

"El carácter de la ley física"

Richard Feynman

Antoni Bosch editor, 1983

SEXTA CONFERENCIA

*Probabilidad e incertidumbre — la visión
de la naturaleza a través de la mecánica cuántica*

En los orígenes de la observación experimental, o de cualquier otro tipo de observación de carácter científico, era la intuición — que en realidad está basada en la experiencia simple de los objetos cotidianos — la que sugería las explicaciones razonables de los fenómenos. Pero a medida que intentamos abarcar un campo más extenso de hechos y dar explicaciones más consistentes de lo que vemos, las explicaciones dejan de ser explicaciones simples para convertirse en lo que denominamos leyes. Una curiosa característica de estas leyes es que a menudo parecería que fueran haciéndose cada vez menos razonables y que cada vez fueran alejándose más de lo intuitivamente obvio. Basta con un ejemplo; en la teoría de la relatividad se afirma que si usted piensa que dos cosas ocurren al mismo tiempo, se trata simplemente de su propia opinión, porque otra persona puede llegar a la conclusión que, de los dos sucesos, uno precedió al otro. Es decir, que la simultaneidad es una mera impresión subjetiva.

No hay razón para esperar otra cosa, puesto que los objetos de nuestra experiencia cotidiana o bien están formados por grandes cantidades de partículas, o bien se mueven muy lentamente, u ocurren bajo condiciones muy especiales y representan en realidad un contacto muy limitado con la naturaleza. Mediante nuestra experiencia directa sólo entramos en contacto con una porción muy pequeña de los fenómenos naturales. Solamente mediante medidas muy precisas y una cuidadosa experimentación podemos acceder a una visión más amplia. Y entonces descubrimos cosas insospechadas: vemos cosas muy alejadas de lo que hubiésemos podido imaginar, distintas de todo lo sospechado. Nuestra imaginación se estira al máximo pero, a diferencia de la ficción que imagina cosas que realmente no están ahí, se estira para captar cosas que *sí* están ahí. Es este tipo de situación la que quiero discutir.

Empecemos con la historia de la luz. Al principio se pensó que la luz se comportaba de manera parecida a una lluvia de partículas,

de corpúsculos, como gotas de agua o como balas de una pistola. Con más investigación quedó claro que esto no era del todo cierto, puesto que la luz en realidad se comportaba en forma de ondas, como las ondulaciones del agua, por ejemplo. Posteriormente, ya en el siglo xx, después de más investigación, se llegó de nuevo a la conclusión de que en muchos aspectos la luz se comportaba como partículas. En el efecto fotoeléctrico podían incluso contarse estas partículas, que en la actualidad se denominan fotones. Cuando por primera vez fueron descubiertos, los electrones se comportaban simplemente como partículas o balas. Posteriores investigaciones demostraron, a partir por ejemplo de los experimentos de difracción de electrones, que se comportaban como ondas. A medida que pasaba el tiempo iba creciendo la confusión en torno a la manera de comportarse de todas estas cosas — que si partículas, que si ondas —. Todo parecía indicar que se comportaban como las dos cosas.

Esta creciente confusión fue resuelta en 1925 o 1926 con la aparición de las ecuaciones correctas de la mecánica cuántica. Ahora sí que sabemos cómo se comportan los electrones y la luz. ¿Pero cómo describirlo? Si digo que se comportan como partículas estoy dando una impresión falsa; tan falsa como si digo que se comportan como ondas. Es que se comportan a su manera, que es inimitable, y que técnicamente podría denominarse como de manera mecánico-cuántica. Se comportan de forma totalmente distinta a cualquier cosa que hayamos visto antes. Nuestra experiencia con las cosas que hemos visto antes es incompleta. El comportamiento de las cosas a pequeña escala es simplemente distinto. Un átomo no se comporta como un peso colgado de un muelle y oscilando. Ni como una representación en miniatura del sistema solar con pequeños planetas orbitando a su alrededor. Ni como algún tipo de nube rodeando el núcleo. Se comporta como nada que hayamos visto con anterioridad.

Sin embargo, como mínimo existe una simplificación. Los electrones se comportan en este aspecto exactamente como los fotones; ambos están chiflados, pero exactamente de la misma manera.

Hace falta mucha imaginación para enterarse de su comportamiento, puesto que se trata de describir algo que es completamente distinto a cualquier otra cosa que hayamos conocido. En un sentido quizás sea ésta la conferencia más difícil de todas, en el sentido de que es abstracta, en el sentido de que está alejada de la experiencia. Esto es inevitable. Si voy a dar una serie de conferencias sobre el carácter de las leyes físicas, no me es posible olvidarme de la descripción del comportamiento real de las partículas a pequeña escala. Se trata de

una característica común a todas las partículas y por tanto, de carácter universal, con lo que si hay que hablar del carácter de las leyes físicas es esencial hablar de este aspecto concreto.

Va a ser difícil. Pero realmente se trata de una dificultad de carácter psicológico cuyo origen está en el tormento perpetuo a que se someten ustedes al decirse, “¿Pero cómo puede ser así?”, que no es más que el reflejo del deseo incontrolado, pero totalmente baldío, de verlo en términos de algo familiar. *No voy a describirlo en términos de una analogía con algo familiar; voy simplemente a describirlo.* Hubo una época en que los periódicos decían que sólo doce hombres entendían la teoría de la relatividad. No creo que esto ocurriera en ningún momento. Quizá hubo una época en que sólo un hombre la entendiera, porque fue el primero en entenderla, antes de escribir su artículo. Pero una vez leído el artículo, mucha gente entendió la teoría de la relatividad de una manera o de otra, sin duda muchos más que una docena. Por el contrario creo que puedo decir con toda tranquilidad que nadie entiende la mecánica cuántica. De manera que les aconsejo que no se tomen esta conferencia demasiado a pecho, ni piensen que tienen realmente que entender lo que aquí se va a decir en términos de algún modelo determinado. Basta con que se pongan cómodos y disfruten de lo que oigan. Les voy a decir cómo se comporta la naturaleza. Si ustedes simplemente aceptan que quizá se comporte de esta manera, les va a parecer que se trata de algo espléndido y maravilloso. Si pueden evitarlo, no vayan preguntándose a sí mismos: “¿Pero cómo puede ser?”, porque se van a meter en un callejón sin salida del que nadie todavía ha conseguido salir. Nadie sabe cómo puede ser.

Vayamos pues al grano y permítaseme describirles el comportamiento de los electrones y fotones en su forma típicamente mecánico-cuántica. Voy a intentarlo a base de una mezcla de analogía y contraste. Si fuera una pura analogía fracasaríamos; tiene que ser por analogía y contraste con las cosas que les son familiares. De manera que será por analogía y contraste primero con las partículas, en cuyo caso voy a hablar de balas, y luego con las ondas, y en este caso hablaré de las ondulaciones y olas que forma el agua. Lo que voy a hacer va a ser inventar un experimento particular y contarles primero qué ocurriría si en este experimento utilizáramos partículas y luego qué es lo que cabría esperar de utilizar ondas, para acabar explicando lo que ocurre cuando realmente se usan en el experimento verdaderos electrones o fotones. Voy a servirme únicamente de este experimento, que ha sido creado para que contenga todo el misterio de la mecánica

cuántica, con el fin de que confronten en su plenitud las paradojas, los misterios y las peculiaridades de la naturaleza. Resulta que cualquier otra situación de mecánica cuántica puede siempre explicarse diciendo, "¿Recuerda el caso del experimento con los dos agujeros? Pues se trata de lo mismo". Paso pues a describir el experimento con los dos agujeros. Ahí está contenido todo el misterio; no intento escamotearles nada; estoy ofreciéndoles la naturaleza en su forma más elegante y difícil.

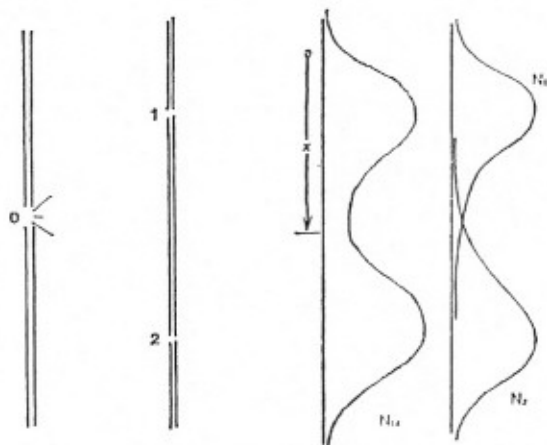


Figura 28

Empecemos con las balas (fig. 28). Supóngase que disponemos de una ametralladora que dispara balas y frente a ella de una plancha blindada con un agujero por el que pasan las balas. A una gran distancia se halla una segunda plancha blindada con dos agujeros — de ahí la mención a los dos agujeros —. Como me voy a estar constantemente refiriendo a estos dos agujeros voy a denominarlos n.º 1 y n.º 2. Imagínense ustedes unos agujeros redondos en tres dimensiones — el dibujo es sólo un corte vertical. De nuevo a una gran distancia tenemos una pantalla de algún tipo en la que podemos instalar unos detectores que, en el caso de las balas, no son más que una caja con arena que detiene las balas y que pueden así ser contadas. Voy a emprender una serie de experimentos en los que quiero contar el número de balas que recoge el detector, la caja con arena, cuando se halla en posiciones diferentes, y quiero también medir la distancia de la caja a partir de un determinado lugar, distancia a la que llamaré x .

Me interesará describir lo que ocurre cuando se cambia x , es decir, cuando muevo el detector para arriba y para abajo. En primer lugar quisiera hacer unas modificaciones a mis balas en forma de tres idealizaciones. La primera es que la ametralladora está mal sujeta a su pie, con lo que baila mucho y las balas salen en varias direcciones, no solamente justo enfrente; por ejemplo, pueden rebotar en los bordes de los agujeros de la plancha blindada. En segundo lugar debemos añadir, aunque no se trata de algo muy importante, que todas las balas poseen la misma velocidad o energía. La idealización más trascendental, sin embargo, consiste en hacer estas balas absolutamente indestructibles, de forma que lo que encontramos en la arena no son fragmentos de plomo procedentes de las balas, sino balas enteras. Imagínense, pues, balas indestructibles o balas duras y un blindaje blando.

Lo primero que hay que observar con respecto a las balas es que cuando se incrustan en la arena son unidades enteras. La energía que llega lo hace en una bala, en un bang. Si se cuentan las balas, tendremos una, dos, tres o cuatro de ellas; siempre en unidades enteras. Hemos supuesto en, este caso, que todas las balas tienen una misma dimensión y que o una bala está toda ella contenida en la caja o no está en la caja. Además, si coloco dos cajas nunca recogerán dos balas al mismo tiempo, suponiendo que la ametralladora no dispare demasiado rápido y que tenga tiempo de ver lo que ocurre entre disparos. Habrá pues que espaciar los disparos y mirar muy rápido en las cajas y de esta forma nunca obtendremos dos balas al mismo tiempo, puesto que una bala es un objeto único perfectamente identificable.

Lo que voy a medir es el número de balas que llegan por término medio a lo largo de un determinado período de tiempo. Digamos que esperamos durante una hora, contamos el número de balas alojadas en la arena y sacamos el promedio. Al número de balas que llegan por hora lo podemos llamar la probabilidad de llegada, porque nos da precisamente la probabilidad de que una bala cruce un agujero y se aloje en una caja determinada. El número de balas alojadas en la caja variará, claro está, a medida que cambie x . En la figura he dibujado horizontalmente el número de balas recibidas si mantengo la caja en cada posición durante una hora. De esta manera obtengo una curva parecida a la curva N_{12} , porque cuando la caja se halla colocada detrás de uno de los agujeros recibe muchas balas, mientras que si no está exactamente encarada recibirá menos porque las balas tendrán que rebotar en los bordes de los agujeros, y si la voy alejando del centro acabará por no recibir ninguna. La curva es pues parecida a N_{12} y llamaré al número de balas recibidas en una hora cuando ambos

agujeros están abiertos N_{12} , que significa simplemente el número de balas que llegan a través de los agujeros n.º 1 y n.º 2.

Quiero recordarles que el número que he trazado gráficamente no viene expresado en unidades enteras. Puede tener cualquier magnitud. Puede ser dos balas y media por hora, a pesar de que las balas llegan en unidades enteras. Lo único que dos balas y media quiere decir es que si se realiza el experimento durante 10 horas la caja recibirá 25 balas o sea, 2,5 balas por término medio por hora. Seguro que conocen el chiste sobre la familia media en los Estados Unidos que, según parece, tiene dos hijos y medio. Esto no significa que todas las familias tenga medio hijo — los hijos vienen en números enteros —. Sin embargo, el promedio por familia puede ser cualquier número y, por la misma razón, N_{12} , que es el promedio de balas que llegan por hora a la caja, no tiene por qué ser un número entero. Lo que se mide es la probabilidad de llegada, que es un término técnico que significa el promedio de balas que llegan durante un determinado período de tiempo.

Por último, si analizamos la curva N_{12} vemos que puede interpretarse perfectamente como la suma de dos curvas, una que representa lo que llamaré N_1 , el número de balas que se recogen si el agujero n.º 2 está cerrado, y N_2 , el número de balas que pasa por el agujero n.º 2, si el n.º 1 está cerrado. Con ello descubrimos una ley de gran importancia, que establece que el número de balas que se recogen cuando ambos agujeros están abiertos es el número que llega a través del agujero n.º 1 más el número que llega a través del agujero n.º 2. Esta proposición, o sea, el hecho de que lo único que hay que hacer es sumar ambos números, la llamo de “no interferencia”.

$$N_{12} = N_1 + N_2 \text{ (no interferencia).}$$

Esto por lo que se refiere a las balas. Ahora vamos a hacer lo mismo pero con ondas (fig. 29). La fuente de nuestras ondas es un objeto con el que se remueve el agua. La plancha blindada se convierte en un espigón con un agujero en medio. Hablamos de ondas porque parece más apropiado que hablar de grandes olas; piénsese pues en los rizos u ondulaciones producidas sobre el agua de un estanque. Muevo el dedo arriba y abajo dentro del agua y produzco ondulaciones. Digamos que la barrera es un pedazo de madera con un agujero a través del que pasan las ondas. A continuación tengo una segunda barrera con dos agujeros y por último un detector. ¿Qué hago con el detector? Lo que mide el detector es si el agua se mueve mucho o poco. Por ejemplo, coloco un pedazo de corcho sobre el agua y mido

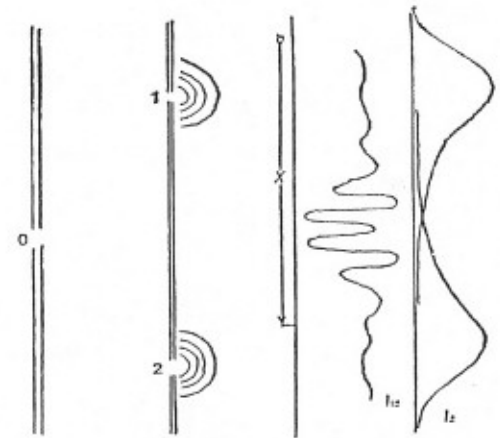


Figura 29

cómo sube y baja; lo que estoy midiendo en realidad es la energía del movimiento del corcho, que es exactamente proporcional a la energía que poseen las ondas. Una cosa más: el movimiento es muy regular y perfecto de manera que las ondas están igualmente espaciadas las unas de las otras. Una cosa importante en este caso es que lo que medimos puede tomar cualquier valor. Estamos midiendo la intensidad de las olas, o la energía del corcho y, si apenas hay olas, si mi dedo sólo se mueve un poquito, el corcho apenas se balanceará. En cualquier caso, sea cual sea su medida, será proporcional a la intensidad de las ondas y podrá tener cualquier magnitud: no tendrá que ser en unidades exactas del tipo o todo o nada.

Lo que vamos a medir es la intensidad de las ondas o, para ser precisos, la energía generada por las ondas en un punto. ¿Qué ocurre cuando medimos la intensidad, que llamaré I para recordarles que se trata de una intensidad y no de un cierto número de partículas? La curva I_{12} , es decir, cuando ambos agujeros están abiertos, aparece en la figura 29. Es una curva interesante, de aspecto complicado. Si colocamos el detector en lugares distintos obtenemos una intensidad que varía muy rápidamente de una manera muy particular. Es probable que ustedes sepan la razón de este comportamiento. La razón es que las ondas tienen crestas y vientres que se extienden a partir del agujero n.º 1 y crestas y vientres a partir del agujero n.º 2. Si nos hallamos en un lugar situado exactamente a mitad del camino entre ambos agujeros, de manera que las ondas procedentes de los dos agujeros lleguen al mismo tiempo, ambas crestas se superpondrán y el agua pegará un

buen salto. Si en cambio traslado mi detector hasta un punto más alejado del agujero n.º 2 que del n.º 1, las ondas procedentes de 2 tardarán más tiempo en llegar que las del 1, de manera que cuando llegue la cresta de 1, la cresta procedente del n.º 2 no habrá llegado todavía; en realidad de 2 nos llegará el vientre con lo que el agua tratará al mismo tiempo de elevarse y de hundirse, debido a la influencia de las ondas procedentes de los dos agujeros, con el resultado neto de no moverse en absoluto o muy poco. Así que en este sitio apenas notaremos nada. Si continuamos desplazándonos llegará un momento en que debido al retraso en llegar de una onda, las dos crestas volverán a coincidir, aunque una cresta estará retrasada de una onda. Así pues, vamos obteniendo alternativamente un gran salto, uno pequeño, un gran salto, uno pequeño... según la forma en que las crestas y los vientres "interfieran". Una vez más el término interferencia es usado en ciencia de una manera curiosa. Podemos tener lo que se llama interferencia constructiva, como cuando ambas ondas interfieren para aumentar la intensidad. Lo verdaderamente importante es darse cuenta de que I_{12} no es lo mismo que la suma de I_1 más I_2 y, en este caso, decimos que se observa una interferencia constructiva y destructiva. Podemos averiguar el aspecto de I_1 y de I_2 cerrando primero el agujero n.º 2 y luego el n.º 1. La intensidad que se obtiene si un agujero está cerrado es simplemente el resultado de las ondas que pasan por el otro agujero sin interferencia alguna, y las curvas resultantes están dibujadas en la figura 29. Se observará que I_1 es idéntica a N_1 e I_2 idéntica a N_2 , mientras que I_{12} es muy distinta de N_{12} .

A decir verdad, las matemáticas de la curva I_{12} son muy interesantes. Es cierto que la altura del agua, que llamaremos h , cuando ambos agujeros están abiertos es igual a la altura que obtendríamos con el n.º 1 abierto más la altura que obtendríamos con el n.º 2 abierto. Por ello si la altura del n.º 2 representa un vientre, se le dará un valor negativo que anulará la altura del n.º 1. Podemos, pues, establecer dicha relación cuando se trata de la altura del agua, pero resulta siempre que la intensidad, por ejemplo cuando ambos agujeros están abiertos, no es igual a la altura sino proporcional al cuadrado de la altura. Es precisamente porque estamos manejando cuadrados que obtenemos unas curvas tan interesantes.

$$h_{12} = h_1 + h_2$$

pero

$$I_{12} \neq I_1 + I_2 \text{ (Interferencia)}$$

$$I_{12} = (h_{12})^2$$

$$I_1 = (h_1)^2$$

$$I_2 = (h_2)^2$$

Dejemos el agua y volvamos a empezar, esta vez con electrones (figura 30).

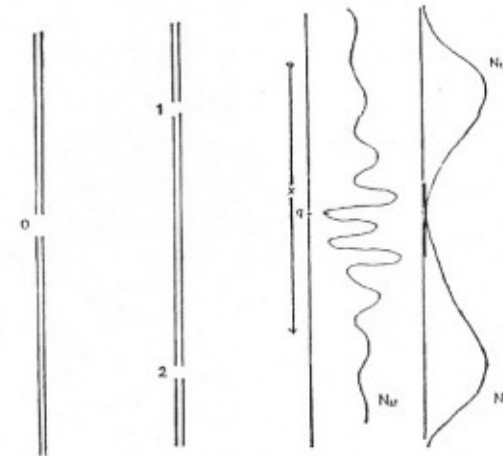


Figura 30

El origen de los electrones es un filamento, las barreras son ahora planchas de tungsteno con los correspondientes agujeros y como detector utilizamos un sistema eléctrico suficientemente sensible como para percibir la carga de cualquier electrón que llegue al aparato, por pequeña que sea la energía de la fuente de electrones. Si ustedes lo prefieren podemos utilizar fotones y papel negro en vez de las planchas de tungsteno — aunque de hecho el papel negro no es muy apropiado porque las fibras del papel no permiten hacer unos agujeros de contornos precisos, así que haría falta algo mejor — y como detector un foto-multiplicador capaz de detectar la llegada de los fotones individuales. ¿Qué ocurre en estos casos? Voy a discutir solamente el experimento con electrones, puesto que usando fotones ocurriría exactamente lo mismo.

En primer lugar, lo que se recibe en el detector eléctrico, debidamente amplificado, son clics, unidades, unidades enteras. Cuando se oye el clic, se trata de un clic de una cierta magnitud y ésta es siempre la misma. Si la fuente se debilita, los clics continúan siendo de la misma magnitud pero se oyen ahora más espaciados. Si se aumenta la intensidad de la fuente, los clics llegan tan rápidamente que el ampli-

ficador llega a saturarse. Es decir, hay que reducir la intensidad para que el instrumento que se utiliza para detectar la llegada de los electrones pueda funcionar adecuadamente. Hay que señalar también que si se coloca otro detector en un lugar distinto nunca se oirán dos clics al mismo tiempo, al menos si la fuente es suficientemente débil y la precisión del instrumento suficientemente buena. Si se reduce la intensidad de la fuente de manera que lleguen pocos electrones y además suficientemente espaciados, nunca sonará simultáneamente un clic en ambos detectores. Esto significa que lo que está llegando se presenta en forma de unidades — tiene una magnitud determinada y aparecen uno después de otro. Bien, así pues, los electrones, o los fotones, aparecen en unidades. Por lo tanto podemos hacer lo mismo que hicimos en el caso de las balas: medir la probabilidad de llegada. Lo que hacemos es colocar el detector en sitios distintos — o si se prefiere, aunque es más caro, podemos colocar detectores en todas partes y trazar la curva entera simultáneamente. Mantenemos pues, el detector en cada lugar, digamos que durante una hora, medimos cuántos electrones han llegado transcurrida la hora y calculamos el promedio. ¿Qué curva obtenemos? ¿El mismo tipo de N_{12} que con las balas? La figura 30 nos muestra lo que se obtiene con ambos agujeros abiertos. Lo extraordinario de la naturaleza es que produce una curva que es idéntica a la obtenida con la interferencia de las ondas. ¿Y la produce en qué caso? No en el caso de la energía de una onda sino en el caso de la probabilidad de llegada de una de esas unidades enteras.

Las matemáticas son simples. No hay más que cambiar N por I , y h por otra cosa, que es nueva — no se trata de la altura de nada. Inventamos, para ello, una a a la que denominamos amplitud de probabilidad, porque no sabemos lo que significa. En este caso a_1 es la amplitud de probabilidad de llegar a través del agujero n.º 1 y a_2 es la amplitud de probabilidad de llegar a través del n.º 2. Para determinar la amplitud de probabilidad total de llegada se suman las dos amplitudes y se elevan al cuadrado. No es más, pues, que una imitación directa de lo que ocurre con las ondas, porque para hallar la curva equivalente utilizamos las mismas matemáticas.

Nos queda, sin embargo, una cuestión por verificar en relación con la interferencia. No he dicho nada de lo que ocurre cuando se tapa uno de los agujeros. Intentemos analizar esta interesante curva suponiendo que los electrones pasan solamente por un agujero o por otro. Cerramos el segundo y medimos cuántos electrones pasan por el n.º 1, y obtenemos la curva simple N_1 . O cerramos el primero y

medimos cuántos electrones pasan por el n.º 2 con lo que obtenemos la curva N_2 . Pero sumando estas dos curvas no obtenemos N_{12} ; hay pues interferencia. De hecho, matemáticamente, N_{12} viene expresada por aquella curiosa fórmula según la cual la probabilidad de llegada es el cuadrado de una amplitud que a su vez es la suma de dos partes. $N_{12} = (a_1 + a_2)^2$. La cuestión es explicar cómo puede ser que cuando los electrones pasan a través del agujero n.º 1 están distribuidos de una manera, que cuando pasan por el agujero n.º 2 lo están de otra y, sin embargo, cuando ambos agujeros están abiertos no se obtiene la suma de ambos. Por ejemplo, si mantengo el detector en el punto q , con ambos agujeros abiertos, no obtengo prácticamente nada, mientras que si cierro uno de ellos obtengo muchas señales y si cierro el otro obtengo algunas. Pero en cuanto abro ambos agujeros no obtengo nada; les permito a los electrones que pasen a través de dos agujeros y no llega ninguno. O fijémonos en el punto central; se puede comprobar que ahí el valor es mayor que la suma de las dos curvas. Alguno de ustedes se creará suficientemente listo como para encontrar una justificación de este fenómeno, del tipo que los electrones entran y salen de los agujeros o hacen algo más complicado o se parten por la mitad y penetran por ambos agujeros. Sin embargo, nadie ha conseguido dar una explicación satisfactoria, y esto es debido a que, finalmente, su expresión matemática es tan simple, a que las curvas son tan simples.

Voy a resumir diciendo que los electrones llegan en unidades enteras, como partículas, pero la probabilidad de llegada de estas partículas se determina de la misma manera que la intensidad de las ondas. Es en este sentido que decimos que los electrones se comportan a veces como partículas y a veces como ondas. Se comportan de dos maneras distintas al mismo tiempo (fig. 31).

Esto es todo lo que se puede decir. Podría dar una descripción matemática para hallar la probabilidad de llegada de los electrones bajo cualquier circunstancia y esto, en principio, sería el final de la conferencia — excepto que todavía quedan por dilucidar una serie de sutilezas relacionadas con el hecho de que la naturaleza se comporte de esta manera. Existe un buen número de cosas curiosas que me gustaría discutir porque no son del todo obvias.

Para discutir las sutilezas empezaremos por analizar una proposición que, al tratarse de unidades enteras, debería parecerse razonable. Puesto que lo que se detecta es siempre una unidad, en este caso un electrón, es obviamente razonable suponer que o bien el electrón pasa por el agujero n.º 1 o bien lo hace por el n.º 2. Parece com-

CUADRO

Balas	Ondas de agua	Electrones (fotones)
En unidades enteras	Cualquier tamaño	En unidades enteras
Se mide la probabilidad de llegada	Se mide la intensidad de las ondas	Se mide la probabilidad de llegada
$N_{12} = N_1 + N_2$	$I_{12} \neq I_1 + I_2$	$N_{12} \neq N_1 + N_2$
Sin interferencias	Con interferencias	Con interferencias

Figura 31

pletamente obvio que, tratándose de una unidad, no puede hacer otra cosa. Como me propongo discutir esta proposición voy a darle un nombre; la llamaré Proposición A.

Proposición A:

Un electrón, o pasa por el agujero n.º 1 o pasa por el agujero n.º 2.

Ya hemos dicho algo de lo que ocurre con la Proposición A. Si fuera cierto que el electrón o pasa por el agujero n.º 1 o pasa por el n.º 2, el número total detectado tendría que poder ser analizado como la suma de ambas contribuciones. El número total detectado sería igual al número que pasara por el n.º 1 más el número que pasara por el n.º 2. Pero puesto que la curva resultante no puede describirse fácilmente como la suma de dos componentes de una manera tan simple, y puesto que los experimentos que determinan el número de electrones llegados si sólo uno u otro de los agujeros está abierto, no indican que el total sea la suma de las dos partes, parece claro que hay que concluir que la proposición es falsa. Si no es cierto que el electrón pasa o por un agujero o por el otro quizá sea porque temporalmente se divide o por alguna otra razón. Así pues, la Proposición A es falsa por lógica. Por desgracia, o por suerte, se puede verificar la lógica experimentalmente. Habrá pues que comprobar si es cierto o

no que los electrones pasan o bien por un agujero o por el otro o si por el contrario dan la vuelta por ambos agujeros, o se parten por la mitad u otra cosa.

Todo lo que hay que hacer es observarlos. Y para observarlos necesitamos luz. Así que detrás de los agujeros colocamos una fuente de luz intensa. La luz es dispersada por los electrones que chocan con ella, de manera que si la luz es suficientemente intensa podrán verse los electrones a medida que pasan. Nos colocamos pues en nuestros puestos, dispuestos a ver si cada vez que contamos un electrón, o en el instante anterior a contarlo, vemos un brillo en el agujero 1 o en el 2, o quizás una especie de medio brillo en cada uno de los agujeros cada vez. Por fin, con sólo mirar, vamos a descubrir qué pasa. Prendemos la luz, miramos y, ¡ahí está!, cada vez que el detector recibe un electrón vemos un brillo o bien en el agujero n.º 1 o en el n.º 2. Lo que vemos es que todas las veces el electrón pasa entero por uno de los dos agujeros. ¡Paradoja!

Vamos a ver si ponemos a la naturaleza en un aprieto. Les voy a decir lo que vamos a hacer. Vamos a dejar la luz prendida y vamos a contar cuántos electrones pasan. Dispondremos de dos columnas, una para el agujero n.º 1 y otra para el n.º 2, y cada vez que llegue un electrón al detector indicaremos en la correspondiente columna el agujero por el que ha pasado. ¿Qué ocurre en la columna del agujero n.º 1 tras sumar todas las observaciones para las distintas posiciones del detector? ¿Si miro el agujero n.º 1 qué veo? Veo la curva N_1 (fig. 30). Esta columna está pues distribuida igual que la que obtenemos cuando tapamos el agujero n.º 2, independientemente de que miremos o no. Es decir, que si tapamos el agujero n.º 2 obtenemos la misma distribución de llegadas que si estuviéramos mirando el agujero n.º 1. De manera idéntica, el número de electrones que han pasado por el n.º 2 da la curva simple N_2 . Fijémonos bien, el número total de electrones llegados *tiene que ser* igual al número total. Tiene que ser igual a la suma del número N_1 más el número N_2 , puesto que cada electrón detectado ha sido asignado o bien a la columna 1 o bien a la 2. El número total de electrones detectados *tiene que ser absolutamente* igual a la suma de estos dos. Tiene que distribuirse como $N_1 + N_2$. ¿Pero no dijimos que se distribuía como la curva N_{12} ? Pues no, se distribuye como $N_1 + N_2$. Realmente es así; tiene que ser así y es así. Si señalamos mediante una prima los resultados obtenidos con la luz encendida, tenemos que N'_1 es prácticamente idéntica a N_1 , sin la luz, y N'_2 es casi igual a N_2 . Pero el número N'_{12} , que vemos cuando la luz está prendida y ambos agujeros están abiertos *es* igual al

número que vemos a través del n.º 1 más el número que vemos a través del n.º 2. Éste es el resultado obtenido con la luz encendida. Es decir, que obtenemos una respuesta distinta según que la luz esté o no encendida. Con la luz prendida, la distribución es la curva $N_1 + N_2$. Si apagamos la luz la distribución es N_{12} . Prendemos la luz de nuevo y otra vez es $N_1 + N_2$. ¡Pues vaya, la naturaleza ha escapado del aprieto! Habrá que concluir que la luz afecta el resultado. Podemos pues afirmar que la luz afecta el comportamiento de los electrones. Si se nos permite hablar de movimiento de los electrones a lo largo del experimento, lo cual es algo impreciso, podremos decir que la luz afecta al movimiento, de forma que aquellos electrones que debían llegar en el máximo son de alguna manera desviados o golpeados por la luz y llegan, en vez, en el mínimo, alisando de esta manera la curva hasta dar lugar a la curva simple $N_1 + N_2$.

Los electrones son muy delicados. Cuando observamos una pelota de tenis y le enfocamos una luz, la pelota continúa su mismo camino. Pero cuando enfocamos una luz en un electrón, éste es desplazado un poco y en vez de ir de una manera va de otra. Supóngase que intentamos reducir la intensidad de la luz hasta que es apenas perceptible y utilizamos unos detectores muy sensibles que pueden ver con luces muy tenues. Si vamos haciendo la luz cada vez más tenue cabe esperar que una luz muy débil no afecte al electrón de manera tan completa como para cambiar el resultado desde N_{12} hasta $N_1 + N_2$. Cabe esperar que al debilitarse la luz nos vayamos de alguna forma acercando al caso en que no hay luz alguna. ¿Pero entonces cómo podría una curva convertirse en la otra? Ahora, sin embargo, no estamos tratando con una onda sobre el agua. La luz se presenta con características de partícula, a la que se denomina fotón, y a medida que se reduce la intensidad de la luz no se va eliminando su efecto; lo que hacemos es reducir el número de fotones que salen de la fuente de luz. A medida que reduzco la luz voy obteniendo cada vez menos fotones. Lo mínimo que puede desviar un electrón es un fotón y si tengo demasiado pocos fotones puede ocurrir que de vez en cuando un electrón se cuele cuando no pasa ningún fotón, en cuyo caso no lo veré. Por lo tanto, una luz muy tenue no significa una pequeña perturbación, significa simplemente pocos fotones. El resultado es que con una luz muy débil voy a tener que inventar una tercera columna que diga "no vistos". Cuando la luz es muy intensa en esta columna habrá pocos, pero cuando la luz es débil la mayor parte de ellos acabarán yendo a parar ahí. De manera que tenemos tres columnas, agujero n.º 1, agujero n.º 2 y no vistos. Ya pueden imaginarse lo que ocurre. Los elec-

trones que veo se distribuyen según la curva $N_1 + N_2$. Los que no veo se distribuyen según la curva N_{12} . A medida que bajo la luz veo cada vez menos y una proporción mayor de electrones pasan sin ser vistos. La curva verdadera, en cualquier caso, es una mezcla de las dos curvas, de forma que a medida que la luz se debilita se va pareciendo más y más a N_{12} de manera continua.

No puedo discutir ahora el gran número de maneras distintas que hay de descubrir el agujero por el que pasó el electrón. Pero siempre resulta que es imposible colocar la luz de tal forma que sea posible observar el agujero por el que pasa el electrón sin perturbar la distribución de la llegada del electrón, sin destruir la interferencia. Y no sólo en el caso de la luz, sino en todos — úsese el sistema que se quiera; será imposible, por principio, conseguirlo. Si ustedes quieren pueden inventar mil maneras de saber el agujero por el que pasa el electrón y siempre acaba resultando que o pasa por uno o pasa por el otro. Pero si consiguen construir un instrumento tal que no perturbe el movimiento del electrón, lo que ocurre es que ya no es posible averiguar el agujero por el que ha pasado el electrón y se obtiene una vez más el resultado complicado.

Heisenberg observó, al descubrir las leyes de la mecánica cuántica, que las nuevas leyes de la naturaleza que acababa de hallar solamente podían ser consistentes entre sí si existía algún tipo de limitación básica en nuestras capacidades experimentales que no hubiera sido previamente reconocida. En otras palabras, experimentalmente no se puede ser tan delicado como se desee. Heisenberg propuso pues su principio de incertidumbre que, expresado en términos de nuestro experimento, dice lo siguiente. (El lo formuló de otra manera, pero ambas son exactamente equivalentes, y es posible pasar de una formulación a otra.) "Es imposible construir un aparato que pueda determinar el agujero a través del cual pasa un electrón sin al mismo tiempo perturbar el electrón de forma suficiente como para destruir el modelo de interferencias." Nadie ha conseguido escapar a esta ley. Estoy seguro de que todos ustedes están ya pensando en maneras de detectar el agujero por el que pasó el electrón; pero si cada una de ellas es analizada con cuidado acabaremos descubriendo que inevitablemente algo no va. Uno puede creer que ha conseguido no perturbar el electrón, pero siempre pasa algo, y siempre pueden explicarse las diferencias con el modelo de interferencias por la perturbación causada por los instrumentos usados para determinar el agujero atravesado por el electrón.

Ésta es una característica básica de la naturaleza que cubre todos

los casos posibles. Si mañana se descubre una nueva partícula, digamos el kaón — en realidad el kaón ha sido ya descubierto, pero utilicemos de todas maneras este nombre — y utilizo kaones para que al actuar sobre los electrones nos determine el agujero por el que pasa cada electrón, ya sé por adelantado — al menos eso espero — lo suficiente a propósito del comportamiento de una nueva partícula como para decir que no puede ser de un tipo tal que me permita decir por qué agujero pasa cada electrón sin que al mismo tiempo perturbe al electrón y transforme el modelo de interferencias en uno sin ellas. Así pues, el principio de incertidumbre puede utilizarse como principio general con el fin de anticipar muchas de las características de objetos desconocidos, cuyas probables características deben ocurrir entre ciertos límites. Volvamos a la proposición A. "Los electrones deben pasar por un agujero o por el otro." ¿Es verdad o no? Los físicos tienen una manera de evitar ciertas dificultades. Construyen sus reglas de razonamiento de la siguiente manera. Si poseemos un aparato capaz de indicarnos el agujero por el que pasa un electrón (y es posible tener tal aparato), podemos decir que pasa o por un agujero o por el otro. Es así; siempre pasa por uno de los dos agujeros — cuando miramos —. Pero cuando no poseemos aparato alguno para determinar el agujero a través del que pasa, no podemos decir que pasa o por un agujero o por el otro. (Hombre, siempre se puede decir — siempre y cuando dejemos de pensar inmediatamente y de ahí no saquemos ninguna deducción. Los físicos prefieren no decirlo a tener que dejar de pensar en seguida.) Llegar a la conclusión de que pasa por un agujero o por el otro cuando no estamos mirando significa caer en un error de predicción. Ésta es la maroma lógica por la que hay que andar si queremos interpretar la naturaleza.

Esta proposición a la que me estoy refiriendo es de carácter general. No es sólo válida para los dos agujeros, sino que se trata de una proposición general que puede formularse de la siguiente manera. La probabilidad de cualquier suceso en un experimento ideal — es decir, en un experimento en el que todo esté tan bien determinado como sea posible — es el cuadrado de algo, que en nuestro caso he denominado a , la amplitud de probabilidad. Cuando un suceso puede ocurrir de diversas formas alternativas, la amplitud de probabilidad, este número a , es la suma de las a de cada una de las diversas alternativas. Si se efectúa un experimento capaz de determinar la alternativa seguida, la probabilidad del suceso cambia; es la suma de las probabilidades de cada alternativa. Es decir, se pierde la interferencia.

La cuestión es ahora saber cómo realmente funciona. ¿Qué me-

canismo es el causante de todo esto? Nadie sabe de ningún mecanismo. Nadie puede darles una explicación del fenómeno más profunda que la que yo he dado; o sea, una mera descripción. Quizá puedan darles una explicación más detallada, en el sentido de que pueden poner más ejemplos para mostrar que es imposible averiguar el agujero por el que pasa el electrón sin destruir las interferencias. Pueden explicar experimentos más complicados que el mero experimento de las interferencias con dos agujeros. Pero se tratará simplemente de repetir lo mismo para que quede claro. No será más profundo, sólo más extenso. La formulación matemática puede hacerse más precisa; se puede advertir que se trata de números complejos y no de números reales y señalar un par de cuestiones secundarias que nada tienen que ver con la idea principal. Pero el misterio profundo es el que acabo de describir y, en la actualidad, nadie puede ir más al fondo.

Lo que hemos calculado hasta ahora es la probabilidad de llegada de un electrón. Cabe preguntarse si hay alguna manera de averiguar dónde realmente va a llegar un electrón concreto. Por supuesto que no estamos en contra del cálculo de probabilidades cuando la situación es muy complicada. Cuando lanzamos un dado, como habría que tener en cuenta las distintas resistencias, el juego de los diversos átomos y una maraña de complicaciones, estamos dispuestos a admitir que no sabemos lo suficiente como para hacer una predicción exacta; por ello calculamos las probabilidades de que salga una cara o la otra. Pero ahora lo que nos estamos preguntando es si no habrá probabilidades hasta lo más profundo: si no habrá probabilidades en las leyes fundamentales de la física.

Supóngase que tengo un experimento preparado de tal forma que con la luz apagada me sale un caso de interferencias. Lo que digo es que incluso con la luz prendida no puedo predecir por qué agujero pasará un electrón. Sólo sé que cada vez que miro pasa por uno de los dos agujeros; pero no hay manera de anticipar por cuál de los dos va a pasar. El futuro, en otras palabras, es impredecible. Es imposible predecir a partir de cualquier información previa, el agujero por el que pasará, o por qué agujero se le verá pasar. Esto significa que en un cierto sentido la física ha tirado la toalla, si su propósito original era — y todo el mundo creía que efectivamente lo era — saber lo suficiente como para que dadas unas circunstancias pudiera predecirse lo que ocurriría a continuación. Éstas son las circunstancias: una fuente de electrones, una poderosa fuente de luz, una plancha de tungsteno con dos agujeros: ¿por cuál de los dos agujeros verá pasar el electrón? Una teoría afirma que la razón por la que no es posible predecir el

agujero por el que pasará el electrón es que esto está determinado por una serie de cosas muy complicadas: Haría falta conocer los engranajes internos del aparato que dispara los electrones, su funcionamiento, etc., se dirá, pues, que la probabilidad es del 50 % porque, al igual que con un dado, ocurre de manera aleatoria; la física es incompleta pero si llegamos a tener una física suficientemente completa seremos capaces de predecir el agujero por el que pasará el electrón. Ésta es la llamada teoría de la variable oculta. Pero tal teoría no puede ser cierta; no es por falta de conocimientos detallados que no podemos efectuar predicciones. He dicho que de no prender la luz obtendríamos las interferencias. Si, bajo determinadas condiciones, obtengo las interferencias, es imposible analizar el experimento en términos de que los electrones pasan por el agujero n.º 1 o el n.º 2, porque la curva de interferencias es muy simple y, desde un punto de vista matemático, completamente distinta de la contribución como probabilidades de las otras dos curvas. Si nos hubiera sido posible determinar por anticipado el agujero por el que iba a pasar el electrón con la luz prendida, el tener o no tener la luz encendida sería irrelevante de cara al resultado. Fuera cual fuera el mecanismo de la fuente de los electrones que, al ser observado, nos permitiera anticipar el agujero por el que iba a pasar el electrón, podríamos haberlo observado sin encender la luz y, en consecuencia, habríamos podido decir, aun sin luz, por qué agujero iba a pasar el electrón. Pero de haber podido hacerlo así, la curva resultante habría tenido que poder representarse como la suma de los electrones que pasan por el agujero n.º 1 más los que pasan por el n.º 2, en contra de lo que realmente ocurre. Es por lo tanto imposible tener por anticipado cualquier información que nos indique el agujero por el que pasará el electrón, tanto si la luz está encendida como si no, cuando el experimento está montado de tal forma que con la luz apagada se obtienen las interferencias. No es nuestra ignorancia de los mecanismos internos, de sus innumerables complicaciones, lo que hace que la naturaleza parezca contener probabilidades. Parece ser algo intrínseco a ella. Alguien lo ha expresado de esta manera: "Ni siquiera la propia naturaleza sabe qué camino va a escoger el electrón."

Una vez un filósofo dijo: "Es necesario para que pueda existir la ciencia que las mismas condiciones den siempre los mismos resultados." Bueno, pues las mismas condiciones no siempre dan los mismos resultados. Se monta todo para que cada vez se mantengan las mismas condiciones y, sin embargo, resulta imposible predecir el agujero por el que pasará el electrón. Y a pesar de esto continúa haciéndose ciencia. El que no podamos predecir exactamente lo que va a ocurrir

nos tiene bastante descontentos. En relación con esto, cabría imaginar ciertas circunstancias muy peligrosas en las que *tuviéramos* que saber, y sin embargo, no pudiéramos hacer una predicción exacta. Por ejemplo, podríamos concebir el caso — que mejor no ocurra — en que si el electrón pasa por el primer agujero tenemos que hacer explotar una bomba atómica y así iniciar la tercera guerra mundial, mientras que si pasa por el segundo agujero continuamos con nuestras negociaciones y retrasamos un poco más la guerra. En estas circunstancias el futuro de la humanidad dependería de algo que científicamente es impredecible. El futuro es impredecible.

Ni lo que sea necesario "para la existencia de la ciencia" ni cuáles sean las características de la naturaleza, pueden determinarse con pomposas precondiciones. Están siempre determinadas por el material con el que trabajamos, por la propia naturaleza. Observamos y vemos lo que descubrimos, pero no podemos predecir sin riesgo de equivocarnos. Las posibilidades más razonables a menudo resultan equivocadas. Si la ciencia tiene que progresar, lo que necesitamos es capacidad de experimentar, honestidad en la publicación de los resultados — los resultados deben darse a conocer sin que haya alguien que nos diga cuáles debieran haber sido — y, finalmente, algo muy importante, la inteligencia para interpretarlos. Una cuestión importante, con respecto a la inteligencia, es que no conviene estar seguro por anticipado de qué se espera encontrar. La inteligencia puede estar cargada de prejuicios: "Esto es poco probable, no me gusta." Pero el prejuicio es distinto de la certeza absoluta. No me refiero a las preferencias personales sino al prejuicio absoluto. Si se trata sólo de preferencias no hay cuidado porque, de estar equivocados, la continua acumulación de resultados contrarios acabará molestándonos tanto que no nos quedará más remedio que aceptarlos. Sólo es posible ignorarlos si estamos absolutamente seguros por anticipado de que la ciencia tiene que poseer unas determinadas precondiciones. En realidad, para la existencia de ciencia es necesario que existan cabezas que no acepten que la naturaleza deba cumplir ciertas condiciones preconcebidas, como las de nuestro filósofo.