie de experimentos equivalentes se mide la posición de los electrones, se reproduce el cuadrado de la ψ correspondiente. Esto le da un sentido estadístico a la función de onda, pero también la desprovee de su contenido físico. ¿Cómo puede entenderse una *onda de probabilidad* difractada por un cristal?

Las interpretaciones de ψ que ganaron terreno con la consolidación de la mecánica cuántica se fueron apartando más y más de las nociones realistas iniciales de de Broglie, Einstein y Schrödinger, y se fueron haciendo cada vez más abstractas o hasta subjetivas, al grado de que para no pocos físicos, y no representa más que el estado de ignorancia del observador.⁴

De manera que seguimos en la misma situación: sin saber de qué naturaleza física es la onda asociada a la partícula. Pero ahora con el agravante de que se cuestiona la legitimidad de la pregunta misma.

El electrón interfiere con...

Mientras tanto las manifestaciones ondulatorias del electrón se multiplican en el laboratorio. Se logran producir haces coherentes, más o menos 'monocromáticos', de electrones; se determina con alta precisión su longitud de onda; se desarrolla la óptica electrónica y se construye el microscopio electrónico. Se realizan con electrones el experimento de las dos rendijas —el famoso experimento de interferencia de Young— y todos los experimentos clásicos que en el siglo pasado condujeron al triunfo de la teoría ondulatoria de la luz. Se desarrollan la interferometría y la holografía electrónica. Cada nuevo experimento es una confirmación adicional de la hipótesis de de Broglie; pero cada nuevo experimento es también un reto a nuestro entendimiento del fenómeno cuántico.

Una pregunta que surgió una y otra vez a la luz de estas observaciones es: ¿por qué algunas veces el electrón se comporta como onda, y otras como partícula? Tomemos el clásico ejemplo del experimento de las dos rendijas, el que, según una famosa frase de R. Feynman, "es absolutamente imposible de explicar clásicamente,⁵ y contiene el corazón de la mecánica cuántica". En este sencillo experimento, el haz de electrones pasa por las dos ranuras e incide sobre una pantalla formando el típico patrón de interferencia con zonas alternas de superposición constructiva y destructiva, como se ilustra esquemáticamente en la figura 1: los electrones fueron enviados

inicialmente como partículas, pero se comportaron después como ondas.

Se han realizado muchas variantes de este experimento, con resultados similares. Lo interesante fue cuando se aprendió a controlar la emisión electrónica de manera que se pudo regular la intensidad del haz. Resulta que al disminuirse la intensidad lo suficiente, deja de observarse el patrón de interferencia y aparece una imagen granular, formada por los electrones conforme inciden uno a uno erráticamente sobre la pantalla (Figura 2). Si se prolonga el experimento, pero *sin cambiar* las condiciones, se puede observar la formación gradual del patrón de interferencia. De aquí puede concluirse que los electrones nunca dejan de comportarse como partículas con un movimiento individual impredecible aunque un conjunto estadístico de ellas exhibe el patrón ondulatorio perfectamente regular y determinista.

Pero estos experimentos conducen a otra observación interesante. A muy bajas intensidades podemos estar seguros de que normalmente no hay más de un electrón en vuelo entre la fuente y la pantalla; en consecuencia, la interferencia no se realiza entre los electrones del haz... pero entonces, ¿entre quiénes se realiza? Ante esta situación, se ha corrido la voz entre los físicos de que "el electrón interfiere consigo mismo".

...y también los neutrones interfieren...

Las cosas no se han quedado ahí. En 1974 se inició la interferometría de neutrones, empleando para ello un monocristal recortado de dimensiones macroscópicas (10x7x7 cm) que divide en dos partes un haz de neutrones y superpone después las partes produciendo su interferencia (Figura 3). Los neutrones son partículas con masa y espín, al igual que los electrones, aunque no poseen carga eléctrica. Normalmente se emplea como fuente de neutrones el combustible de un reactor nuclear; el flujo de neutrones detectados es tan bajo que, una vez más, se considera a los fenómenos observados en el interferómetro como producto de la "autointerferencia" del neutrón. Se pueden producir diversos fenómenos de interferencia, según la naturaleza del objeto que se inserte en el camino de uno de los haces (Figura 3).

Los resultados de los experimentos son espectaculares, y no dejan de sorprender, a pesar de que verifican al pie de la letra las predicciones de la mecánica cuántica. Por ejemplo, con la introducción de una placa retardadora (un material transparente) se obtiene un típico patrón de interferencia espacial como el dibujado en la figura 1. Con la inserción adicional de un imán en uno de los caminos se altera tan profundamente el comportamiento del sistema, que el resultado se interpreta como producto de la modificación del estado de espín de todos los neutrones aun de los que no pasan por la zona del imán.

Ondas de vacío

Antes de ofrecer una posible explicación de la naturaleza física de la onda representada por ψ , regresamos una vez más a de Broglie.

En sus trabajos relacionados con el tema, de Broglie consideraba que a cada corpúsculo cuántico acompaña una onda de fase de muy alta frecuencia⁶, la que a través del fenómeno Doppler⁷ da origen a una modulación (la onda de de Broglie) que satisface la fórmula $\lambda = h/p$. Sin embargo, como ya hemos visto, para que este efecto pueda darse, se requiere de un sistema de referencia respecto al cual se especifica el movimiento del corpúsculo; en otras palabras, la onda de de Broglie es un efecto relativo de naturaleza cinemática, relacionado con la onda estacionaria asociada a la partícula en movimiento y descrita desde un sistema en reposo respecto al observador. No deja de ser un tanto extraño que esta on-

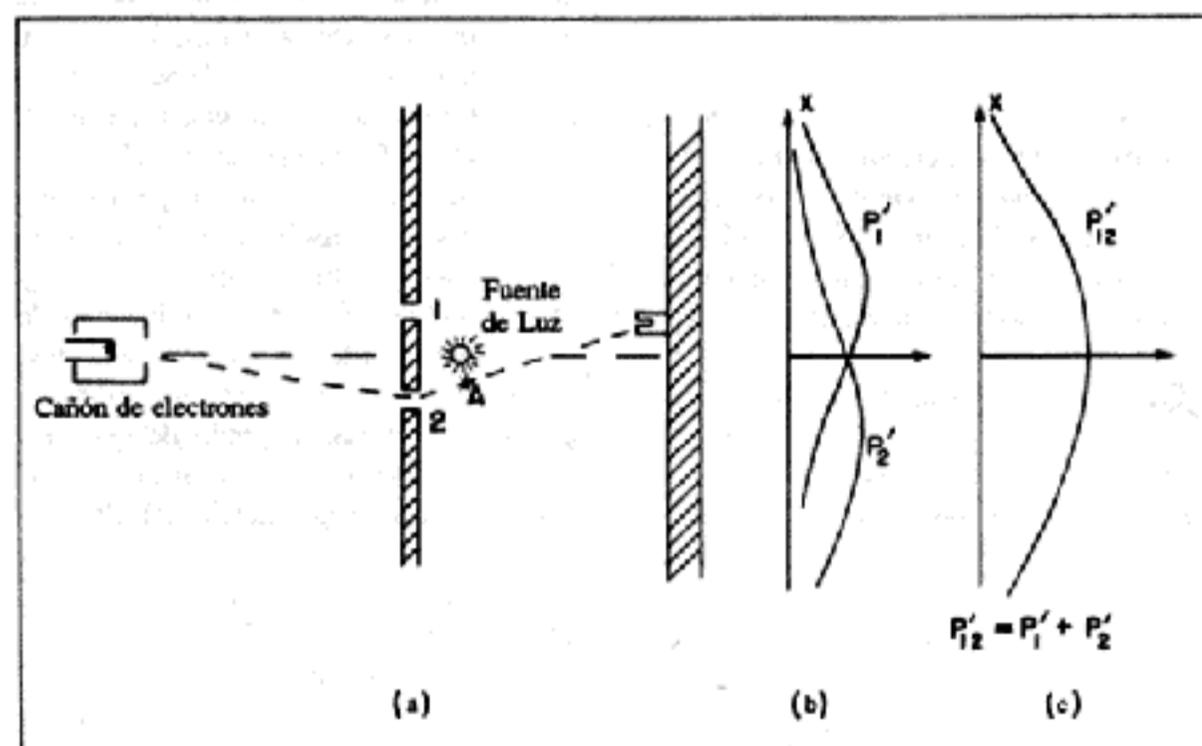


Figura 1. Esquema de un experimento de difracción de electrones por dos rendijas.

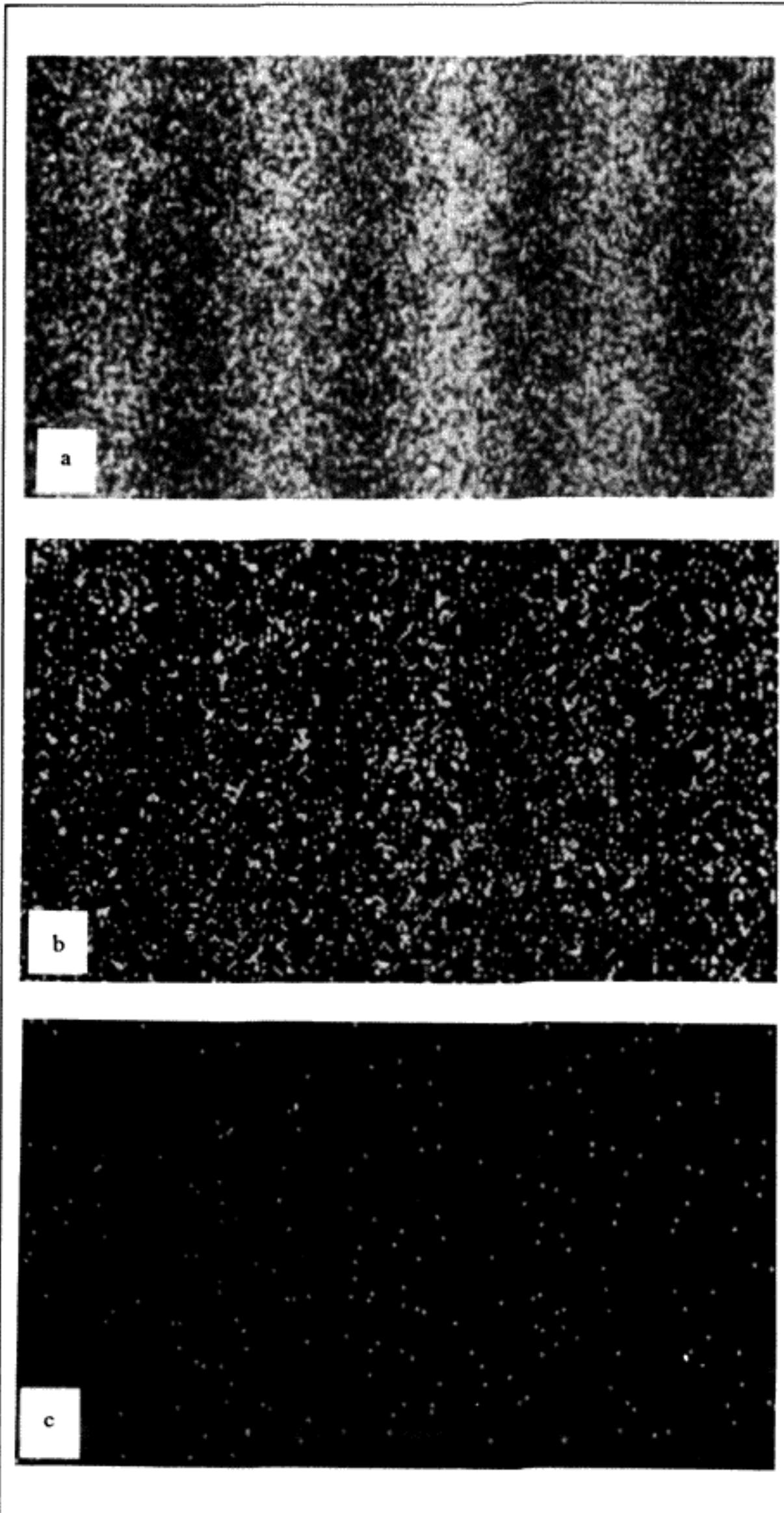


Figura 2. Estructura granular del patrón de interferencia de electrones obtenido mediante un microscopio electrónico. En (a) se emplearon 70000 electrones; en (b), 3000; en (c), 100. (Tomado de *American Journal of Physics* 57 (1989), pag. 120).

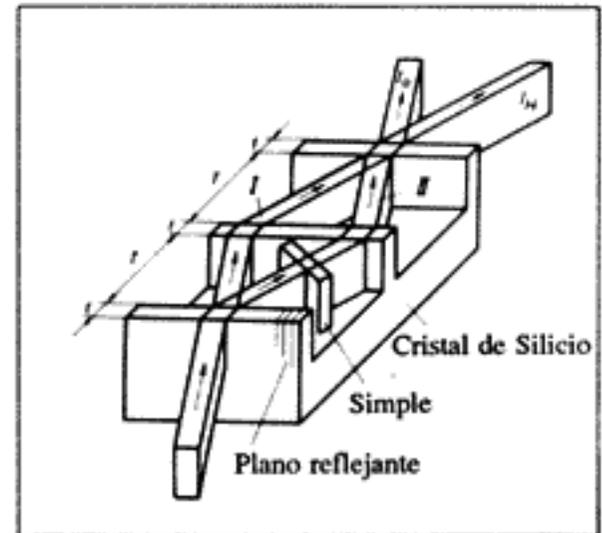
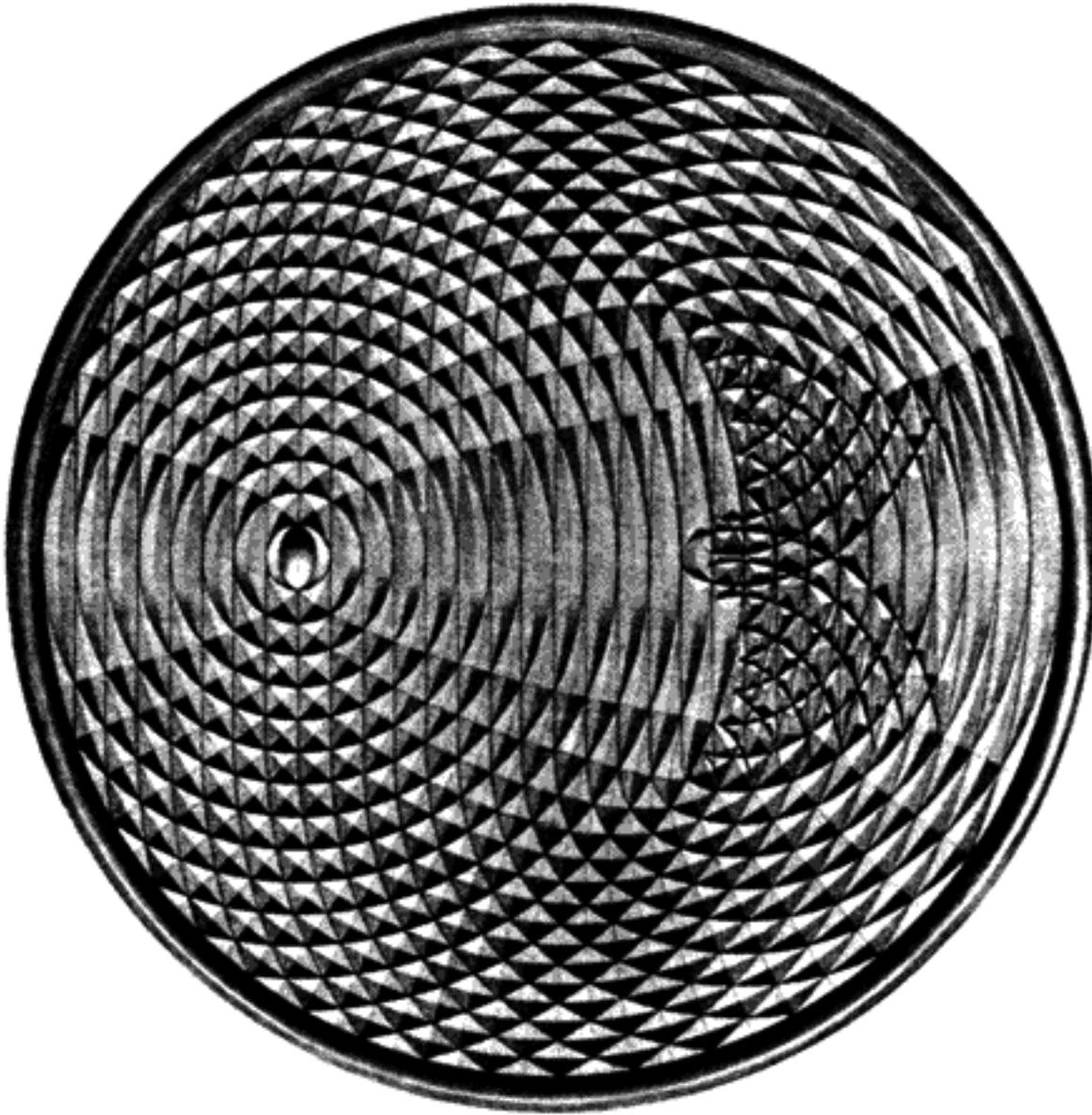


Figura 3. Diagrama esquemático de un interferómetro de neutrones construido con un monocristal de silicio.

da tan mal definida desde sus inicios y nunca bien conocida, se convierte en elemento central de la teoría cuántica, al comprobarse que ella satisface la ecuación de Schrödinger, la más importante de las ecuaciones que rigen el comportamiento de los electrones y todos los otros corpúsculos.

En los últimos tiempos ha comenzado a esbozarse un posible camino de solución a este problema, con la ayuda de una teoría que hace uso del postulado de que el espacio está ocupado por campos de fondo reales, de diversas naturalezas, cuyo valor instantáneo varía constantemente de manera azarosa e impredecible. Aunque esta idea pueda parecer extraña en un principio, es congruente con las concepciones cuánticas contemporáneas. Naturalmente la materia, al conectarse a estos campos, adquiere un movimiento azaroso o, en lenguaje más técnico, estocástico.

De los diversos campos que pueden concebirse como llenando el vacío, el verdaderamente importante para nuestra discusión es el electromagnético⁸. En la teoría llamada *electrodinámica estocástica* se intenta demostrar que es la interacción entre este vacío fluctuante electromagnético y los electrones atómicos, lo que da a los átomos su estabilidad y todas sus propiedades cuánticas, incluido el espín. Dicho de otra forma, los electrones no son cuánticos *per se*, sino por su interacción con el campo electromagnético de fondo. Entonces también es de esperarse que las propiedades ondulatorias no sean intrínsecas de las partículas, sino una manifestación de su interacción con este campo de fondo. Aunque el programa de la electrodinámica estocástica no se ha cumplido cabalmente, podemos afirmar que algunos de sus resultados le dan credibilidad sufi-



ciente como para hacerla atractiva y plausible. Veamos cómo abordar el problema del origen de la onda de de Broglie desde la perspectiva de esta teoría.

Cuando se estudia el electrón como una partícula relativista en interacción con el vacío electromagnético, usando para ello los modelos más simples posibles, se encuentra que el electrón se pone a vibrar con frecuencia muy alta, dependiendo un tanto del modelo, puede ser más o menos cercana o incluso coincidir con la frecuencia ω^s antes mencionada.

De hecho, este resultado no es en sí novedoso, pues recuerda un familiar fenómeno relativista de las partículas cuánticas conocido por su nombre alemán de *zitterbewegung*, que podemos traducir libremente como bailoteo. Sin embargo, en el nuevo contexto esto significa que el electrón vibrante interactúa con las ondas del campo electromagnético de vacío de alta frecuencia ω^s , y la sobreposición de estas ondas con sus frecuencias desplazadas por efecto Doppler da lugar a una onda modulada, que coincide justamente con la onda de de Broglie.

Lo interesante es que la teoría usual de las ondas electromagnéticas, al ser empleada para la descripción de esta onda modulada, conduce de manera natural a la ecuación de Schrödinger. El cálculo en sí es viejo, pero la física es nueva: la onda de de Broglie queda identificada como una onda electromagnética del campo de punto cero, a la que se acopla el electrón según su particular estado de movimiento. Como esta onda recibe influencias de los bordes, obstáculos, etc., las que a su vez transmite al electrón, le imprime a la partícula un comportamiento caprichoso y una respuesta aparentemente no local frente a las condiciones del entorno. Esta onda puede difractarse, interferir, etc., y el electrón acoplado a ella exhibirá, estadísticamente hablando, los efectos de tales fenómenos ondulatorios. Naturalmente, sin haber perdido en lo absoluto su carácter de partícula.

Una característica atractiva de la presente explicación, aparte del hecho de darle un sentido físico concreto a uno de los elementos fundamentales de la teoría cuántica, es que en ella aparecen reunidos

diversos aspectos conocidos de la física que tradicionalmente son considerados ajenos entre sí: la dinámica relativista y su característico *zitterbewegung*, la onda de fase asociada a la partícula, el campo de vacío, etc.

A la vez que esta teoría explica las propiedades ondulatorias del electrón como un fenómeno físico real debido al acoplamiento del electrón con el campo de vacío de muy altas frecuencias, la interacción con las componentes de bajas frecuencias ópticas o similares determina el comportamiento típicamente cuántico del electrón como corpúsculo, de acuerdo con la teoría usual de la electrodinámica estocástica. De esta manera, la dualidad onda-corpúsculo tan característica de la mecánica cuántica, tan inexorable, tiene como origen la coexistencia del corpúsculo y del campo, cada uno de éstos contribuyendo con sus propiedades esenciales. ♦

Notas:

1. Esta afirmación es un tanto esquemática, y corresponde más a la versión popular que a los hechos. En realidad, durante sus últimos trabajos sobre óptica, Newton elaboró una teoría de la luz muy compleja, que combinaba corpúsculos con ondas, con el objeto de dar cuenta de una gama lo más amplia posible de los fenómenos por él conocidos.
2. Más ilustrativa aún de la situación en que se encontraban los físicos de la época es una frase posterior del propio Bragg: 'La teoría clásica se usaba los lunes, miércoles y viernes, mientras que los martes, jueves y sábados se usaba la teoría cuántica de la radiación' (antes de que los científicos ingleses adoptaran la semana inglesa de trabajo).
3. La relación entre estas dos expresiones es muy estrecha, pues al corpúsculo luminoso (fotón en el lenguaje actual) de energía E corresponde una cantidad de movimiento p dada por la relatividad como $p=E/c$, donde c es la velocidad de propagación de la luz en el vacío; luego $p=hv/c=h/\lambda$, puesto que $\lambda h=c$.
4. A este tipo de interpretaciones se refería Schrödinger cuando habló despectivamente de la ψ -cología.
5. Clásicamente quiere decir aquí: según las leyes de la probabilidad aplicadas al movimiento de partículas clásicas.
6. Esta frecuencia viene dada por la expresión $\omega_c = mc^2/\hbar$, que da valores extraordinariamente altos, muchos órdenes de magnitud arriba de lo que la tecnología contemporánea permite artificialmente.
7. Este es el conocido efecto por el cual oímos que la frecuencia de una sirena cambia de tono conforme se acerca o aleja de nosotros.
8. El vacío electromagnético o *campo de punto cero* es un campo remanente, que persiste aun en ausencia de fuentes; es el que aparece representado por el término atérmico (independiente de la temperatura) en la fórmula completa de Planck para la distribución de la radiación del cuerpo negro.