

Comportamiento cuántico

Mecánica atómica

En los últimos capítulos hemos discutido las ideas esenciales necesarias para una comprensión de la mayoría de los fenómenos luminosos importantes, o de la radiación electromagnética en general. (Hemos dejado unos pocos temas especiales para el próximo año. Concretamente, la teoría del índice de refracción de los materiales densos y la reflexión total interna.) Lo que hemos tratado se denomina «teoría clásica» de las ondas eléctricas, que resulta ser una descripción muy adecuada de la naturaleza para muchos efectos. No hemos tenido que preocuparnos todavía por el hecho de que la energía luminosa se da en porciones o «fotones».

Como nuestro siguiente tema, nos gustaría abordar el problema del comportamiento de pedazos de materia relativamente grandes: sus propiedades mecánicas y térmicas, por ejemplo. Al discutir éstas, encontraremos que la teoría «clásica» (o más antigua) falla casi de inmediato, porque la materia está hecha realmente de partículas de tamaño atómico. Seguiremos tratando sólo con la parte clásica, porque esa es la única parte que podemos entender utilizando la mecánica clásica que hemos estado aprendiendo. Pero no tendremos mucho éxito. Veremos que en el caso de la materia, a diferencia del caso de la luz, nos encontraremos en dificultades relativamente pronto. Podríamos, por supuesto, prescindir sistemáticamente de los efectos atómicos, pero en lugar de ello insertaremos aquí una pequeña digresión en la que describiremos las ideas básicas de las propiedades cuánticas de la materia, es decir, las ideas cuánticas de la física atómica, de modo que ustedes podrán hacerse una idea de lo que estamos omitiendo. Pues, en efecto, tendremos que dejar fuera algunos temas importantes aunque inevitablemente nos acerquemos a ellos.

Así pues, daremos ahora una *introducción* al tema de la mecánica cuántica, pero no seremos realmente capaces de profundizar en el tema hasta mucho más tarde.

La «mecánica cuántica» es la descripción del comportamiento de la materia en todos sus detalles y, en particular, de lo que sucede a escala atómica. Las cosas a una escala muy pequeña no se comportan como nada de lo que ustedes tengan experiencia directa. No se comportan como ondas, no se comportan como partículas, no se comportan como nubes, o como bolas de billar, o como pesos colgados de muelles, o como nada que ustedes hayan visto alguna vez.

Newton pensaba que la luz estaba hecha de partículas, pero luego se descubrió, como hemos visto aquí, que se comporta como una onda. Sin embargo, posteriormente (a comienzos del siglo XX) se encontró que la luz sí se comportaba a veces como una partícula. En épocas pasadas se pensaba que el electrón, por ejemplo, se comportaba como una partícula, y luego se encontró que en muchos aspectos se comportaba como una onda. Así que realmente no se comporta como ninguna de las dos cosas. Ahora hemos cedido. Decimos: «No es *ni* una cosa *ni* otra».

Hay, no obstante, una feliz circunstancia: los electrones se comportan exactamente igual que la luz. El comportamiento cuántico de los objetos atómicos (electrones, protones, neutrones, fotones y demás) es el mismo para todos; todos son «partículas-ondas», o como quiera que ustedes prefieran llamarlos. Así que lo que aprendamos sobre las propiedades de los electrones (que utilizaremos como ejemplos) se aplicará también a todas las «partículas», incluyendo los fotones de la luz.

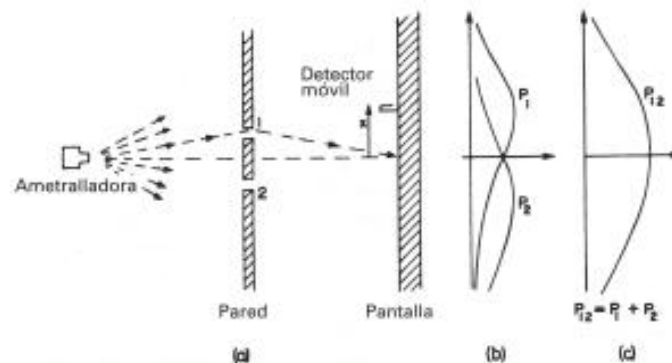
La acumulación gradual de información sobre el comportamiento atómico y a pequeña escala durante el primer cuarto de este siglo, que proporcionó algunos indicios sobre el comportamiento de las cosas pequeñas, produjo una confusión cada vez mayor que fue resuelta finalmente en 1926 y 1927 por Schrödinger, Heisenberg y Born. Estos obtuvieron finalmente una descripción consistente del comportamiento de la materia a pequeña escala. Abordaremos las principales características de esta descripción en este capítulo.

Puesto que el comportamiento atómico es tan diferente de la experiencia ordinaria, resulta muy difícil acostumbrarse a él y se presenta como algo peculiar y misterioso para todos, tanto para el novato como para el físico avezado. Ni siquiera los expertos lo entienden tan bien como quisieran, y es perfectamente razonable que no lo hagan porque toda la experiencia y la intuición humana directa se aplican a objetos grandes. Sabemos cómo actuarán los objetos grandes, pero las cosas a pequeña escala no actúan de ese modo. Así que tenemos que aprender acerca de ellas de manera abstracta o imaginativa y no mediante una conexión con nuestra experiencia directa.

En este capítulo nos encontraremos inmediatamente con el elemento básico del misterioso comportamiento en su forma más extraña. Decidimos examinar un fenómeno que es imposible, *absolutamente* imposible, de explicar de cualquier forma clásica, y que contiene el corazón de la mecánica cuántica. En realidad, contiene el *único* misterio. No podemos explicar el misterio en el sentido de «explicar» cómo funciona. Les *contaremos* cómo funciona. Para contarles cómo funciona tendremos que hablarles de las peculiaridades básicas de toda la mecánica cuántica.

Un experimento con balas

Para tratar de entender el comportamiento cuántico de los electrones, compararemos y contrastaremos su comportamiento, en un montaje experimental concreto, con el comportamiento más familiar de partículas tales como balas y con el comportamiento de ondas tales como las ondas de agua. Consideremos primero el comportamiento de las balas en el montaje experimental mostrado esquemáticamente en la figura 6.1. Tenemos una ametralladora que dispara un chorro de balas. No es una ametralladora muy buena, pues las balas se dispersan (aleatoriamente) sobre una extensión angular bastante grande, tal como se indica en la figura. Frente a la ametralladora tenemos una pared (constituida por una lámina acorazada) que tiene dos agujeros del tamaño suficiente para permitir el paso de una bala. Detrás de la pared hay una pantalla (digamos una pared gruesa de madera) que «absorberá» las balas cuando incidan en ella. Delante de la pantalla tenemos un objeto que llamaremos un «detector» de balas. Podría ser una caja que contenga arena. Cualquier bala que entre en el detector quedara frenada y almacenada. Cuando lo deseemos, podemos vaciar la caja y contar el número de balas que han sido recogidas. El detector puede moverse de un lado a otro (en lo que denominaremos la dirección x).



6.1 Experimento de interferencia con balas.

Con este aparato podemos encontrar experimentalmente la respuesta a la pregunta: «¿Cuál es la probabilidad de que una bala que pasa a través de los agujeros de la pared llegue a un punto de la pantalla situado a una distancia x del centro?». En primer lugar, ustedes deben darse cuenta de que tenemos que hablar de probabilidad, porque no podemos decir categóricamente dónde irá a parar cada bala concreta. Una bala que incida por casualidad en uno de los agujeros puede rebotar en los bordes del mismo y terminar en cualquier parte. Por «probabilidad» entendemos las posibilidades de que la bala llegue al detector, que podemos medir contando el número de balas que llegan al detector en un intervalo de tiempo dado y tomando luego el cociente entre este número y el número *total* de balas que inciden en la pantalla durante este tiempo. O, si suponemos que la ametralladora dispara siempre al mismo ritmo durante las medidas, la probabilidad que buscamos es simplemente proporcional al número de balas que llegan al detector en un intervalo de tiempo estándar.

Para nuestros propósitos actuales nos gustaría imaginar un experimento algo idealizado en el que las balas no son balas reales, sino que son balas *indestructibles*,

que no pueden partirse en dos. En nuestro experimento encontramos que las balas siempre llegan en porciones, y cuando encontramos algo en el detector, se trata siempre de una bala entera. Si el ritmo al que dispara la ametralladora se hace muy lento, encontramos que en cualquier instante dado o bien no llega nada o bien llega una y sólo una exactamente una bala a la pantalla. Además, el tamaño de la porción no depende del ritmo de disparo de la ametralladora. Diremos: «Las balas llegan *siempre* en porciones idénticas». Lo que medimos con nuestro detector es la probabilidad de llegada de una porción. Y medimos la probabilidad como una función de x . El resultado de tales medidas con este aparato (aún no hemos hecho el experimento, de modo que en realidad estamos imaginando el resultado) se representa en la gráfica dibujada en la parte (c) de la figura 6.1. En la gráfica representamos la probabilidad hacia la derecha y x en vertical, de modo que la escala x se ajusta al diagrama del aparato. Llamaremos a esta probabilidad P_{12} porque las balas pueden haber atravesado el agujero 1 o el agujero 2. Ustedes no se sorprenderán de que P_{12} sea alta cerca del centro de la gráfica y se haga pequeña si x es muy grande. Ustedes pueden preguntarse, sin embargo, por qué P_{12} tiene su valor máximo en $x = 0$. Podemos entender este hecho si repetimos nuestro experimento después de tapar el agujero 2 y lo volvemos a repetir mientras está tapado el agujero 1. Cuando el agujero 2 está tapado, las balas sólo pueden pasar a través del agujero 1, y obtenemos la curva marcada P_1 en la parte (b) de la figura. Como ustedes esperarían, el máximo de P_1 ocurre en el valor de x que está alineado con la ametralladora y el agujero 1. Cuando el agujero 1 está cerrado, obtenemos la curva simétrica P_2 dibujada en la figura. P_2 es la distribución de probabilidad para las balas que pasan a través del agujero 2. Comparando las partes (b) y (c) de la figura 6.1, encontramos el importante resultado de que

$$P_{12} = P_1 + P_2 \quad (6.2)$$

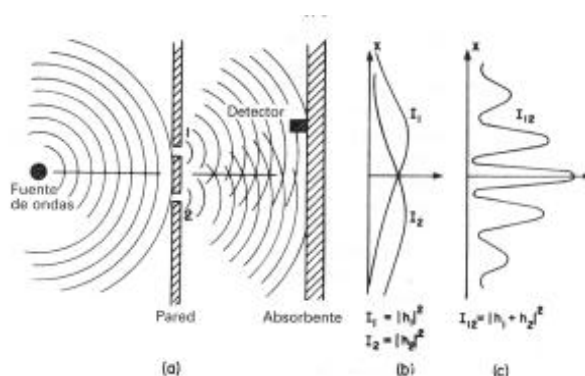
Las probabilidades simplemente se suman. El efecto cuando ambos agujeros están abiertos es la suma de los efectos con cada agujero abierto por separado. Llamaremos a este resultado una observación de «*ausencia de interferencia*», por una razón que verán más adelante. Hasta aquí lo relativo a las balas. Ellas llegan en porciones, y su probabilidad de llegada no muestra interferencia.

Un experimento con ondas

Ahora queremos considerar un experimento con ondas de agua. El aparato se muestra esquemáticamente en la figura 6.3. Tenemos una cubeta profunda de agua. Un pequeño objeto etiquetado como «fuente de ondas» oscila verticalmente movido por un motor y produce ondas circulares. A la derecha de la fuente tenemos de nuevo una pared con dos agujeros, y más allá de ella hay una segunda pared que, para simplificar las cosas, es un «absorbente», de modo que no hay reflexión de las ondas que llegan a ella. Puede hacerse construyendo una «playa» de arena en pendiente. Delante de la playa colocamos un detector que puede moverse de un lado a otro en la dirección x , como antes. El detector es ahora un dispositivo que mide la «intensidad» del

movimiento del agua. Ustedes pueden imaginar un aparato que mida la altura del movimiento del agua pero cuya escala esté calibrada en proporción al *cuadrado* de la altura real, de modo que la lectura sea proporcional a la intensidad de la onda. Nuestro detector lee entonces en proporción a la *energía* transportada por la onda; o más bien, al ritmo al que la energía es transportada al detector.

Lo primero que hay que notar, con nuestro aparato de ondas, es que la intensidad puede tener *cualquier* valor. Si el movimiento de la fuente es muy pequeño, entonces hay solamente un movimiento muy pequeño de ondas en el detector. Cuando hay más movimiento en la fuente, hay más intensidad en el detector. La intensidad de la onda puede tener cualquier valor. *No* diríamos que haya «saltos» en la intensidad de la onda.



6.3 Experimento de interferencia con ondas de agua.

Midamos ahora la intensidad de la onda para varios valores de x (manteniendo siempre igual la actividad de la fuente de ondas). Obtenemos la interesante curva marcada I_{12} en la parte (c) de la figura.

Ya hemos calculado cómo pueden surgir tales figuras cuando estudiamos la interferencia de las ondas eléctricas. En este caso observaríamos que la onda original se difracta en los agujeros, y nuevas ondas circulares se dispersan a partir de cada agujero. Si tapamos un agujero cada vez y medimos la distribución de intensidades en el absorbente encontraremos las curvas de intensidad bastante simples mostradas en la parte (b) de la figura. I_1 es la intensidad de la onda procedente del agujero 1 (la que encontramos midiendo cuando el agujero 2 está bloqueado) e I_{12} es la intensidad de la onda procedente del agujero 2 (vista cuando el agujero 1 está bloqueado).

La intensidad I_{12} observada cuando ambos agujeros están abiertos no es ciertamente la suma de I_1 e I_2 . Decimos que hay «interferencia» de las dos ondas. En algunos lugares (donde la curva I_{12} tiene sus máximos) las ondas están «en fase» y los picos de las ondas se suman para dar una gran amplitud y, por consiguiente, una gran intensidad. Decimos que las dos ondas están «interfiriendo constructivamente» en tales lugares. Habrá tal interferencia constructiva donde quiera que la distancia desde el detector a un agujero sea un número entero de longitudes de onda mayor (o menor) que la distancia desde el detector al otro agujero.

En aquellos lugares donde las dos ondas llegan al detector con una diferencia de fase de π (donde están en «oposición de fase») el movimiento ondulatorio resultante en el detector será la diferencia de las dos amplitudes. Las ondas «interfieren

destruictivamente» y obtenemos un valor pequeño para la intensidad de la onda. Esperamos estos valores pequeños donde quiera que la distancia entre el agujero 1 y el detector difieren de la distancia entre el agujero 2 y el detector en un número impar de semilongitudes de onda. Los bajos valores de I_{12} en la figura 6.3 corresponden a los lugares donde las dos ondas interfieren destructivamente.

Recordarán ustedes que la relación cuantitativa entre I_1 , I_2 e I_{12} puede expresarse de la siguiente forma: la altura instantánea de la onda de agua en el detector para la onda procedente del agujero 1 puede escribirse como (la parte real de) $\hat{h}_1 e^{i\omega t}$, donde la «amplitud» $\hat{h}_1$ es, en general, un número complejo. La intensidad es proporcional a la altura media al cuadrado o, cuando utilizamos los números complejos, a $|\hat{h}_1|^2$. Análogamente, para el agujero 2 la altura es $\hat{h}_2 e^{i\omega t}$ y la intensidad es proporcional a $|\hat{h}_2|^2$. Y cuando ambos agujeros están abiertos, las alturas de las ondas se suman para dar la altura $(\hat{h}_1 + \hat{h}_2) e^{i\omega t}$ y la intensidad $|\hat{h}_1 + \hat{h}_2|^2$. Omitiendo la constante de proporcionalidad para nuestro propósito actual, las relaciones adecuadas para las ondas que interfieren son

$$I_1 = |\hat{h}_1|^2, \quad I_2 = |\hat{h}_2|^2, \quad I_{12} = |\hat{h}_1 + \hat{h}_2|^2 \quad (6.4)$$

Notarán ustedes que el resultado es completamente diferente del que se obtenía con balas (6.2). Si desarrollamos $|\hat{h}_1 + \hat{h}_2|^2$ vemos que

$$|\hat{h}_1 + \hat{h}_2|^2 = |\hat{h}_1|^2 + |\hat{h}_2|^2 + 2 |\hat{h}_1| |\hat{h}_2| \cos \delta \quad (6.5)$$

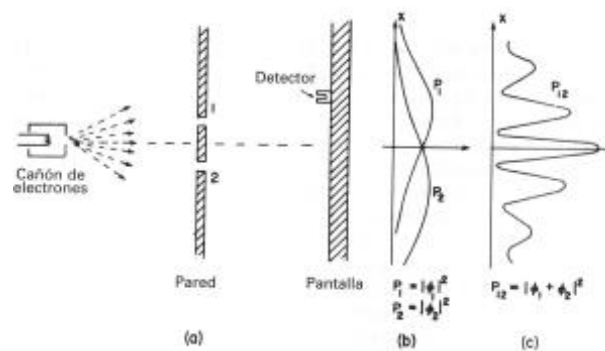
donde δ es la diferencia de fases entre $\hat{h}_1$ y $\hat{h}_2$. En términos de intensidades escribiríamos

$$I_{12} = I_1 + I_2 + 2 (I_1 I_2)^{1/2} \cos \delta \quad (6.6)$$

El último término en (6.6) es el «término de interferencia». Hasta aquí lo relativo a las ondas de agua. La intensidad puede tener cualquier valor, y muestra interferencia.

Un experimento con electrones

Imaginemos ahora un experimento similar con electrones. Se muestra esquemáticamente en la figura 6.7. Tenemos un cañón de electrones que consiste en un filamento de tungsteno calentado mediante una corriente eléctrica y rodeado por una caja metálica con un agujero. Si el filamento está a un voltaje negativo con respecto a la caja, los electrones emitidos por el filamento serán acelerados hacia las paredes y algunos pasarán a través del agujero. Todos los electrones que salgan del cañón tendrán (aproximadamente) la misma energía. Frente al cañón hay de nuevo una pared (simplemente una placa metálica delgada) con dos agujeros. Detrás de la pared hay otra placa que servirá de «pantalla». Delante de la pantalla colocamos un detector móvil. El detector podría ser un contador geiger o, quizá mejor, un multiplicador electrónico, que está conectado a un altavoz.



6.7 Experimento de interferencia con electrones.

Habría que decir antes de seguir que ustedes no deberían tratar de montar este experimento (como podrían haber hecho con los dos que ya hemos descrito). Este experimento nunca ha sido realizado exactamente así. La dificultad está en que el aparato tendría que construirse a una escala imposiblemente pequeña para mostrar los efectos en los que estamos interesados. Estamos realizando un «experimento mental», que hemos escogido porque es fácil de imaginar. Sabemos los resultados que se *obtendrían* porque se *han* realizado muchos experimentos en los que la escala y las proporciones han sido escogidas para mostrar los efectos que vamos a describir.

Lo primero que notamos con nuestro experimento con electrones es que oímos «clicks» agudos procedentes del detector (esto es, del altavoz). Y todos los «clicks» son iguales. No hay «medios clicks».

Deberíamos notar también que los «clicks» se producen de forma muy errática. Algo parecido a: click... click click... click... click... click click... click..., etc., como, sin duda, ustedes habrán oído en un contador geiger en acción. Si contamos los clicks que llegan durante un intervalo de tiempo suficientemente largo digamos muchos minutos y luego los contamos de nuevo durante otro periodo de tiempo igual, encontramos que los dos números son aproximadamente iguales. De este modo podemos hablar del *ritmo promedio* al que se oyen los clicks (tantos y tantos clicks por minuto en promedio).

Cuando desplazamos el detector, el *ritmo* con el que aparecen los clicks se hace más rápido o más lento, pero el tamaño (el ruido) de cada click es siempre el mismo. Si bajamos la temperatura del filamento en el cañón, el ritmo de clicks disminuye, pero cada click sigue sonando igual. Tendríamos que notar también que si colocamos dos detectores separados en la pantalla, uno u otro hará click, pero nunca los dos a la vez. (Salvo que, de cuando en cuando, si hubiera dos clicks muy próximos en el tiempo, nuestro oído quizá no notase la separación.) Concluimos, por consiguiente, que sea lo que sea lo que llega a la pantalla lo hace en «porciones». Todas las «porciones» son del mismo tamaño: sólo llegan «porciones» enteras, y llegan a la pantalla de una en una. Diremos: «Los electrones llegan siempre en porciones idénticas».

Podemos proceder ahora de la misma forma que hicimos en nuestro experimento con balas para encontrar experimentalmente la respuesta a la pregunta: «¿Cuáles son las probabilidades relativas de que una «porción» electrónica llegue a la pantalla a diferentes distancias x del centro?». Como antes, obtenemos la probabilidad relativa observando el ritmo de clicks mientras se mantiene constante la actividad del cañón.

La probabilidad de que llegue una porción a un x concreto es proporcional al ritmo promedio de clicks en dicho x .

El resultado de nuestro experimento es la interesante curva señalada P_{12} en la parte (c) de la figura 6.7. ¡Sí! Así es como funcionan los electrones.

La interferencia de las ondas electrónicas

Tratemos ahora de analizar la curva de la figura 6.7 para ver si podemos entender el comportamiento de los electrones. Lo primero que tendríamos que decir es que, puesto que llegan en porciones, cada porción, que podemos llamar un electrón, ha atravesado o bien el agujero 1 o bien el agujero 2. Escribamos esto en forma de una «Proposición»:

Proposición A: cada electrón *y* atraviesa el agujero 1 o atraviesa el agujero 2. (6.8)

Aceptando la Proposición A, todos los electrones que llegan a la pantalla pueden dividirse en dos clases: 1) los que han *atravesado* el agujero 1, y 2) los que han *atravesado* el agujero 2. Nuestra curva observada debe ser entonces la suma de los efectos de los *electrones que atraviesan el* agujero 1 y los electrones que *atraviesan el* agujero 2. Comprobemos esta idea mediante el experimento.

En primer lugar, haremos una medida para los electrones que *atraviesan el* agujero 1. Bloqueamos el agujero 2 y hacemos nuestro recuento de clicks del detector. A partir del ritmo de recuento, obtenemos P_1 . El resultado de la medida se muestra en la curva señalada P_1 en la parte (b) de la figura 6.7. El resultado parece bastante razonable. De modo análogo medimos P_2 , la distribución de probabilidad para los electrones que *atraviesan el* agujero 2. El resultado de esta medida se muestra también en la figura.

Es evidente que el resultado P_{12} obtenido con *ambos* agujeros abiertos no es la suma de P_1 y P_2 , las probabilidades para cada agujero por separado. Por analogía con nuestro experimento con ondas de agua, decimos: «Hay interferencia».

Para electrones: $P_{12} \neq P_1 + P_2$ (6.9)

¿Cómo puede producirse una interferencia semejante? Quizá deberíamos decir: «Bien, esto significa, presumiblemente, que *no es verdad* que las porciones *atraviesen* el agujero 1 o el agujero 2, porque, si así fuera, las probabilidades deberían sumarse. Quizá siguen un camino más complicado. Se dividen por la mitad y...». Pero ¡no! No pueden, llegan siempre en porciones... «Bien, quizá algunos de ellos pasan a través de 1, y luego vuelven a pasar a través de 2, y luego vuelven algunas veces más, o por algún otro camino complicado... entonces, al cerrar el agujero 2 cambiamos las posibilidades de que un electrón que *empezó* *atravesando* el agujero 1 llegue finalmente a la pantalla...» ¡Pero, un momento! Hay algunos puntos a los que llegan muy pocos electrones cuando *ambos* agujeros están abiertos, pero que reciben muchos electrones si cerramos un agujero, así que *cerrar* un agujero *aumenta* el

número de electrones procedentes del otro. Nótese, sin embargo, que en el centro de la figura P_{12} es más del doble de la suma $P_1 + P_2$. Es como si cerrar un agujero *disminuyese* el número de electrones que atraviesan el otro agujero. Parece difícil explicar *ambos* efectos proponiendo que los electrones viajan por caminos complicados.

Todo esto es bastante misterioso. Y cuanto más lo miren, más misterioso parece. Se han propuesto muchas ideas para tratar de explicar la curva P_{12} en términos de electrones individuales que siguen vías complicadas a través de los agujeros. Ninguna de ellas ha tenido éxito. Ninguna de ellas puede dar la curva correcta para P_{12} en términos de P_1 y P_2 .

Pero, de forma bastante sorprendente, las *matemáticas* que relacionan P_1 y P_2 con P_{12} son extraordinariamente sencillas. En efecto, P_{12} es exactamente igual que la curva I_{12} de la figura 6.3, y ésta era sencilla. Lo que está pasando en la pantalla puede describirse mediante dos números complejos que podemos llamar ϕ_1 y ϕ_2 (son funciones de x , por supuesto). El cuadrado del valor absoluto de ϕ_1 da el efecto cuando sólo el agujero 1 está abierto. Es decir, $P_1 = |\phi_1|^2$. El efecto cuando sólo el agujero 2 está abierto viene dado por ϕ_2 de la misma forma. Es decir, $P_2 = |\phi_2|^2$. Y el efecto combinado de los dos agujeros es simplemente $P_{12} = |\phi_1 + \phi_2|^2$. ¡Las *matemáticas* son las mismas que teníamos para las ondas de agua! (Es difícil ver cómo se podría obtener un resultado tan sencillo a partir de un juego complicado de electrones que van y vienen a través de la placa siguiendo alguna trayectoria extraña.)

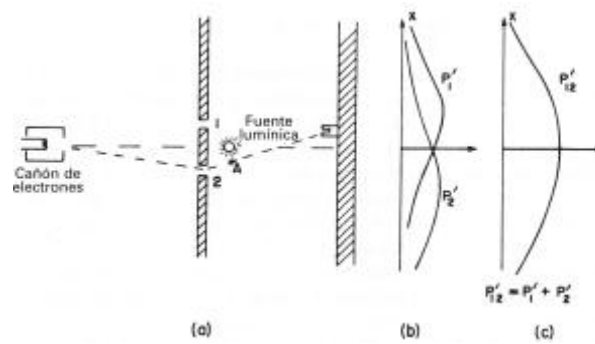
Concluimos lo siguiente: los electrones llegan en porciones, como partículas, y la probabilidad de la llegada de estas porciones se distribuye como la distribución de la intensidad de una onda. En este sentido es en el que decimos que un electrón se comporta «a veces como partícula y a veces como onda».

Dicho sea de paso, cuando estábamos tratando con ondas clásicas definíamos la intensidad como la media temporal del cuadrado de la amplitud de la onda, y utilizábamos números complejos como un truco matemático para simplificar el análisis. Pero en mecánica cuántica resulta que las amplitudes *deben* representarse con números complejos. Las partes reales solas no bastan. Este es un punto técnico, por el momento, porque las fórmulas parecen exactamente iguales.

Puesto que la probabilidad de llegada a través de ambos agujeros viene dada de una forma tan simple, aunque no sea igual a $(P_1 + P_2)$, esto es realmente todo lo que hay que decir. Pero hay muchas sutilezas implicadas en el hecho de que la naturaleza funcione de este modo. Quisiéramos ahora ilustrar para ustedes algunas de estas sutilezas. En primer lugar, puesto que el número que llega a un punto concreto *no* es igual al número que llega a través de 1 más el número que llega a través de 2, tal como hubiéramos concluido a partir de la proposición A, indudablemente deberíamos concluir que la *Proposición A es falsa*. No es verdad que los electrones pasen *o bien* a través del agujero 1 *o bien* a través del agujero 2. Pero esta conclusión puede ser verificada con otro experimento.

Observando los electrones

Intentaremos ahora el siguiente experimento. A nuestro aparato de electrones le añadiremos una fuente lumínica muy intensa, colocada detrás de la pared y entre los dos agujeros, como se muestra en la figura 6.10. Sabemos que las cargas eléctricas dispersan la luz. Así, cada vez que pase un electrón, e independientemente de por dónde pase, en su camino hacia el detector dispersará luz hacia nuestros ojos y podremos *ver* dónde está el electrón. Si, por ejemplo, un electrón fuera a tomar el camino a través del agujero 2 que está indicado en la figura 6.10, deberíamos ver un destello luminoso procedente de la vecindad del lugar señalado en la figura. Si un electrón atraviesa el agujero 1 esperaríamos ver un destello en la vecindad del agujero superior. Si se diera el caso de recibir luz de ambos lugares al mismo tiempo, porque el electrón se divide por la mitad... ¡Hagamos simplemente el experimento!



6.10 Un experimento diferente con electrones.

Esto es lo que vemos: *cada* vez que oímos un «click» procedente de nuestro detector electrónico (en la pantalla), *vemos también* un destello luminoso *o bien* cerca del agujero 1 *o bien* cerca del agujero 2, *pero nunca* ambos al mismo tiempo! Y observamos el mismo resultado sea cual sea la posición del detector. A partir de esta observación concluimos que, cuando miramos los electrones, encontramos que ellos atraviesan un agujero o el otro. Experimentalmente, la Proposición A es necesariamente verdadera.

¿Qué es entonces lo que está mal en nuestro argumento *en contra* de la Proposición A? ¿Por qué P_{12} *no es* exactamente igual a $P_1 + P_2$? ¡Volvamos al experimento! Sigamos la pista de los electrones y descubramos qué están haciendo. Para cada posición (localización x) del detector contaremos los electrones que llegan y *también* tomaremos nota de qué agujero atraviesan, observando los destellos. Podemos tomar nota de las cosas del modo siguiente: cada vez que oigamos un «click» anotaremos un punto en la columna 1 si vemos el destello cerca del agujero 1, y si vemos el destello cerca del agujero 2, anotaremos un punto en la columna 2. Cada electrón que llega queda registrado en una de las dos categorías: aquellos que atraviesan 1 y aquellos que atraviesan 2. A partir del número registrado en la columna 1 obtenemos la probabilidad P'_1 de que un electrón llegue al detector vía el agujero 1; y a partir del número registrado en la columna 2 obtenemos P'_2 , la probabilidad de que un electrón llegue al detector vía el agujero 2. Si ahora repetimos tales medidas para

muchos valores de x , obtenemos las curvas para P'_1 y P'_2 mostradas en la parte (b) de la figura 6.10.

Bien, ¡esto no es demasiado sorprendente! Obtenemos para P'_1 algo bastante similar a lo que obtuvimos antes para P_1 al bloquear el agujero 2; y P'_2 es similar a lo que obtuvimos al bloquear el agujero 1. Así pues, *no* hay ningún asunto complicado como pudiera ser el paso a través de ambos agujeros. Cuando los observamos, los electrones los atraviesan simplemente como esperaríamos que los atravesasen. Ya estén los agujeros abiertos o cerrados, aquellos electrones que vemos pasar a través del agujero 1 se distribuyen de la misma forma independientemente de que el agujero 2 esté abierto o cerrado.

¡Pero esperen! ¿Qué tenemos *ahora* para la probabilidad *total*, la probabilidad de que un electrón llegue al detector por cualquier camino? Ya tenemos esa información. Simplemente hagamos como si no hubiéramos mirado los destellos luminosos y acumulemos los clicks del detector que hemos separado en las dos columnas. Tan sólo *debemos sumar* los números. Para la probabilidad de que un electrón llegue a la pantalla atravesando un agujero u otro encontramos $P'_{12} = P_1 + P_2$. Es decir, aunque tuvimos éxito en observar por qué agujero pasó el electrón, ya no obtenemos la antigua curva de interferencia P_{12} , sino una nueva, P'_{12} , ¡que ahora no muestra interferencia! Si desconectamos la luz, recuperamos P_{12} .

Debemos concluir que *cuando miramos los electrones* la distribución de los mismos en la pantalla es diferente de cuando no los miramos. ¿Quizá es el encendido de nuestra fuente luminosa lo que perturba las cosas? Probablemente los electrones son muy delicados, y la luz, cuando es dispersada por los electrones, les da un empujón que cambia su movimiento. Sabemos que el campo eléctrico de la luz actuando sobre una carga ejercerá una fuerza sobre ella. Quizá *deberíamos* esperar por ello que el movimiento sea alterado. En cualquier caso, la luz ejerce una gran influencia sobre los electrones. Al tratar de «observar» los electrones hemos alterado sus movimientos. Es decir, el empujón dado a un electrón cuando el fotón es dispersado por él es tal que altera el movimiento del electrón lo suficiente para que, si *hubiera* podido ir allí donde P_{12} tenía un máximo, en su lugar aterrizará donde P_{12} tenía un mínimo; por esto es por lo que ya no vemos los efectos de interferencia ondulatoria.

Quizá ustedes estén pensando: «¡No utilicemos una fuente tan brillante! ¡Reduzcamos la intensidad! Las ondas luminosas serán entonces más débiles y no perturbarán tanto a los electrones. Seguramente al hacer la luz cada vez más tenue llegará a ser finalmente suficientemente débil para tener un efecto despreciable». Muy bien. Intentémoslo. Lo primero que observamos es que los destellos luminosos dispersados por el paso de los electrones *no* se hacen más débiles. Los *destellos tienen siempre el mismo tamaño*. Lo único que sucede cuando la luz se hace más tenue es que a veces oímos un «click» procedente del detector pero no vemos *ningún destello en absoluto*. El electrón ha pasado sin ser «visto». Lo que estamos observando es que la luz actúa *también* como los electrones; *sabíamos* que era «ondulada», pero ahora encontramos también que viene «en porciones». Siempre llega o es dispersada en porciones que llamamos «fotones». Cuando disminuimos la *intensidad* de la fuente lumínica no cambiamos el *tamaño* de los fotones, sino sólo el *ritmo* al que son emitidos. *Esto* explica por qué, cuando nuestra fuente es tenue, algunos electrones

pasan sin ser vistos. Resulta que no había ningún fotón presente en el instante en que el electrón atravesó el agujero.

Todo esto es algo descorazonador. Si es cierto que cada vez que «vemos» el electrón vemos un destello del mismo tamaño, entonces los electrones que vemos son *siempre* los perturbados. Intentemos, en cualquier caso, el experimento con una luz tenue. Ahora, cada vez que oigamos un click en el detector anotaremos un punto en alguna de las tres columnas: en la columna (1) los electrones vistos en el agujero 1, en la columna (2) los electrones vistos en el agujero 2, y en la columna (3) los electrones no vistos. Cuando juntamos nuestros datos (para calcular las probabilidades) encontramos estos resultados: los «vistos en el agujero 1» tienen una distribución similar a P'_1 ; los «vistos en el agujero 2» tienen una distribución similar a P'_2 (de modo que los «vistos por el agujero 1 o por el agujero 2 tienen una distribución similar a P'_{12}); y los «no vistos» tienen una distribución «ondulatoria» exactamente igual que P_{12} de la figura 6.6! Si *los electrones no son vistos, ¿tenemos interferencia!*

Esto es comprensible. Cuando no vemos el electrón, ningún fotón lo perturba, y cuando lo vemos es que un fotón lo ha perturbado. Hay siempre la misma cantidad de perturbación, puesto que todos los fotones de la luz producen efectos del mismo tamaño, y el efecto de los fotones al ser dispersados es suficiente para borrar cualquier efecto de interferencia.

¿No hay *alguna* forma de que podamos ver los electrones sin perturbarlos? Aprendimos en un capítulo anterior que el momento transportado por un «fotón» es inversamente proporcional a su longitud de onda ($p = h/\lambda$). Ciertamente el empujón dado al electrón cuando el fotón es dispersado hacia nuestros ojos depende del momento que transporta el fotón. ¡Ajá! Si sólo queríamos perturbar ligeramente a los electrones no deberíamos haber disminuido *la intensidad* de la luz, sino que deberíamos haber disminuido su *frecuencia* (que es lo mismo que incrementar su longitud de onda). Utilicemos luz de un color más rojo. Podríamos entonces utilizar luz infrarroja, o radioondas (como el radar), y «ver» dónde fue el electrón con ayuda de algún equipo que pueda «ver» luz de estas longitudes de onda más largas. Si utilizamos luz «más suave» quizá podamos evitar el perturbar tanto a los electrones.

Intentemos el experimento con ondas más largas. Seguiremos repitiendo nuestro experimento cada vez con luz de una mayor longitud de onda. Al principio, parece que nada cambia. Los resultados son los mismos. Luego sucede algo terrible. Recordarán ustedes que cuando discutimos el microscopio señalamos que, debido a la *naturaleza ondulatoria* de la luz, hay una limitación a lo próximos que dos puntos pueden estar y seguir viéndose como dos puntos separados. Esta distancia es del orden de la longitud de onda de la luz. Por ello, ahora, al hacer la longitud de onda más larga que la distancia entre nuestros agujeros, vemos un *gran* destello borroso cuando la luz es dispersada por los electrones. ¡Ya no podemos decir por qué agujero pasó el electrón! ¡Simplemente sabemos que fue a alguna parte! Y es solamente con luz de este color cuando encontramos que los empujones dados a los electrones son suficientemente pequeños para que P'_{12} empiece a parecerse a P_{12} , que empezamos a obtener algún efecto de interferencia. Y es sólo con longitudes de onda mucho más largas que la separación de los dos agujeros (cuando no tenemos ninguna posibilidad de decir dónde fue el electrón) cuando la perturbación debida a la luz se hace suficientemente pequeña para que obtengamos de nuevo la curva P_{12} mostrada en la figura 6.7.

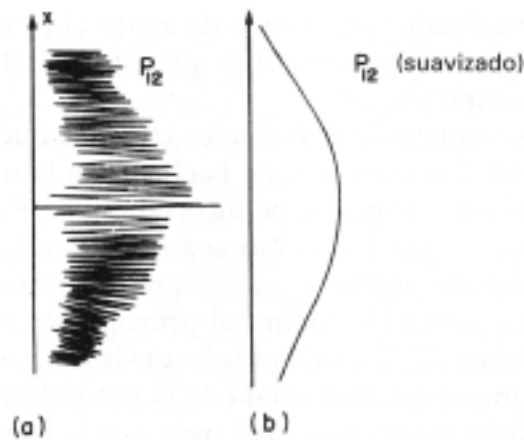
En nuestro experimento encontramos que es imposible disponer la luz de tal modo que uno pueda decir por qué agujero pasó el electrón y al mismo tiempo no se perturbe la figura. Heisenberg sugirió que las entonces nuevas leyes de la naturaleza sólo podrían ser consistentes si hubiera alguna limitación básica a nuestras capacidades experimentales que hasta entonces no se había reconocido. Él propuso, como un principio general, su *principio de incertidumbre*, que podemos establecer en términos de nuestro experimento de la siguiente forma: «Es imposible diseñar un aparato para determinar por qué agujero pasó el electrón y que no perturbe al mismo tiempo los electrones lo suficiente para destruir la figura de interferencia». Si un aparato es capaz de determinar por qué agujero pasó el electrón, no *puede* ser tan delicado que no perturbe la figura de una forma esencial. Nadie ha encontrado nunca (ni siquiera imaginado) una forma de evitar el principio de incertidumbre. Por ello debemos suponer que describe una característica básica de la naturaleza.

La teoría completa de la mecánica cuántica que utilizamos ahora para describir los átomos y, de hecho, toda la materia, depende de la corrección del principio de incertidumbre. Puesto que la mecánica cuántica es una teoría tan acertada, nuestra creencia en el principio de incertidumbre se ve reforzada. Pero si se descubriera alguna vez una forma de «batir» al principio de incertidumbre, la mecánica cuántica daría resultados inconsistentes y tendría que ser descartada como una teoría válida de la naturaleza.

«Bien dirán ustedes, ¿qué pasa con la Proposición A? ¿Es cierto, o no es cierto, que el electrón pasa a través del agujero 1 o pasa a través del agujero 2?» La única respuesta que puede darse es que hemos encontrado a partir de experimentos que tenemos que pensar de una forma especial para no caer en inconsistencias. Lo que debemos decir (para evitar hacer predicciones erróneas) es lo siguiente: si uno mira los agujeros, o más precisamente, si uno tiene un aparato que es capaz de determinar si los electrones atraviesan el agujero 1 o el agujero 2, entonces uno *puede* decir que atraviesan el agujero 1 o el agujero 2. Pero, cuando uno no trata de decir qué camino sigue el electrón, cuando no hay nada en el experimento que perturbe a los electrones, entonces uno *no puede* decir que un electrón atraviesa o el agujero 1 o el agujero 2. Si uno dice eso, y empieza a hacer deducciones a partir de dicho enunciado, cometerá errores en el análisis. Esta es la cuerda floja lógica sobre la que debemos caminar si queremos describir acertadamente la naturaleza.

Si el movimiento de toda la materia así como el de los electrones debe describirse en términos de ondas, ¿qué pasa con las balas en nuestro primer experimento? ¿Por qué no vimos allí una figura de interferencia? Resulta que para las balas las longitudes de onda eran tan minúsculas que las figuras de interferencia se hacían muy apretadas. Tan apretadas, de hecho, que con ningún detector de tamaño finito se podrían distinguir los máximos y los mínimos separados. Lo que vimos era sólo una especie de promedio, que es la curva clásica. En la figura 6.11 hemos tratado de indicar esquemáticamente lo que sucede con objetos a gran escala. La parte (a) de la figura muestra la distribución de probabilidad que podría predecirse para las balas, utilizando la mecánica cuántica. Se supone que las rápidas oscilaciones representan la figura de interferencia que se obtiene para ondas de muy corta longitud de onda. Cualquier detector físico, sin embargo, promediará varias oscilaciones de la curva de

probabilidad, de modo que las medidas muestran la curva suave dibujada en la parte (b) de la figura.



6.11 Figura de interferencia con balas: (a) real (esquemática); (b) observada.

Primeros principios de la mecánica cuántica

Escribiremos ahora un resumen de las principales conclusiones de nuestros experimentos. Sin embargo, pondremos los resultados en una forma que los haga verdaderos para una clase general de tales experimentos. Podemos escribir nuestro resumen de forma más sencilla si definimos primero un «experimento ideal» como uno en el que no hay influencias externas inciertas, es decir, no hay agitación u otras cosas que pasan y que no podemos tener en cuenta. Seríamos bastante precisos si dijéramos: «Un experimento ideal es uno en el que todas las condiciones iniciales y finales del experimento están perfectamente especificadas». Lo que llamaremos «un suceso» es, en general, sólo un conjunto específico de condiciones iniciales y finales. (Por ejemplo: «un electrón sale del cañón, llega al detector, y no sucede ninguna otra cosa».) Ahora nuestro resumen.

RESUMEN

1) La probabilidad de un suceso en un experimento ideal viene dada por el cuadrado del valor absoluto de un número complejo ϕ que se denomina amplitud de probabilidad.

P = probabilidad

ϕ = amplitud de probabilidad

$$P = |\phi|^2 \quad (6.12)$$

2) Cuando un suceso puede ocurrir de varias formas alternativas, la amplitud de probabilidad para el suceso es la suma de las amplitudes de probabilidad para cada forma considerada por separado. Existe interferencia.

$$\phi = \phi_1 + \phi_2$$

$$P = |\phi_1 + \phi_2|^2 \quad (6.13)$$

3) Si se realiza un experimento que es capaz de determinar si se ha seguido una u otra alternativa, la probabilidad del suceso es la suma de las probabilidades para cada alternativa. Se pierde la interferencia.

$$P = P_1 + P_2 \quad (6.14)$$

A uno aún le gustaría preguntar: «¿Cómo funciona? ¿Cuál es el mecanismo que subyace en la ley?». Nadie ha encontrado ningún mecanismo tras la ley. Nadie puede «explicar» nada más que lo que acabamos de «explicar». Nadie les dará ninguna representación más profunda de la situación. No tenemos ninguna idea sobre un mecanismo más básico a partir del cual puedan deducirse estos resultados.

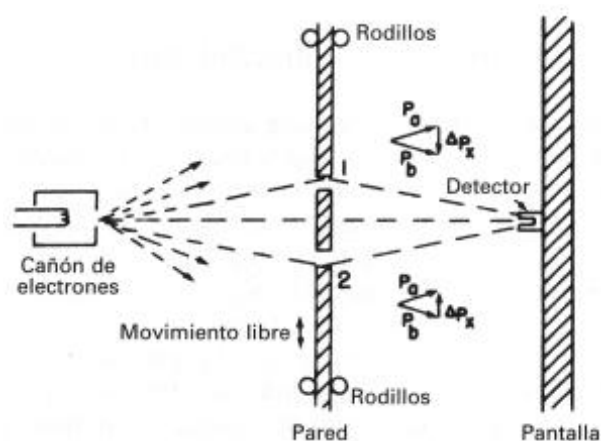
Nos gustaría resaltar una diferencia muy importante entre la mecánica clásica y la cuántica. Hemos estado hablando de la posibilidad de que un electrón llegue en una circunstancia dada. Hemos dado por hecho que en nuestro montaje experimental (o incluso en el mejor montaje posible) sería imposible predecir exactamente lo que sucedería. ¡Sólo podemos predecir las probabilidades! Esto significaría, si fuera cierto, que la física ha abandonado el problema de tratar de predecir exactamente lo que sucederá en una circunstancia definida. ¡Sí! La física ha abandonado. No *sabemos cómo predecir lo que sucedería en una circunstancia dada*, y ahora creemos que es imposible, que lo único que puede predecirse es la probabilidad de sucesos diferentes. Hay que reconocer que esto es un retroceso en nuestro ideal primario de comprender la naturaleza. Quizá sea un paso atrás, pero nadie ha visto la forma de evitarlo.

Haremos ahora unos pocos comentarios sobre una sugerencia que se ha propuesto a veces para tratar de evitar la descripción que hemos dado: «Quizá el electrón tiene algún tipo de mecanismo interno —algunas variables internas— que aún no conocemos. Quizá sea por esto por lo que no podemos predecir lo que sucederá. Si pudiéramos mirar más de cerca el electrón podríamos ser capaces de decir dónde acabaría». Hasta donde sabemos, esto es imposible. Seguiríamos estando en dificultades. Imaginemos que dentro del electrón hay algún tipo de mecanismo que determina dónde va a ir a parar. Este mecanismo debe determinar *también* por qué agujero va a pasar en su camino. Pero no debemos olvidar que lo que está dentro del electrón no debería ser dependiente de lo que *nosotros* hacemos, y en particular de si abrimos o cerramos uno de los agujeros. Así, si un electrón, antes de salir, ha decidido ya a) por qué agujero va a pasar, y b) dónde va a acabar, deberíamos encontrar P_1 para aquellos electrones que han elegido el agujero 1, P_2 para aquellos que han elegido el agujero 2, y *necesariamente* la suma $P_1 + P_2$ para aquellos que llegan a través de los dos agujeros. No parece haber ninguna forma de evitar esto. Pero hemos verificado experimentalmente que este no es el caso. Y nadie ha imaginado una forma de escapar a este rompecabezas. Así, en el momento actual debemos limitarnos a calcular probabilidades. Decimos «en el momento actual», pero sospechamos con mucha fuerza que hay algo que seguirá para siempre con nosotros que es imposible romper el rompecabezas y que así es realmente la naturaleza.

El principio de incertidumbre

Esta es la forma en que Heisenberg estableció originalmente el principio de incertidumbre: si ustedes hacen una medida en cualquier objeto, y pueden determinar la componente x de su momento con una incertidumbre Δp , entonces ustedes no pueden, al mismo tiempo, conocer su posición x con precisión mayor que $\Delta x = h/\Delta p$. Los productos de las incertidumbres en la posición y en el momento en cualquier instante deben ser mayores que la constante de Planck. Este es un caso especial del principio de incertidumbre que fue establecido antes con más generalidad. El enunciado más general era que no hay modo de diseñar un montaje para determinar cuál de las dos alternativas es tomada sin destruir al mismo tiempo la figura de interferencia.

Mostremos para un caso particular que el tipo de relación dada por Heisenberg debe ser cierta para evitar el vernos en dificultades. Imaginemos una modificación del experimento de la figura 6.6, en la que la pared con los agujeros consiste en una placa montada sobre rodillos de modo que se puede mover libremente arriba y abajo (en la dirección x), como se muestra en la figura 6.15. Observando cuidadosamente el movimiento de la placa podemos tratar de decir por qué agujero pasa un electrón. Imaginemos lo que sucede cuando el detector está colocado en $x = 0$. Cabría esperar que un electrón que pasa a través del agujero 1 fuera desviado hacia abajo por la placa para llegar al detector. Puesto que la componente vertical del momento del electrón es alterada, la placa debe retroceder con un momento igual en dirección opuesta. La placa recibirá un empujón hacia arriba. Si el electrón atraviesa el agujero inferior, la placa debería experimentar un empujón hacia abajo. Es evidente que, para cada posición del detector, el momento recibido por la placa tendrá un valor diferente para un paso a través del agujero 1 que; para un paso a través del agujero 2. ¡Así, sin perturbar los electrones en *absoluto*, sino simplemente observando la *placa*, podemos decir qué camino siguió el electrón!



6.15 Un experimento en el que se mide el retroceso de la pared.

Ahora bien, para hacer esto es necesario saber cuál es el momento de la pantalla antes de que el electrón la atraviese. De este modo, cuando medimos el momento después de que ha pasado el electrón, podemos calcular cuánto ha cambiado el momento de la placa. Recordemos, no obstante, que según el principio de

incertidumbre no podemos conocer al mismo tiempo la posición de la placa con una precisión arbitraria. Pero si no sabemos exactamente *dónde* está la placa no podemos decir exactamente dónde están los dos agujeros. Estarán en un lugar diferente para cada electrón que pase. Esto significa que el centro de nuestra figura de interferencia tendrá una posición diferente para cada electrón. Las oscilaciones de la figura de interferencia quedarán borradas. Se podría mostrar cuantitativamente que si determinamos el momento de la placa con precisión suficiente para determinar a partir de la medida del retroceso qué agujero fue utilizado, entonces la incertidumbre en la posición x de la placa será, según el principio de incertidumbre, suficiente para que la figura observada en el detector se desplace en un sentido u otro a lo largo de la dirección x una distancia aproximadamente igual a la que hay desde un máximo a su mínimo más próximo. Tal desplazamiento aleatorio es suficiente para borrar la figura de modo que no se observe interferencia.

El principio de incertidumbre «protege» a la mecánica cuántica. Heisenberg reconoció que si fuera posible medir el momento y la posición simultáneamente con una precisión mayor, la mecánica cuántica se vendría abajo. Por ello, propuso que debe ser imposible. Luego la gente se sentó y trató de imaginar formas de hacerlo, y nadie pudo imaginar una forma de medir la posición y el momento de algo una pantalla, un electrón, una bola de billar, cualquier cosa con una precisión mayor. La mecánica cuántica mantiene su peligrosa pero precisa existencia.