

UNOS CUANTOS PARA TODO

QUANTA FOR EVERYTHING

Jairo Giraldo

Departamento de Física, Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia,
Colombia.

(Recibido: 03/2019. Aceptado: 06/2019)

Resumen

La física cuántica puede aplicarse en principio a todo tipo de situaciones, pero los efectos cuánticos más protuberantes solo se observan en condiciones muy especiales y las matemáticas que los describen se consideran complicadas. El curso de contexto *Cuántica para todos y para todo* es un curso que se ofrece a estudiantes de todas las carreras de la Universidad Nacional – Sede Bogotá. Como su nombre lo indica, no exige matemáticas, tampoco conocimientos previos de física. Con este artículo se quieren presentar las ideas centrales que dieron lugar a la física cuántica y el estado actual de la teoría, introduciendo al lector al tema sin recurrir al lenguaje matemático que es propio de la física. Haremos un resumen de los principios cuánticos fundamentales y de sus aplicaciones más importantes.

Palabras clave: Mecánica cuántica, divulgación científica.

Abstract

Quantum physics can be applied in principle to all kind of situations; but the most remarkable quantum effects are only visible under very special conditions and the mathematics that describes them are considered very cumbersome. The context course *Quanta for everybody* applied to everything is a basic course offered for all undergraduate programs at Universidad Nacional – Sede

Bogotá. As its name suggests, there is not any mathematics required nor previous knowledge on physics. This article is intended to present the central ideas that gave rise to quantum physics and the actual state of the theory, introducing the reader to the topic without resort to the mathematical language that is used in the discipline. A review of the fundamental quantum principles and of its most important achievements is presented.

Keywords: Quantum physics, scientific popularization.

Introducción

La mecánica y el electromagnetismo son los dos pilares de la física clásica. La primera, obra cumbre de Isaac Newton, da cuenta del movimiento de los cuerpos, que están conformados estos por un agregado de partículas. El segundo, trata de la generación del campo electromagnético por cuerpos cargados y su propagación como ondas electromagnéticas de las que las ondas de luz en el espectro visible son apenas una mínima parte. La electrodinámica, como se le denomina en el lenguaje de los físicos, es la síntesis de un conjunto de leyes que fueron formuladas por distintos investigadores. Uno de ellos, Charles-Augustin de Coulomb, encontró que dos objetos cargados se atraen si las cargas son de clase opuesta o repelen si son de la misma clase, con una intensidad proporcional al cuadrado de la distancia entre las cargas, la misma forma que tiene la ley de gravitación descubierta por Newton para las masas. Los dos asumieron que la interacción se producía instantáneamente, aunque Newton sospechaba que debería transcurrir algún tiempo para que se propagara la fuerza entre las masas. Hasta comienzos del siglo pasado la física clásica supuso que la materia es continua. De tener ingredientes indivisibles, se pensó, eso no sería mayor problema: la separación entre unos y otros sería despreciable.

Con el descubrimiento del electrón en 1887, se identificó a este como portador de carga negativa. En 1911, con el descubrimiento del núcleo, se concluyó que existiría una carga equivalente de signo contrario, finalmente identificada y denominada protón. Electrones y protones, conjuntamente con los neutrones, son los componentes

esenciales del átomo. Estos últimos, como su nombre lo indica, son partículas de carga neta nula. Descubierta el núcleo y el electrón, constituyentes esenciales del átomo, se creyó ingenuamente que bastaba con aplicar las leyes clásicas del movimiento de corpúsculos y del electromagnetismo referido a las ondas que estos producirían para elaborar un modelo realista del átomo y por ende de los compuestos atómicos. El fracaso de los conceptos tradicionales al aplicarlos en el micromundo fue rotundo. Más adelante nos referiremos al denominado modelo de Bohr para el átomo de hidrógeno, el más simple de todos, primer resultado semi-empírico exitoso. El tratamiento de Bohr echó por la borda algunos conceptos clásicos y condujo a la formulación de un nuevo marco teórico que, aunque exitoso y coherente desde el punto de vista matemático, en total acuerdo con los resultados experimentales, nos obligó a cambiar por completo la imagen que teníamos sobre la naturaleza: de la separación tajante entre ondas y partículas se pasó a una imagen dual que dio origen al primer principio cuántico: la dualidad onda-partícula, también denominado principio de complementariedad. Por ello es apropiado empezar por ilustrar ese principio [1].

Para el curso de contexto *Cuántica para todos y para todo*, del cual se da una breve descripción en la nota introductoria para este número especial de *Revista Momento*, se utilizó por un tiempo *Unos cuantos para todo*, preparado por el autor y responsable del curso [2]. Actualmente se sigue otro que consideramos más apropiado para los objetivos actuales allí descrito [2, 3] y se prepara otro [4]. Por obvias limitaciones de espacio no hemos discutido ampliamente algunos tópicos y conceptos que son básicos, por lo que recomendamos al lector que quiera examinarlos con mayor detalle consultar otros textos divulgativos [5–8]. El de Klein [1] se recomienda por su brevedad y sencillez y porque se refiere a otros aspectos de interés en las ciencias humanas. El de Rae [7] introduce en forma sencilla algunas de las aplicaciones más importantes en estado sólido, tema especial de *Quantum Sapiens II* [4]. Orzel describe en forma amena los principios esenciales de la teoría [8]. En este artículo, ampliado para una versión digital [9], nos referiremos de manera especial al fenómeno denominado *dualidad*

onda-partícula, “el único misterio”, según Feynman [10, 11]. El experimento a que se refiere este último y del cual afirma en su clásico texto [11] que “no se puede realizar” fue montado por primera vez en 1961 [12]. El clásico texto de Sakurai, más avanzado, presenta la versión de este experimento pensado para una situación más práctica, la que se refiere al espín del electrón, una cantidad exclusivamente cuántica [13]. De todo lo anterior surge el Principio de Superposición, a mi modo de ver el más fundamental de la nueva física. Suministramos varios enlaces a páginas en donde se presentan en forma sencilla los conceptos esenciales [14–20] y algunos videos didácticos [21–24]. Aunque el tema del entrelazamiento (no localidad), *un misterio mayúsculo*, no lo trataremos aquí, se expone bastante bien en [6] y virtualmente en [25]. Los efectos no locales, en los que Einstein nunca creyó, han dado origen a una segunda revolución cuántica. Todos los enlaces suministrados han sido revisados en la fecha en que se somete a la revista esta versión (01/06/2019).

1. ¿Qué es la fenomenología cuántica?

Aunque el comportamiento de la luz sigue siendo difícil de entender, ilustrarlo para algunas situaciones particulares ejemplifica mejor que cualquier otro la fenomenología cuántica. El efecto fotoeléctrico y el efecto Compton pueden tomarse como punto de partida [20]. Desde finales del siglo XIX (1887) se sabe que luz de alta frecuencia, violeta o verde por ejemplo, desprende carga negativa de los metales dejándolos eventualmente con carga eléctrica neta positiva, resultado que es fácil de comprobar mediante un electroscopio. Fue en 1897 cuando Joseph J. Thomson encontró experimentalmente que los átomos no eran indivisibles y que había unos corpúsculos diminutos con carga eléctrica que se desprendían de los mismos. Estas partículas resultan ser las mismas que se desprenden de los metales en el fenómeno que acabamos de señalar, por lo que se le denomina *efecto fotoeléctrico*. Las partículas desprendidas son precisamente electrones ligados a los metales. Lo que estamos diciendo, de paso, es que esos electrones no están fuertemente ligados a ese material que denominamos conductor. Dentro de un conductor los electrones pueden moverse *libremente*. Más adelante

se entenderá mejor esto qué quiere decir. Esa es también la razón por la que los cables eléctricos se hacen de cobre o de cualquier otro metal, preferiblemente de metales nobles: los electrones en su interior se desplazan libremente.

Lo que sorprende del efecto fotoeléctrico no es tanto que los electrones sean desprendidos del conductor, al fin y al cabo, es fácil imaginar que la luz suministra la energía necesaria para hacerlo. Es precisamente la energía que transporta un rayo de luz la que puede transmitirse a los electrones. Son más bien las condiciones en que se presenta dicho fenómeno lo que revela un comportamiento que no corresponde a lo que cabe esperar clásicamente. Uno podría creer que con un rayo de luz roja muy intenso se podría presentar el fenómeno, ya que la intensidad es sinónimo de energía. A mayor intensidad, más energía transporta el rayo. Para argumentarlo de otra manera, fueron experimentos similares a los que se realizan en una cubeta de agua (o en una piscina con olas) en la que se producen ondas sobre su superficie los que llevaron a la conclusión de que la luz es un típico fenómeno ondulatorio. Es característico de las ondas que su intensidad, es decir, la tasa a que transportan energía, sea proporcional al cuadrado de su amplitud. Pero no es eso lo que se observa en el efecto fotoeléctrico. Se observa un efecto puramente local o puntual que consiste en que algunos electrones son desprendidos de la superficie del metal, lo que solamente ocurre cuando la frecuencia de la luz excede determinado valor, dependiendo del metal. Es más fácil desprenderlos del oro que del plomo. Y si se usa luz de mayor frecuencia, violeta, por ejemplo, los electrones salen con mayor energía. Es como si la energía que pueden absorber los electrones fuera proporcional a la frecuencia de la luz incidente.

Eso fue precisamente lo que supuso Albert Einstein en 1905, con una hipótesis adicional: la luz está compuesta de corpúsculos diminutos que transportan energía. El padre de la relatividad era consciente de que la luz, supuestamente una onda, se mueve a la misma velocidad para todos los observadores sin importar la velocidad relativa a que se mueva el sistema de referencia en que se encuentre el observador, velocidad que nunca podrá exceder a la de la luz. Esa fue una de sus hipótesis cuando elaboró, en aquel memorable año, la teoría

de relatividad especial. Einstein entendió entonces que había dos enfoques aparentemente contradictorios del fenómeno de la luz: aunque se había demostrado desde hacía un siglo que era una onda, su comportamiento en el efecto que estamos discutiendo induce a pensar que se trata de corpúsculos, corpúsculos individuales que serían absorbidos por electrones individuales. En la imagen de Einstein, en el fenómeno que da lugar al efecto fotoeléctrico se presenta una especie de choque inelástico: una partícula, el fotón, choca con otra, el electrón, siendo absorbida por este último. Si se aplican los principios más básicos de la física, la conservación de la energía y la conservación del momentum o cantidad de movimiento, se puede entender lo que ocurre.

En el efecto fotoeléctrico, con luz visible, hay que tener en cuenta lo que se denomina *trabajo de extracción* de un electrón del metal. Puesto que el fotón incidente desaparece (*es aniquilado*), algo de su energía entrará a formar parte de la energía interna del electrón y el resto es energía empleada en desprenderlo: se trata de un choque totalmente inelástico. La conservación del momentum es trivial porque el residual es absorbido por el metal, como cuando una pelota choca contra una pared. (Para quienes no han visto un curso de física previo, recuérdese que la conservación del momentum es consecuencia en la mecánica clásica de la ley de acción y reacción, denominada tercera ley de Newton; pero es un principio todavía más general, válido también en la física cuántica.)

Otra posibilidad es un choque elástico. Fue lo que se hizo para explicar el denominado Efecto Compton, descubierto en 1923, que consiste básicamente en un cambio en la frecuencia de la luz, para el caso rayos X dispersados por un cristal: aceptando que la energía de los fotones es proporcional a la frecuencia de la luz que se observa, al chocar uno muy energético con un electrón (prácticamente libre, pues su trabajo de extracción en ese caso es despreciable si se compara con la energía de los fotones incidentes), este sale disparado con alta energía produciéndose un fotón residual de menor frecuencia (por ende menor energía) que el incidente. Al aplicar las dos leyes de conservación mencionadas, debe tenerse en cuenta que la velocidad del electrón es una fracción considerable de la de la luz y hay que echar mano de la relatividad especial [3].

Cinco años antes que Einstein, Max Planck había propuesto algo similar a la hipótesis de Einstein pero en forma inversa. Vamos a examinar el núcleo de su argumentación. Se sabe desde hace mucho tiempo que los objetos materiales emiten y absorben energía en forma de radiación electromagnética. La radiación electromagnética que hay en el ambiente, en cualquier ambiente, consta en principio de ondas electromagnéticas de todo tipo de frecuencias. Es por ese descubrimiento teórico sin precedentes por lo que a Maxwell se le reconoce como el físico más notable del siglo XIX, solo superado en fama en los siglos anteriores por Newton, más conocido por haber formulado las leyes del movimiento de los cuerpos y de la gravitación universal. Maxwell lo es por las leyes del electromagnetismo, pero los dos formularon otras teorías físicas igualmente importantes.

Pues bien, la radiación electromagnética que emiten los cuerpos es lo que nos permite percibirlos. Al calentar un trozo de hierro, este va cambiando su color: a una cierta temperatura se verá rojo y poco antes de fundirse se torna anaranjado o amarillo. En otros objetos se alcanza a ver su cambio de color a lo largo de todo el espectro visible, del rojo al violeta, a medida que se calienta. En términos físicos, hay una frecuencia privilegiada a la que emiten mayor energía, dependiendo de la temperatura del objeto, pero esa frecuencia crece aproximadamente en forma lineal con la temperatura, o a la inversa; en otras palabras, la longitud de onda del color más destacado es inversa a la temperatura. Si la temperatura es muy baja, el máximo puede presentarse en la región de microondas; es lo que ocurre con la radiación cósmica de fondo, a una temperatura de 2.7 K.

El problema para Planck consistió en que la teoría de Maxwell no encajaba con lo observado. Ella predecía algo que afortunadamente no ocurre, *la catástrofe en el ultravioleta*. No habría un máximo de frecuencia a la que el objeto emite mayor energía; más bien el objeto emitiría más y más a mayores frecuencias, lo que sería absurdo y haría inestable la materia.¹ Planck supuso que a muy baja frecuencia el objeto no emite precisamente porque su

¹La situación sería similar a la de un diapasón que vibra a determinada frecuencia f y produce ondas sonoras precisamente de esa frecuencia que se propagan a velocidad $V = f\lambda$, siendo λ la longitud de onda.

frecuencia es nula (la energía emitida sería proporcional a la frecuencia, lo mismo que supuso Einstein un lustro después, pero para la radiación misma); a alta frecuencia la probabilidad de emisión sería cero porque eso exigiría una energía muy grande. La forma en que Planck pudo finalmente reproducir los resultados experimentales fue *cuantizando* la energía emitida o absorbida. La tasa de energía radiada o absorbida por los objetos materiales a una cierta frecuencia de la radiación emitida o absorbida no podía ser cualquiera sino dosificada, debido a la *cuantificación* de la energía, dada esta por números o paquetes discretos con valor $hf : E = nhf$, siendo n un número entero positivo, f la frecuencia de la radiación y h una constante universal extremadamente pequeña. Posteriormente se determinaría que el valor de esa constante es $6.6 \times 10^{-34} J \cdot s$. (Joules, símbolo J , es la unidad de energía en el sistema internacional, SI; s es por supuesto el símbolo de la unidad de tiempo en segundos.) Una energía de ese orden de magnitud es imposible de medir aun hoy en día. Pero la constante se pudo determinar al cabo de varios años con bastante precisión. Sus unidades son de *acción*. No entraremos a discutir qué significa eso físicamente por ahora.

En resumen, la materia absorbe la energía que ya está cuantizada en el espacio (léase *en el campo de la radiación electromagnética*), espacio que por supuesto no es vacío: contiene energía; de la misma manera, la materia compuesta por átomos (Planck no lo veía de esa manera pero Einstein sí) solo entrega energía al espacio en forma discreta y la absorbe de la misma manera. Las dos hipótesis, la de Planck y la de Einstein, parecidas pero distintas, conducen a lo mismo. Einstein llevó más lejos su hipótesis y una década más tarde formuló las leyes de la radiación que llevan su nombre: son las que se utilizan para diseñar los generadores de LASER, el tipo de radiación muy singular a la que nos hemos referido en la nota introductoria que sirvió de presentación a este fascículo. Agreguemos que Einstein previó también, en su fórmula de energía, la llamada desintegración nuclear.

Volvamos al átomo desde otro punto de vista, el de Niels Bohr. En 1913 ya era claro que el átomo está prácticamente vacío. Salvo por el núcleo, en donde se concentra la carga que convencionalmente se

denomina positiva, la de los protones, el resto estaría desprovisto de materia, excepto por la presencia de los diminutos electrones que inicialmente se supuso orbitarían alrededor del núcleo. El problema ahora es que la teoría electromagnética clásica predice que ese modelo atómico, el de Rutherford, conduce a un átomo inestable, por ende, la materia por ellos constituida. Trabajando precisamente en el laboratorio de este último en Manchester, el danés Bohr tomó prestada la hipótesis de cuantización de la energía de Planck y Einstein y cuantizó también otra cantidad física: el momentum angular. Para decirlo en forma sencilla, hay dos cantidades físicas de gran importancia para estudiar el comportamiento de las partículas o corpúsculos y de los objetos masivos, en general: la cantidad de movimiento lineal (*momentum*) y la cantidad de movimiento angular o momento del momentum, en español denominada también *momento cinético*, ignoro por qué: los dos están asociados al movimiento.

Pero mientras el primero se refiere al movimiento de traslación, el segundo se debe a la rotación, característica de los electrones en el átomo, por supuesto: ellos no pueden estar quietos, como equivocadamente había supuesto Thomson cuando elaboró su modelo después de descubrir esa partícula que sigue siendo la más elemental de la materia estable. El momentum lineal es un vector que resulta de multiplicar la masa por la velocidad. El momentum angular es un (pseudo)vector resultante de lo que se denomina un producto vectorial. En magnitud, para un movimiento circular, el momentum angular (un vector que designaremos por la letra \mathbf{L}), es el producto del momentum lineal por el brazo o distancia del punto alrededor del cual gira la masa m de momentum p . En símbolos, si p es simplemente mv , siendo v la rapidez o magnitud de la velocidad, $L = rp$. (Para quienes gusten de la expresión precisa, la escribimos: $\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p}$; el momentum angular es un vector perpendicular al plano en que se mueve el objeto o partícula.) Es claro que si L está cuantizado, es porque r (léase órbita) también lo estará. Ese fue el segundo postulado de Bohr, la cuantización de las órbitas, resultado de la cuantización de la energía. El lector inquieto podrá imaginar que, si nos limitamos para mayor sencillez a las magnitudes, el momentum lineal también estará cuantizado.

¡Una idea genial, preludio a la cuantización de todo!

Bohr supuso que la magnitud de L estaría cuantizada en la misma forma en que lo está la energía. Si esta es $E = nhf$, como se indicó antes, aquella es $L = n\hbar$, con $\hbar = h/2\pi$. El divisor 2π es muy importante y resulta del hecho de que cada vuelta o revolución es un giro de 2π radianes. A cambio de la frecuencia f se suele hablar de frecuencia angular, lo que no es más que una alusión al movimiento angular, con velocidad angular ω . En otras palabras, $\omega = 2\pi f$. Descuide el lector si esto le incomoda, lo importante es recordar que el *momento angular*, como equivocadamente le decimos en español a la cantidad L , está cuantizado en el átomo, al igual que la energía. Todo, en principio, está cuantizado, es decir, toma valores discretos o es un múltiplo entero de ciertas cantidades, para el caso que nos ocupa la \hbar (se denomina h-barra). En estas unidades, $E = n\hbar\omega$.

Hay, pues, tres hipótesis que formuló Bohr en su intento por explicar la estabilidad del átomo y dar cuenta de otras cosas: 1) como consecuencia de la cuantización de la energía, las órbitas de los electrones están cuantizadas (posteriormente se llamarían orbitales); 2) los momentos angulares, también cuantizados, son múltiplos enteros de h-barra (consecuencia de lo anterior, pero en coincidencia con la cuantización de la energía); 3) cuando los electrones emiten o absorben energía, lo hacen en cantidades discretas, precisamente en cuantos de energía con valor $\hbar\omega$. Para el segundo caso, llamando E_f y E_i respectivamente las energías final e inicial, $E_f - E_i = \hbar\omega$.

2. El electrón y el fotón tienen comportamientos similares

Las hipótesis de Bohr resultaron muy adecuadas para el caso del átomo de hidrógeno: explicaron cuantitativamente las líneas espectrales de dicho átomo. No ocurrió lo mismo en otros casos, y habría que esperar una década más para que surgiera una nueva hipótesis que diera lugar finalmente a una nueva teoría. Esa fue la hipótesis de *ondas de materia* formulada por el príncipe Louis de Broglie en 1923. Para entonces Arthur H. Compton había realizado el experimento mencionado atrás que era la mejor demostración del carácter corpuscular de la luz: el desplazamiento en la longitud de

onda de rayos X que incidían sobre un metal o un semiconductor. Asumiendo que los rayos X son fotones de muy alta energía (son radiación por encima del violeta), un fotón que logra colisionar un electrón en el metal, para todos los efectos un electrón libre en reposo, es dispersado en cierta dirección de acuerdo con los principios de conservación de la energía y del momentum. La *frecuencia* (léase energía) del fotón residual es menor que la del inicial, pues parte de su energía (no toda, a diferencia del efecto fotoeléctrico) se transfirió al electrón.

Si la luz, siendo una onda, se comporta en ocasiones como un chorro de partículas, el electrón, una partícula que también se obtiene *a chorros* bajo ciertas condiciones, bien podría ser que se comportara como onda. Eso fue lo que supuso de Broglie mientras trabajaba en su tesis de doctorado. Sobra decir que su conjetura, por inverosímil que pudiera parecer, fue acertada. De la misma manera que Einstein encontró una relación entre la cantidad de movimiento y la longitud de onda de los fotones que componen la luz, el príncipe francés halló una relación entre la longitud de onda de los electrones y su cantidad de movimiento: $\lambda = h/p$. Esta relación ya la había encontrado Einstein para los fotones y Planck la extendió a los electrones. La conclusión es que la longitud de onda asociada a los electrones es muy pequeña, generalmente una fracción de nanómetro o ångström (simbolizado por Å, unidad de longitud así llamada para honrar la memoria del famoso espectroscopista sueco Anders Jonas Ångström de mediados del siglo XIX). Un Å es una décima de nanómetro (nm). El nm es la milésima de la milésima de la milésima de metro (una milmillonésima o 10^{-9} m). Volveremos a las implicaciones del tamaño en la siguiente sección. Por ahora queremos destacar que los objetos cuánticos exhiben un comportamiento dual: en algunas ocasiones se manifiestan como ondas, en otras como partículas. Este es el punto de partida para lo que se ha dado en denominar el misterio de la física cuántica [10, 11]; en realidad resulta ser un misterio para el modo de pensar a que estamos acostumbrados.

De Broglie trató de ir más lejos en su interpretación de las que él mismo llamó *ondas de materia*. Evidentemente Einstein había partido de las ondas de luz y arribado a corpúsculos de energía. La analogía era obvia: la luz es energía y hay una relación estrecha entre

la materia y la energía ($E = mc^2$), ya lo había demostrado el mayor genio de la física conocido hasta ese momento. A diferencia del electrón, el fotón no es algo que se pueda confinar salvo en cavidades adecuadas: la longitud de onda debe guardar una relación estrecha con las dimensiones de la cavidad. Esto se entiende más fácilmente si consideramos el caso de una cuerda fija por los dos extremos: solo pueden formarse ondas estacionarias cuando la frecuencia de la onda es tal que la longitud de onda resultante es un número entero de medias longitudes de onda [3].

Probablemente eso podría explicar la estabilidad del átomo: las órbitas permitidas serían tal vez aquellas que contuvieran un número entero de longitudes de onda, como ocurre con las ondas estacionarias en ciertos instrumentos musicales. Estas ideas, inspiradas en de Broglie (los experimentos de difracción de electrones a que nos referiremos a continuación no habían sido realizados aun), fueron las que llevaron a Erwin Schrödinger a proponer una función de onda para los objetos materiales y una ecuación de onda para describir su comportamiento. A ese asunto volveremos luego [3].

Por otro lado, esa fue una de las primeras grandes aplicaciones de la física cuántica: de ahí surgió el microscopio electrónico, instrumento sobre el cual versa uno de los artículos que forman parte de este número. Para terminar esta sección es conveniente mencionar que los rayos X fueron descubiertos el año anterior a aquel en que Thomson hizo su experimento, concluyendo que los rayos catódicos eran electrones. En 1927 el hijo de J.J. Thomson, George Paget, hizo experimentos equivalentes a los de difracción de rayos X con electrones, demostrando que el comportamiento de estos últimos era el mismo de aquellos. Simultáneamente Clinton Joseph Davisson retomó unos experimentos hechos con una placa de platino (supuestamente cristalino) que había realizado en 1923 con resultados negativos: repetidos cuidadosamente con níquel, los resultados no dejaron lugar a duda, los electrones exhiben el fenómeno de difracción característico de las ondas.

En los textos que sirven de base al curso mencionado en el resumen se da cuenta de muchos detalles que por brevedad omitimos aquí

[2, 3]. Entre 1925 y 1926 se elaboraron dos propuestas que contenían los ingredientes fundamentales para la nueva teoría en dos versiones diferentes, la llamada formulación matricial, de Werner Heisenberg, y la ondulatoria, de Erwin Schrödinger. Esta última es la más fácil de seguir, aunque su interpretación inicial fue equivocada. La de Heisenberg tiene en cuenta los valores discretos de las cantidades físicas, energía, momentum angular, cantidad de movimiento lineal, espín, etc. Este último había sido descubierto en 1922 y volveremos a él más adelante [13].

Concluimos esta sección enunciando lo que resulta ser la característica principal de la mecánica cuántica: todos los objetos se comportan exactamente de la misma manera. De cómo se pasa del comportamiento cuántico, generalmente imperceptible, al clásico que percibimos en la vida diaria, no nos ocuparemos aquí; esa es una discusión que no termina. Limitémonos, para precisar, a objetos microscópicos. Así, pues, digamos que los fotones, los electrones, los núcleos, los átomos, las moléculas y las macromoléculas como las proteínas y el ADN, de hecho todos los corpúsculos materiales o energéticos, se comportan igual, como ondas o como partículas. Nos referiremos en las siguientes tres secciones a experimentos que ilustran claramente lo que estamos afirmando. Introduciremos así *el principio de superposición cuántico*, el punto de partida del **misterio cuántico**, el único misterio según Richard Feynman [10, 11]. Al lector no familiarizado con las ondas clásicas le aconsejamos informarse de lo que debería denominarse *segundo principio de superposición clásico*, o superposición (clásica) de ondas [3, 9]. Los dos principios suelen confundirse en la literatura pero se refieren a fenómenos diferentes.

3. El misterio cuántico: experimento de las dos ranuras

Después de comparar los resultados radicalmente diferentes de ondas y partículas en el sentido clásico en el llamado *experimento de las dos ranuras*, Feynman propone hacerlo con electrones, un experimento supuestamente irrealizable para entonces, en una famosa *lecture* que recomendamos al lector [11]. El resultado con luz parecía inequívoco: *la luz se comporta como una onda*. Los

experimentos a que nos estamos refiriendo ilustran lo contrario: *la luz está compuesta de corpúsculos*. El experimento pensado, ilustrado en la figura 1, consiste en lo siguiente: se lanzan electrones contra una pared en la que se han hecho dos aberturas. En frente de la pared hay una pantalla y sobre ella se dispone un detector que medirá en intervalos de tiempo iguales la cantidad de electrones que llegan a cada región de la pantalla. Si una de ellas se obstruye, se obtiene una distribución de los electrones detectados como indican las curvas rotuladas P_1 o P_2 según se obstruya la ranura 2 o la 1 respectivamente. A diferencia de lo que cabría esperar (comportamiento de balas de cañón, de bolos o de canicas, véase [1] ó [9]), cuando los electrones pueden pasar por cualquiera de las dos aberturas su distribución en la pared es la característica de las ondas (figuras A2 a A5 en [9]) y no la simple suma de las distribuciones, $P_1 + P_2$ (figura 1 b). Para dar cuenta del resultado, habría que pensar que cada distribución es el módulo al cuadrado de una cierta función, ϕ_1 o ϕ_2 según el caso, y que para obtener la distribución compuesta primero se suman esas funciones: $\phi = \phi_1 + \phi_2$ (figura 1 c).

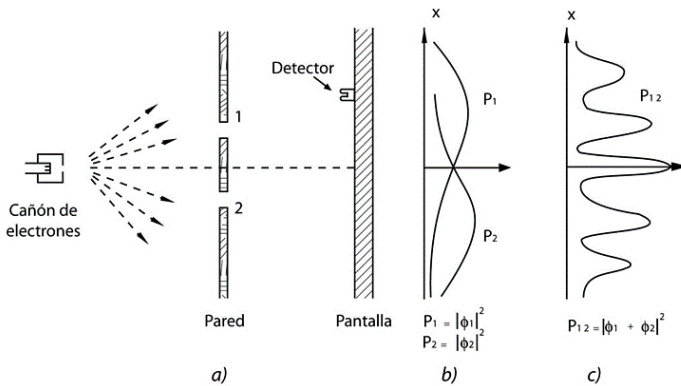


FIGURA 1. Experimento con electrones (reproducción del texto de Feynman).

Cuando Feynman propuso el experimento con electrones para las dos ranuras, era solo lo que se denomina un *experimento pensado*. En su conferencia advierte que no se podría realizar, pero ya Claus Jönsson lo había hecho realidad en Tübingen, Alemania [12]. La publicación de Jönsson (1961), de carácter pedagógico a pesar de lo

innovadora, pasó desapercibida para la comunidad científica porque no ilustraba nada que no se supiera: el resultado, aunque no se hubiera realizado antes, era justamente el esperado, así que nadie lo pondría en duda: es en esencia el mismo realizado por los grupos de Davisson y de Thomson. Hoy en día se ha realizado en distintas formas y con todo tipo de micro-objetos, hasta con moléculas de varios cientos de átomos. Estos son en la práctica de mucha más difícil realización, pero conceptualmente pueden ser más fáciles de entender. Ocurre lo contrario con los experimentos de difracción que permitieron comprobar desde muy temprano la hipótesis de de Broglie, aunque su andamiaje teórico es más sofisticado.

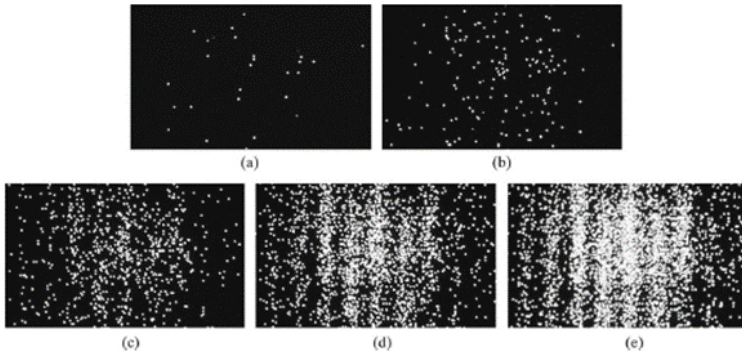


FIGURA 2. *Experimento con fotones individuales.*

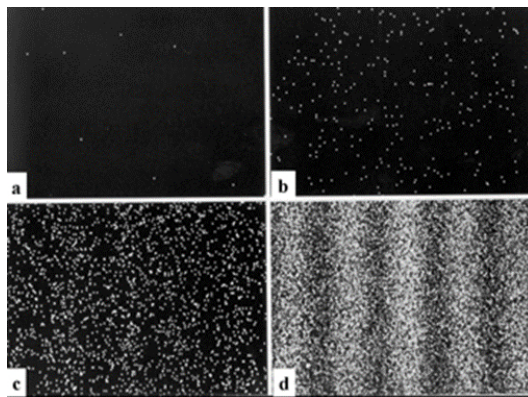


FIGURA 3. *Experimento con electrones individuales.*

En las figuras 2 y 3 se ilustran los resultados de dos experimentos reales de tipo dos ranuras hechos con fotones individuales y con electrones individuales. La diferencia práctica y conceptual es que los fotones y los electrones son emitidos desde una fuente uno a uno y registrados en un detector uno por uno. Es de advertir que no se sabe en ninguno de los dos casos que ha pasado en el intermedio, es decir, ignoramos cual ha sido *la trayectoria* de cada uno de esos supuestos corpúsculos. A medida que aumenta el número de partículas que llegan a una pantalla en donde son detectadas, emerge cada vez en forma más nítida un patrón de interferencia como si se tratara de ondas. Los resultados son incontrovertibles: la partícula cuántica (electrón o fotón) sabe de antemano donde debe o puede manifestarse, evitando siempre ciertas regiones *prohibidas*. En otras palabras, cada partícula tiene que interferir consigo misma, de manera similar a como hacen las ondas. Hay que recordar que las ondas clásicas son perturbaciones distribuidas en el espacio. En el presente caso se trata de una supuesta partícula que se distribuye en todo el espacio mientras no se detecte (véase además figura 10 y la discusión respectiva en la sección 6).

4. Interferómetro de Mach-Zehnder

Los interferómetros han jugado un papel crucial en los últimos siglos. Por mencionar solo tres, el de Fabry-Perot echó por el piso la teoría del éter luminífero, el LIGO (*Laser interferometer gravitational-wave observatory*) demostró la existencia de las ondas gravitacionales y el de Mach-Zehnder (MZI) ha jugado un papel crucial en establecer los efectos cuánticos no locales a los que nos referiremos muy brevemente al final de esta introducción a los misterios cuánticos (véase [3], [6] y [9]).

El MZI se esquematiza en la figura 4. Su funcionamiento básico es el siguiente: un pulso de luz monocromática incide sobre un espejo semitransparente, usualmente semiplateado, denominado divisor del haz o simplemente divisor porque divide a este en dos haces de igual intensidad; de ellos, uno se refleja siguiendo el camino 1 y otro se transmite siguiendo la trayectoria 2; los dos encontrarán en su camino espejos totalmente reflectores que les obligará a

reencontrarse de nuevo y formar imágenes en los detectores 1 y/o 2 si se interpone al final un segundo divisor del haz; para lograr el reencuentro basta inclinar los espejos divisores y reflectores 45 grados respecto a la dirección en que avanza el haz en cada sección. A los divisores del haz les denotaremos D1 y D2, respectivamente. Al haz que va por el camino 1 se le obliga a cruzar por un selector de fase (no mostrado en la figura) antes de que llegue al D2. Este instrumento es muy versátil y se puede utilizar con diferentes propósitos. En ausencia del selector de fase, cuando la longitud de los dos caminos es la misma, sólo se formará imagen en el detector 1 (la explicación se da más adelante).

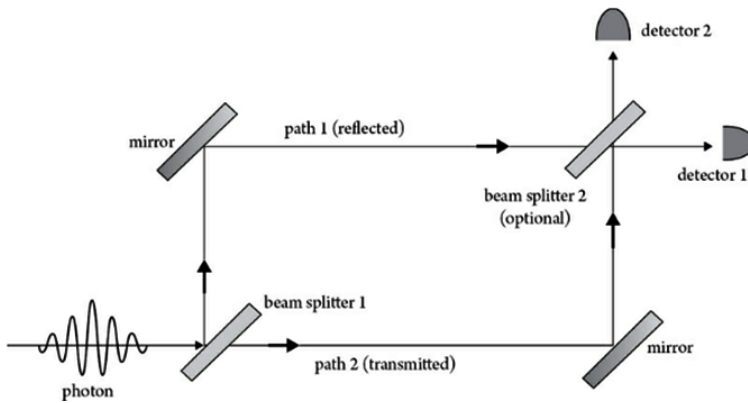


FIGURA 4. *Interferómetro de Mach-Zehnder. En el camino 1 se interpone un selector de fase.*

Vamos a examinar cuidadosamente lo que ocurre en el interior de los divisores de haz y del selector de fase en términos clásicos. El divisor de haz 50-50 o espejo semiplateado es una delgada lámina transparente a la que se recubre con una capa metálica mucho más delgada, usualmente plata. Su espesor se ajusta de tal manera que la intensidad de los dos haces, del transmitido y del reflejado, sea la misma. Recuérdese que un haz de luz es un enjambre de fotones. Así pues en condiciones ideales el efecto de la placa recubierta es dejar pasar cada fotón con una probabilidad de un 50% o hacer que se refleje con la misma probabilidad. Téngase presente que la lámina transparente tiene dos caras y solo una de ellas se recubre con la capa metálica. Para la configuración mostrada en la figura 4, en el D1 la capa metálica recubre la superficie por donde sale parte

del haz, la que va por el camino 2, mientras que la parte reflejada precisamente en esa cara después de recorrer el interior de la lámina toma el camino 1; lo contrario se hace en el D2: la parte del haz que había tomado el camino 1 encuentra primero el espejo antes de dividirse de nuevo. Este detalle es importante para lo que sigue. El selector de fase ocasiona un retraso en el haz que toma el camino 1 si se le compara con el que va por el camino 2. Ese retraso o cambio de fase se traduce en términos de fracciones de longitud de onda adicionales para el recorrido del camino 1.

Como podrá imaginar fácilmente el lector, hoy se hacen fácilmente experimentos con fotones individuales y es sobre esta base que describimos este experimento pensado. Desde el punto de vista conceptual, al utilizarlo de esa manera hay varias conclusiones que podemos extraer las cuales enumeramos en esta sección. Asumamos, para empezar, que se ha removido D2. Si el fotón se refleja en D1, seguirá el camino 1 y llegará sin duda al detector 1. Lo contrario ocurre si se transmite a través de D1, siguiendo el camino 2: al reflejarse en el espejo que encuentra, llegará finalmente al detector 2.

Lo primero que se observa es que siempre se detectan fotones enteros, no fracciones de fotones; uno podría imaginar que eventualmente un fotón se dividiera en dos partes al llegar a D1 y que cada una de ellas siguiera por un camino diferente, pero eso nunca ocurre. ¿Qué significa entonces que el haz incidente se divide en dos partes iguales, dos haces de igual intensidad? Significa que si hacemos muchísimas veces el experimento de un solo fotón incidente, muy aproximadamente la mitad de las veces el fotón será detectado en el detector 1 y otro tanto en el detector 2.

Podríamos creer entonces que en cada experimento individual el fotón escogerá aleatoriamente el camino 1 o el camino 2 con la misma probabilidad. Es mejor no adelantarnos a los hechos. Para estar seguros imaginemos que se coloca un detector en frente de D1 en el camino 1 de tal manera que un fotón emitido y reflejado en D1 necesariamente se cruza con el detector interpuesto. Como era de esperar, en ocasiones este primer detector revela que pasó un fotón y en el mejor de los casos el detector 1 confirmaría que

siguió el camino 1. Es de advertir que la detección de un fotón puede aniquilarlo. Por el contrario, habrá ocasiones en que no se detecta el fotón emitido en el detector que hemos colocado en frente de D1, descartándose la posibilidad de que el fotón haya seguido la trayectoria 1; en estos casos el detector 2 invariablemente nos mostrará que el fotón siguió la trayectoria 2: no detectarlo por el camino 1 equivale a saber que ha seguido por el camino 2.

Con el D2 removido podemos observar fotones individuales todo el día y nunca sabremos con seguridad cuál de los dos caminos va a escoger uno de ellos. Esto ocurre en forma completamente aleatoria. En otras palabras, el camino escogido en cada ocasión no depende del resultado del evento anterior: son totalmente independientes. Tenemos que hacer ese mismo experimento muchísimas veces para concluir que aproximadamente la mitad de las veces el fotón incidente se refleja en el D1 y la otra mitad de las veces, 50 %, se transmite. No hay nada que determine lo que hará cada fotón, pues todos ellos se han preparado en idénticas condiciones: son fotones idénticos.

Veamos qué ocurre cuando interponemos el D2 en frente de los detectores 1 y 2, como indica la figura 4. Imaginemos primero dos variantes del experimento antes de examinar la situación que más nos interesa. Reemplacemos primero el D1 por un espejo totalmente reflector: con toda seguridad el fotón va a seguir el recorrido 1; al llegar a D2, para un número muy grande de experimentos, la mitad de las veces atravesará el divisor siendo detectado por el detector 1 y otras tantas se reflejará siendo detectado por el detector 2. Removamos ahora el D1: hemos obligado al fotón a seguir el recorrido 2. De nuevo, para un número muy grande de experimentos, aproximadamente la mitad de las veces los fotones llegarán al detector 1 y otro tanto al detector 2, pues la probabilidad de que el fotón que ha seguido el camino 2 sea transmitido al llegar a D2 es la misma de que sea reflejado por este: 50 % de probabilidad en cada situación.

Cuando se hace el experimento en la forma en que se indica en la figura 4, sin el selector de fase, con los dos detectores en su sitio y los recorridos 1 y 2 exactamente iguales en número de longitudes

de onda, los resultados cambian por completo. Vale la pena examinar minuciosamente qué es lo que puede estar ocurriendo. Para entenderlo más fácilmente podemos partir de los resultados de la figura A3 en [9] ilustrados para ondas clásicas y aceptar que los fotones se comportan como ondas. Las ondas tienen como propiedad fundamental la superposición. En términos clásicos, el argumento es el siguiente: Cuando un pulso de ondas (un haz) procedente del emisor al lado izquierdo del interferómetro incide sobre el primer divisor del haz, supuestamente simétrico, 50 % del haz se refleja y otro tanto se transmite, siguiendo respectivamente los caminos 1 y 2. Al llegar a los espejos totalmente reflectores en las condiciones indicadas, los haces se van a cruzar e interferir de nuevo en el divisor 2. Como explicaremos a continuación, las partes de cada haz que avanzan hacia el detector 1 se encuentran en fase; lo contrario ocurre para las componentes que avanzan hacia el detector 2, que se encuentran en antifase. El resultado es que llegará luz, en general radiación, al detector 1 y no llegará al detector 2. Para lograr iluminación en el detector 2 debemos, en condiciones ideales, modificar el recorrido y eso es lo que haremos interponiendo en el camino 1 el selector de fase. Veamos por qué.

Las ondas electromagnéticas que llegan desde el vacío a un espejo se reflejan con una diferencia de fase de 180 grados. Visto desde la perspectiva de las ondas y teniendo en cuenta lo que acabamos de decir, la luz que llega al detector 1 procede de dos caminos que tienen la misma longitud (misma separación en términos de longitudes de onda); cada haz se ha reflejado dos veces y por lo tanto los dos llegarán en fase. No pasa lo mismo con el haz que llegaría al detector 2: la mitad del haz, la que ha hecho el recorrido 2, ha tenido solamente una reflexión, mientras que la otra parte, la del recorrido 1, ha tenido tres reflexiones. Una de ellas, la primera, en el interior de D1, sin cambio de fase; las otras dos, en el espejo totalmente reflector y en la capa externa de D2, cada vez con cambio de fase π , es decir con cambio de fase total 2π . No olvide que la del recorrido 2 tuvo un cambio de fase π . Esto introduce una diferencia de fase entre los dos haces de 180 grados (π radianes), por lo que llegan al detector 2 en antifase, con una diferencia de fase de 180 grados, y por lo tanto no se formará imagen en condiciones ideales.

En la práctica es muy difícil balancear o igualar exactamente las dos partes, reflejada y transmitida, por lo que llegará un poco de luz al detector 2.

Esta imagen clásica, aunque satisfactoria para un haz de luz que se comporta para todos los efectos prácticos como una onda clásica, pierde validez por completo cuando examinamos el comportamiento de cada uno de los eventos individuales, fotón por fotón. Habíamos concluido, tal vez apresuradamente, que un fotón individual sigue la trayectoria 1 o la trayectoria 2. Examinemos detenidamente esa posibilidad a partir de los diferentes experimentos realizados y los resultados obtenidos.

Hay una diferencia radical entre los dos tipos de resultados que hemos obtenido: aquellos en que pudimos identificar una trayectoria definida para cada fotón y los que no nos lo permiten. En los primeros experimentos sabíamos de antemano qué trayectoria estaba siguiendo el fotón. El último pertenece al tipo de experimentos que no permiten saber la trayectoria. Lo que se encuentra en este caso es una ratificación de lo que ya se vio en el experimento de las dos ranuras hecho con luz o con electrones (sección 4 en particular). Si el lector no está familiarizado con este experimento, le aconsejamos volver a él [1, 3, 11]. Veremos que en estos casos el comportamiento del objeto cuántico, cualquiera que sea, fotón, electrón, átomo, molécula, virus... *es como de onda*, pero no podemos afirmar que se trata de una onda. Por el contrario, si podemos asociar una trayectoria al objeto cuántico, su comportamiento es como de partícula, mas no podemos asegurar que sea una partícula.

El resultado del experimento que se acaba de mencionar con fotones individuales es inexorable: se detectarán fotones en el detector 1 y, por el contrario, no se detecta el arribo de fotones al detector 2. La única explicación posible es que el fotón ha interferido consigo mismo, es decir, ha decidido seguir las dos trayectorias simultáneamente, comportándose como una onda. Dicho en términos matemáticos, la única imagen incontrovertible que podemos construir es esta: la onda o cualquier otro ente matemático que represente al fotón, por ahora la denominaremos función de onda, al llegar al primer espejo semiplatado o divisor

(D1) se separa en dos componentes, cada una por los dos caminos permitidos con el mismo peso; esas dos componentes se reencuentran en el segundo espejo semiplateado D2 dando lugar a una nueva onda (matemáticamente función de onda) y en últimas al objeto que podemos detectar nuevamente como un fotón solamente en el detector 1, para este caso. Para decirlo más prosaicamente: el fotón explora las dos ramas al mismo tiempo en ausencia de nuestra supervisión y aparece en el detector 1 en el momento preciso en que tiene que aparecer, cuando es detectado.

La anterior configuración (dos ramas del MZI dispuestas de tal manera que el fotón sea percibido en el detector 1) es apenas una de las muchas, de hecho innumerables, configuraciones. Hay otro experimento que podemos hacer: mediante el selector de fase variar uno de los caminos de tal manera que lo que sea que represente al fotón en la rama escogida (una parte de la onda en la imagen clásica) tenga que recorrer una fracción adicional de longitud de onda. Este experimento se ha hecho cuidadosamente, dando el resultado que se ilustra en la figura 5. Obsérvese que en cada experimento con un fotón individual el fotón ha seguido las dos trayectorias simultáneamente y solo en el momento de la detección escoge el detector al que llegará. Si al final del recorrido no hubiera detectores, el fotón continuaría por las dos trayectorias permitidas simultáneamente.

Vamos a ocuparnos de otros dos experimentos que nos llevarán, conjuntamente con los anteriores, al enunciado del más importante principio cuántico, el de superposición cuántica.

5. Polarización y espín

El experimento anterior podría hacerse también con electrones. Para entender cómo funciona necesitamos primero explicar una propiedad exclusivamente cuántica que se ha denominado **efecto túnel**, tratado ampliamente en uno de los capítulos de este número. (Véase también [16]). Lo resumiremos más adelante.

El lector se habrá preguntado qué es lo que hace que un fotón pueda o no atravesar una sustancia material, una lámina de vidrio, por ejemplo. Si la lámina es demasiado gruesa, esto es prácticamente

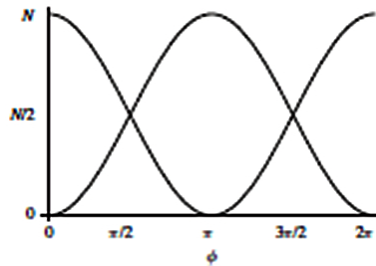


FIGURA 5. Resultados del experimento realizado con el interferómetro de Mach-Zehnder con fotones individuales cuando se varía el recorrido 1 o lo que es equivalente, si se cambia la diferencia de fase de las dos componentes en que se divide la onda entre 0 y 2π . Recuérdese que la diferencia de fase inicial entre las dos componentes es π para el detector 2. Después de un elevado número de experimentos (N) para cada diferencia de fase, se observa que el número de fotones que llega a cada detector es el que indican las dos curvas superpuestas. Al comienzo todos los fotones llegan al detector 1; cuando la diferencia de fase introducida por selector de fase es de un cuarto o tres cuartos de longitud de onda (diferencia de fase de $\pi/2$ o $3\pi/2$), a cada detector llega el mismo número de fotones; si la diferencia es π , todos llegan al detector 2, y así sucesivamente.

imposible. Si la lámina tiene un recubrimiento metálico grueso también, aunque la lámina sea muy delgada. Se puede variar el recubrimiento metálico desde 0 hasta un cierto valor que dificulte o haga prácticamente imposible la transmisión o paso del fotón a través de la lámina delgada. Otra posibilidad es que ocurra la absorción o *aniquilación* del fotón, situación de la que no nos ocuparemos por ahora.

Otros objetos cuánticos también pueden atravesar láminas delgadas bajo ciertas circunstancias; es el caso de un electrón que incide sobre una lámina de material semiconductor de unas cuantas micras o menos de espesor, presentándose el fenómeno de tunelamiento que acabamos de mencionar. Por ahora nos limitaremos a decir que en condiciones *normales*, las establecidas por la física clásica, el electrón no podría hacerlo porque se violaría el principio de conservación de la energía. Volveremos a este asunto más adelante.

Hay propiedades intrínsecas de los objetos cuánticos que se manifiestan macroscópicamente. En esta sección nos referiremos brevemente a dos de ellas que tienen enorme importancia científica y

tecnológica, la polarización y el espín. Una de ellas, la polarización, está asociada particularmente a la luz, es decir, a los fotones. La otra, el espín, es más general pero reviste especial importancia en el caso de los electrones.

Empecemos con la polarización de la luz. Una característica de las ondas electromagnéticas es que son transversales. En términos sencillos esto quiere decir que los campos eléctrico y magnético oscilan en dirección perpendicular a la de propagación de la onda. Es conveniente tomar como referencia el campo eléctrico. Para precisar, supóngase que la dirección de propagación de la luz es horizontal. El campo eléctrico, perpendicular a esta, tendrá entonces en general dos componentes perpendiculares a la anterior; podemos escoger que una sea vertical y la otra horizontal; si están presentes las dos componentes en forma definida, la polarización es oblicua. De acuerdo con la dirección en que oscila el campo eléctrico en el plano perpendicular al de propagación, se habla de luz polarizada vertical, horizontal u oblicuamente; como en general esa dirección es aleatoria, se dice que la luz proveniente de una fuente cualquiera no está polarizada. Algunos materiales tienen la propiedad de dejar pasar la luz solamente en una cierta dirección: son muy convenientes para producir luz polarizada precisamente en esa dirección y se denominan por eso polarizadores. Si se colocan sucesivamente un polarizador en dirección horizontal y otro en dirección vertical, el primero producirá luz polarizada 100 % en dirección horizontal y el segundo obstruye totalmente su paso. Si en el intermedio se colocara un polarizador inclinado 45° , dejaría pasar solo el 50 %. En este caso el polarizador vertical dejará pasar un 25 % de la luz que atravesó el primer polarizador, en contraste con la anterior disposición en la que se obstruyó por completo el paso de la luz. Estas situaciones se ilustran esquemáticamente en la figura 6.

Vale la pena examinar lo que ocurre en cada una de las situaciones anteriores. En las dos configuraciones el primer polarizador hace que la luz que lo atraviere esté polarizada en dirección horizontal. Para ello ha tenido que eliminar o absorber la otra componente. Si utilizamos la imagen de corpúsculos, esto quiere decir que de los fotones que salieron de la fuente no polarizada solamente la

mitad sobrepasó el primer polarizador. Recuérdese que los fotones no se fraccionan, por lo que siempre pasarán fotones enteros o serán obstruidos (absorbidos) fotones enteros. En la configuración a), ninguno de ellos logrará sobrepasar el segundo polarizador, porque su campo asociado una vez que cruzan el primer polarizador es horizontal. En la configuración b), al encontrar el polarizador inclinado 45° solo la mitad de ellos podrá pasar. Veamos por qué. La situación es diferente a la que se presenta en el MZI porque en ese caso los fotones son transmitidos o reflejados.

En el presente caso, al llegar al polarizador inclinado, el campo eléctrico se descompone en una componente paralela al polarizador y otra componente perpendicular. En la imagen cuántica el campo eléctrico lo transporta el fotón. Debido a la primera componente, pasará la mitad de la amplitud del campo, es decir, la probabilidad de transmisión es del 50 %. Recuérdese que la probabilidad depende de la amplitud del campo. Pero recuérdese también que se trata de partículas que o bien pasan o no pasan como tales (son absorbidas), sin dividirse. Al pasar, lo hacen con su campo eléctrico oscilando en dirección paralela al polarizador.

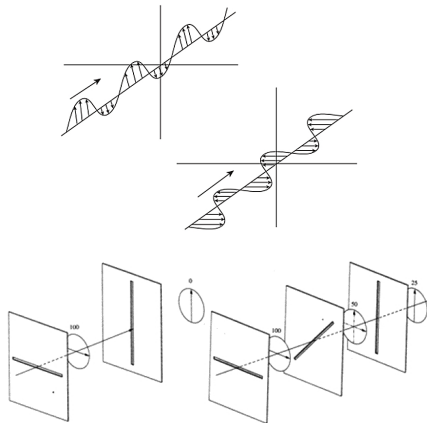


FIGURA 6. Polarización de la luz. a) Luz polarizada vertical u horizontalmente. b) Dos polarizadores cruzados. c) Se interpone un polarizador oblicuo entre los dos polarizadores cruzados.

El lector encontrará más fácil las lecciones que se pueden sacar de este experimento si piensa solo en fotones individuales. ¿Qué

es lo que ocurre cuando un fotón emitido por un átomo llega a un polarizador con una orientación determinada, asumamos que la vertical? La respuesta es clara: pasa o no pasa. Dijimos emitido, pero en realidad el fotón ha sido creado en un átomo mediante un proceso que ha sido aleatorio: un electrón pasó de un cierto valor de energía a otro menor en un tiempo cero, dando lugar a un fotón de energía muy precisa, justo la diferencia entre estos dos valores. Cuando el fotón arriba a donde está el polarizador puede ser absorbido o transmitido. ¿Esto qué quiere decir? En el primer caso fue aniquilado, de la misma manera en que fue antes creado. Al ser absorbido (aniquilado) su energía modifica la de un electrón que pasa de un cierto valor de energía a otro mayor en un tiempo cero. En el segundo caso no pasa aparentemente nada y sigue su rumbo, pero en realidad sabemos que ha adquirido una polarización vertical. Decimos que la ha adquirido porque antes tenía cualquier orientación. La observación creó el valor que ahora conocemos con precisión. Si el polarizador hubiera estado en dirección horizontal el argumento sería el mismo y el resultado final habría sido un fotón con polarización horizontal.

Vamos ahora a referirnos al espín del electrón. En presencia de un campo magnético el electrón exhibe un comportamiento hasta cierto punto en paralelo con el del fotón en presencia de un polarizador en el experimento anterior. Recuérdese que una brújula tiene la tendencia a orientarse en la dirección del campo magnético. Se dice que la brújula es un dipolo magnético que tiende a orientarse en esa dirección; la cantidad física que da cuenta de esta propiedad es un vector denominado momento (de dipolo) magnético. Las limaduras de hierro no necesariamente están imantadas, pero en presencia de un campo magnético adquieren esa propiedad, propiedad que nos sirve a la vez para detectar la presencia del campo mismo. Si se sostiene horizontalmente una hoja plana que contiene partículas de hierro y se hace pasar, atravesando la hoja, un alambre recto que lleva corriente en dirección vertical, se observa cómo las partículas se alinean formando círculos concéntricos. Ellos reflejan la dirección del campo magnético producido por la corriente que circula por el alambre. Las líneas del campo son círculos concéntricos al alambre.

Pues bien, el electrón es como un pequeño imán. Aunque el efecto es ligeramente diferente y rigurosamente hablando es de origen cuántico relativista, esto fue lo que descubrieron Otto Stern y Walther Gerlach mediante un experimento como el que se ilustra en la figura 7. En él un campo magnético inhomogéneo no solamente orienta el dipolo magnético en dirección paralela o antiparalela al campo (por ende el momentum angular intrínseco va a ser antiparalelo o paralelo respectivamente), sino que también lo desvía. La desviación es proporcional al valor del dipolo, o lo que es lo mismo, del momentum angular. Clásicamente se esperaría que los electrones fueran desviados aleatoriamente dentro de un cierto rango como el indicado por la línea vertical. Lo que se observa es muy diferente. Sin entrar en detalles, el resultado de sus observaciones revela que hay un momentum angular intrínseco del electrón que está cuantizado, tomando solo valores $\frac{1}{2}\hbar$ o $-\frac{1}{2}\hbar$ dependiendo de que el momento magnético asociado apunte en dirección antiparalela o paralela al campo magnético aplicado, un campo inhomogéneo por la forma especial del imán que lo produce.

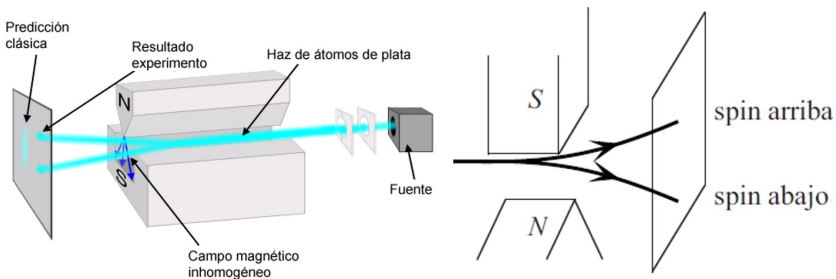


FIGURA 7. Esquema del aparato utilizado por Stern y Gerlach en su experimento y del resultado.

Esta propiedad intrínseca del electrón se denomina espín y se asocia, aunque no tiene análogo clásico, a un giro del electrón sobre sí mismo como si fuera trompo. Se descarta que el origen del momentum angular y del correspondiente momento magnético se deba a un movimiento orbital del electrón. El giro intrínseco (asociado) tiene una orientación opuesta al momento magnético debido a la carga negativa del electrón. Se dice que el electrón tiene

espín $\frac{1}{2}$. Así como llamamos polarizador lineal (también los hay circulares y elípticos) una placa que obligue a los fotones a orientar su campo eléctrico asociado, denominaremos SG (Stern-Gerlach) cualquier aparato que obligue a los electrones a orientar su espín en dirección paralela o antiparalela al campo magnético.

El lector atento encontrará la similitud entre las dos situaciones y por ende el comportamiento similar de los fotones y de los electrones, como también sus diferencias. Esto se verá más claramente con la secuencia de experimentos SG mostrados en la figura 8, análoga al sistema de los polarizadores combinados de la figura 6. Nuestro siguiente paso es explicarla.

Observe con atención: lo que permite medir el aparato de Stern-Gerlach (SG) es la componente del momentum angular de espín en la dirección del campo magnético producido por unos imanes; se escoge que el campo vaya en la dirección perpendicular a la dirección de propagación del haz: para ello basta orientar el gradiente del campo que generan los imanes en la dirección que se desee; ese gradiente o inhomogeneidad de la componente del campo ocasiona, desde el punto de vista clásico, una fuerza deflectora. La dirección de inhomogeneidad del campo coincide con la orientación del campo de los imanes utilizados en el experimento, esquematizado en la figura 7. En la figura de la derecha, con el polo norte hacia abajo, se ilustra claramente el efecto *antiparalelo* debido a la carga negativa del electrón. Esa orientación será la que utilicemos en la secuencia de experimentos de la figura 8.

Identifiquemos el eje de propagación del haz con la dirección y . La magnitud del campo crece cuando se va hacia el extremo delgado del imán, en forma de cuña. La dirección positiva va, pues, hacia el polo sur. Puede ser z o x , dependiendo de la dirección en que se oriente el SG. Escribiremos $(SG)_z$ o $(SG)_x$ según el caso.

Precisemos la nomenclatura: denominemos por \mathbf{S} el valor del momentum angular intrínseco del electrón (es un vector) y S_{z+} o S_{z-} (S_{x+} o S_{x-} respectivamente) los valores posibles que tome su componente z (o x). (La componente S_y no puede observarse en este experimento por ser la dirección de propagación del haz.) Con la secuencia podremos incluso hacer combinaciones y sobre todo mediciones sucesivas. Eso es lo que se hará; empecemos. De acuerdo

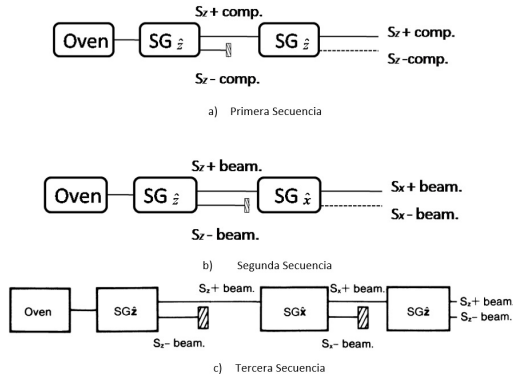


FIGURA 8. *Secuencias de experimentos de Stern-Gerlach (SG). La imagen es esencialmente la misma utilizada en el clásico texto de Sakurai.*

con los resultados del experimento que acabamos de describir, tendremos los siguientes valores posibles:

$$S_{x+} \text{ o } S_{z+} = +\frac{1}{2} ; S_{x-} \text{ o } S_{z-} = -\frac{1}{2}.$$

En un primer experimento, supóngase que se selecciona uno de los dos haces en que se divide el haz inicial, digamos el haz de electrones con el valor de espín en la dirección z^+ , es decir el valor de espín de los electrones que conforman el haz seleccionado es $\frac{1}{2}$ en dirección z positiva. La componente negativa, para el caso de igual intensidad a la positiva, simplemente se ha descartado. Si ese haz *puro* lo obligamos a pasar por un segundo SG orientado en la dirección z , no debería ocurrir nada extraño: el valor que se determine será nuevamente $+\frac{1}{2}$. Ya no habrá componente en la dirección negativa. Ese es ciertamente el resultado, esquematizado en la figura 8a.

¿Qué ocurrirá si en vez de orientar el segundo SG en dirección z^+ lo orientamos en dirección x^+ ? El resultado es sencillo, pero sorprendente: el haz se separa en dos nuevos haces, iguales en intensidad, con valores de espín $+\frac{1}{2}$ y $-\frac{1}{2}$, pero esta vez en dirección x , positiva y negativa; en otras palabras, el haz original S_{z+} se ha convertido en dos haces S_{x+} y S_{x-} , con igual intensidad. El esquema se muestra en la figura 8 b. Si tomáramos un tercer SG orientado también en dirección x para medir el valor de espín de cualquiera de los dos haces resultantes, comprobaríamos que los

electrones de cada uno de los haces tienen el valor de espín que esperamos: $+\frac{1}{2}$ o $-\frac{1}{2}$ (solo uno) según el caso.

Hasta aquí el lector no tendrá mayor problema: supondrá que, así como hay una componente de espín en dirección z , habrá una componente de espín en dirección x . Ya se ha dicho que el valor va a ser $+\frac{1}{2}$ o $-\frac{1}{2}$ siempre, por lo que podrá concluir que ahora la descripción de los haces resultantes es la siguiente: para el primero, los electrones tienen tanto una componente $S_{z+} = +\frac{1}{2}$ como una componente $S_{x+} = +\frac{1}{2}$; para el segundo, $S_{z+} = +\frac{1}{2}$ y $S_{x-} = -\frac{1}{2}$. Esta hipótesis, plausible, puede comprobarse o negarse con un tercer experimento para el cual nuestro tercer SG se orienta en dirección z . El resultado es negativo, como indica la figura 8c: en la dirección z obtenemos otra vez dos haces de igual intensidad, uno con S_{z+} y otro con S_{z-} , como si al electrón se le hubiera olvidado la preparación que se le hizo de un estado puro S_z en el primer SG antes de hacerlo pasar por el segundo SG. Efectivamente, ¡esta información se borró!

Examinemos esto con mayor detalle. En física el procedimiento que estamos utilizando se denomina *colimar* o seleccionar partículas preparadas de determinada manera, y consiste en la preparación de haces o racimos de partículas que tengan todas ellas las mismas propiedades iniciales. Cuando salen del horno, los electrones salen *aleatoriamente*, con las orientaciones de sus dipolos magnéticos intrínsecos completamente al azar. El primer SG nos separa los electrones que tienen espín S_{z+} de los que tienen espín S_{z-} , o al menos eso creemos. El segundo SG nos permite separar los electrones que tienen espín S_{x+} de los que tienen espín S_{x-} ; hasta ahora se ha asumido que las medidas en z y en x son independientes. Si esta suposición es correcta, cuando regresemos a observar la componente S_z la debemos encontrar en el valor anterior. Pues bien, no es así, como revela la figura 8c. En el haz S_{x+} que antes había sido seleccionado con electrones que tenían S_{z+} encontramos ahora electrones con las dos componentes posibles en dirección z , como cuando salieron del horno.

El resultado del experimento anterior plantea algunos interrogantes. Una forma sencilla de responderse a la mayor inquietud consiste en

reconocer que la fuerza ejercida por el campo magnético sobre el momento magnético (digamos más bien que la interacción entre el campo magnético del SG y el momento de dipolo magnético del electrón) lo modifica a tal punto que la preparación previa se echa a perder. En realidad, lo único que se puede afirmar es que en el segundo experimento se han preparado las condiciones para observar componentes de espín en la dirección x positiva o negativa. El resultado de la observación deja a las partículas observadas en un estado de espín determinado, sea este S_{x+} o S_{x-} . Eso significa, de paso, que cuando queramos determinar la componente S_z el sistema ha olvidado por completo su estado anterior. Estamos en presencia de dos observables no compatibles, para los cuales vale el principio de indeterminación que discutiremos enseguida.

6. Principio de indeterminación de Heisenberg y tunelamiento cuántico

Muchos de los extraños fenómenos que ocurren a nivel microscópico se deben al principio de indeterminación o incertidumbre, enunciado por Heisenberg. El tunelamiento es uno de ellos, siendo este a la vez el responsable de la producción de energía en el interior de las estrellas y uno de los efectos de mayor aplicación en las tecnologías que involucran semiconductores y nanodispositivos. Otro destacable es el comportamiento como de onda que hemos venido observando y al que volveremos al final de esta sección.

Entender a cabalidad lo que significa la relación de incerteza, una desigualdad, no exige matemáticas complicadas. Su enunciado suele hacerse con referencia a la posición y el momentum de una partícula. Se dice entonces que ninguna de ellas, por principio, puede determinarse con absoluta precisión. El producto entre la incerteza Δs en la posición y la indeterminación Δp en la cantidad de movimiento es mayor o a lo sumo igual a la mitad de h -barra:

$$\Delta p \Delta s \geq \frac{1}{2} \hbar$$

No obstante, a menudo esta relación es mal interpretada y se confunde con la incertidumbre clásica. El mismo Heisenberg la ilustró en forma restringida, por no decir equivocada, echando

mano de una relación bien conocida del poder de resolución de un microscopio y de la relación de de Broglie. Recurriendo a fenómenos más cotidianos, el argumento de Heisenberg se presenta de la siguiente manera: si se quiere ubicar un objeto microscópico, habrá que iluminarlo; al hacerlo, se modifica su cantidad de movimiento, pues la luz (fotones) transporta(n) momentum; utilizando fotones cada vez de más baja frecuencia (poca energía), la posición resulta cada vez más incierta debido al fenómeno de difracción. Finalmente sólo se observará una mancha *extendida* alrededor de la posición en donde se esperaba encontrar la partícula. ¡La observación afecta el objeto observado!

En las últimas décadas se habla de observaciones que no afectan al objeto mismo. Esto implica otro fenómeno todavía más complejo que se denomina entrelazamiento, cuya discusión no abordaremos aquí [6].

Vistas las cosas de manera más rigurosa, el principio de indeterminación es una consecuencia de la dualidad onda-corpúsculo, asociada con el efecto fotoeléctrico y con el experimento de las dos ranuras que presentamos dos secciones atrás; a ese experimento volvemos a continuación. La dualidad en ambos casos es a la postre consecuencia del desconocimiento que tenemos sobre la posición de un objeto cuántico. Ese objeto, mientras no exploremos su ubicación, se manifiesta de manera similar a como se comportan las ondas. Es lo que revelan los experimentos anteriores. En el MZI, cuando permitimos a los fotones que vayan por cualquiera de los dos caminos, escogen los dos. Lo mismo ocurre cuando se abren las dos ranuras en el experimento con electrones (figura 2). Volvamos a ese experimento e investiguemos lo que pasa cuando tratamos de saber por cuál de las dos ranuras atraviesa el electrón, como propone Feynman.

Una forma de investigar por dónde pasa cada electrón es observando lo que ocurre una vez que el electrón llega a la pared con los dos agujeros o una vez que cruza al otro lado de la pared. Asumamos, pues, que se coloca una fuente lumínica enfrente de las dos ranuras, como ilustra la figura 9. Lo que ocurre es lo que se muestra a la derecha: el patrón de ondas desaparece por completo. No es para

extrañarse, ya Heisenberg lo había advertido: hemos perturbado la trayectoria de los electrones. Intentemos hacerlo de tal manera que la perturbación sea mínima, lo cual puede hacerse disminuyendo la intensidad de la fuente o utilizando luz de menor frecuencia. El primer procedimiento no es el más aconsejable porque lo que interesa es la colisión del electrón con un fotón de cierta energía y disminuir la intensidad no disminuye las consecuencias de cada impacto. Si se recurre al segundo, se verá que a medida que se utiliza radiación (fotones) de menor energía, es más difícil saber de qué ranura procede el electrón. En cierto momento la imagen de la interacción se volverá tan borrosa que es imposible precisar de qué agujero procedió el electrón. En ese caso y de ahí en adelante, el patrón de interferencia se recupera.

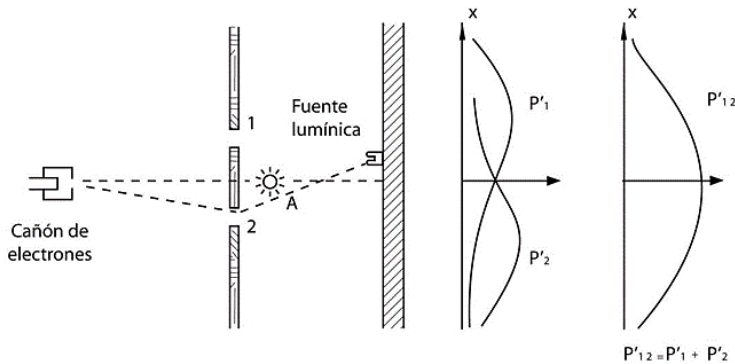


FIGURA 9. Observando (espiando) el paso de los electrones. (Reproducción del texto citado.)

El experimento de las dos ranuras y otros equivalentes o similares a los discutidos en la sección anterior nos lleva a escoger entre dos alternativas excluyentes, lo que nos impide disponer de toda la información que quisiéramos tener acerca de un sistema físico en cualquier instante de tiempo. Podemos, por ejemplo, decidirnos por medir las propiedades de onda de la luz dejándola pasar a través de una rendija doble sin saber por qué ranura pasa cada fotón o, por el contrario, podemos observar cada fotón (o electrón) cuando pasa por alguna de las ranuras o simplemente *saber por dónde pasó* sin hacer la observación directa, en cuyo caso el patrón de ondas desaparece. Nunca podemos hacer las dos cosas al mismo

tiempo. Visto de otra manera, la detección de por cuál ranura pasa cada objeto es una medida o determinación de su posición, mientras que la observación del patrón de interferencia es equivalente a la medida de su momentum, al menos de su grado de incerteza. (Recuérdese la relación de De Broglie y la Ley de Bragg.) Es imposible determinar simultáneamente la posición y el momentum de cualquier objeto cuántico con absoluta precisión, como lo expresa la relación anterior.

Cuando discutimos en la sección 4 el experimento de las dos ranuras hecho con electrones, pudimos ver que la detección de aquellos por fotones produce una perturbación inevitable al transferirles momentum en la dirección perpendicular al movimiento, consecuencia del principio de Heisenberg. La interpretación inicial que este dio de su principio está fundamentada en argumentos semiclásicos.

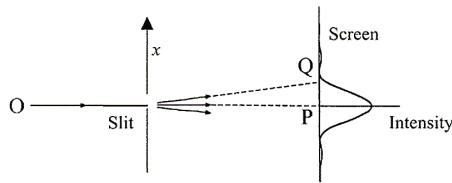


FIGURA 10. Un haz de luz pasando por una ranura de ancho Δx se difracta, formando máximos y mínimos en la pantalla. Entre más angosta la ranura, mayor es el ensanchamiento del patrón de difracción en la pantalla, más notorio en el máximo central. Esto es consecuencia del principio de indeterminación debido a Heisenberg.

Es más fácil entender la inevitabilidad del principio, examinando lo que pasa con luz que atraviesa una sola ranura muy angosta (Figura 10). En concordancia con el modelo ondulatorio de la luz, se encuentra que el haz se ensancha, mucho más entre más angosta sea la ranura, dando lugar a un patrón de difracción. El ancho de la ranura, practicada a lo largo de x , es la incertidumbre en la posición. Tratar de medir esta con mayor precisión equivale a hacerla más angosta, lo que repercute en un aumento de la incertidumbre de la cantidad de movimiento en esa dirección manifestado en el ensanchamiento del haz. El experimento podría realizarse con luz suficientemente tenue, disminuyendo la intensidad hasta el punto que se tuviera solo un fotón cada vez cruzando la ranura. Los

fotones individuales llegan aleatoriamente a distintos puntos en la pantalla, pero el patrón de difracción (la extensión de la región a la que llegan los fotones) se ensancha cada vez más y se hace cada vez más evidente a medida que más y más fotones arriban a la pantalla. Una ranura suficientemente estrecha causa una serie de zonas brillantes y oscuras muy alargadas en la pantalla detectora cuando se hace incidir luz desde el otro lado y a través de la ranura, como se puede demostrar teórica y experimentalmente a partir de la teoría ondulatoria de la luz. Extrañamente es eso lo que predice también el principio de indeterminación.

Otra forma de ilustrar el principio es precisamente recurriendo a la descripción ondulatoria. Cada línea del espectro característico de cualquier sustancia, en particular de los elementos, tiene un color específico, una frecuencia fina. Cuando nos referimos a una longitud de onda específica para el fotón, su frecuencia queda determinada porque el producto de esas dos cantidades da su velocidad, la de la luz: $f\lambda = c$. Se dice entonces que la luz es monocromática y no una mezcla de colores. El término se extiende a todo el espectro electromagnético y se suele llevar la analogía más lejos refiriéndose a una onda monocromática. Para que rigurosamente lo sea, una onda monocromática se extiende indefinidamente. Esa es la máxima manifestación de no localidad de la onda: extensión infinita y longitud de onda muy precisa. Cuando la extensión de la onda es finita, se tiene lo que se denomina un tren de ondas. En este caso no se puede hablar de una frecuencia determinada sino de un rango de frecuencias y lo mismo ocurre para la longitud de onda y su inverso. Este último, más exactamente la cantidad $2\pi/\lambda$, se denomina número de onda k : da el número de ondas por unidad de longitud. La figura 11 ilustra lo que queremos decir: es imposible precisar el número de ondas en el conjunto. Todo lo que se puede decir es que el inverso de la extensión del tren, Δx , es aproximadamente el número de ondas, Δk . Se tiene así que $\Delta x \Delta k \cong 1$. Si se tiene en cuenta la relación de de Broglie $p = h/\lambda$, se ve que $\Delta p = h\Delta k/2\pi$ y $\Delta x \Delta p = \hbar$. Salvo por el factor $\frac{1}{2}$ esto coincide con la relación de Heisenberg.

Tanto el momentum \mathbf{p} como la posición \mathbf{r} son cantidades vectoriales, y las cantidades anteriores se refieren a una de las

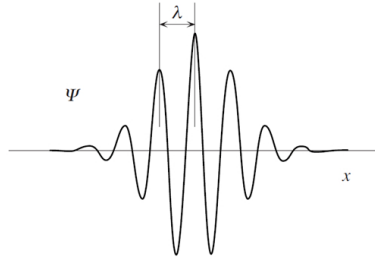


FIGURA 11. Paquete o tren de ondas que ilustra el principio de incertidumbre.

componentes. Más rigurosamente, la relación de incertidumbre para posición y momentum se escribe como $x p_x - p_x x = i\hbar$, y de manera similar para las otras dos componentes. La relación es deducible a partir de los postulados básicos de la mecánica cuántica, los cuales hacen referencia a *observables* y *operadores*. Al escribirlo de esta manera, debe tenerse en cuenta que las cantidades físicas involucradas no son las mismas variables que se trabajan en la física clásica: ahora son operadores matemáticos que al aplicarlos sobre la función de onda que representa el estado del sistema nos dan los distintos valores que esa cantidad puede tomar.

En lenguaje elemental, un observable es una cantidad física que se puede medir como resultado de la observación. En últimas lo que dice el principio de Heisenberg es que dos variables conjugadas no se pueden determinar simultáneamente con absoluta precisión. Ello es consecuencia de que sus operadores (entes matemáticos que hacen las veces de aparatos de medida) no son conmutables: no es lo mismo aplicar uno y después el segundo que hacerlo en orden inverso. Mencionamos al comienzo de esta sección que el principio de incertidumbre se aplica también a la energía y el tiempo. Para este caso la relación se escribe como

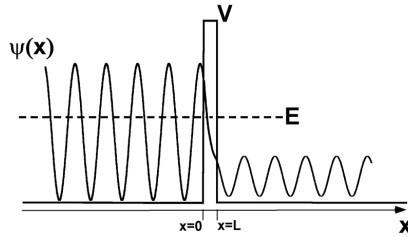
$$\Delta E \Delta t \geq \frac{1}{2} \hbar$$

Traducido en palabras esto significa que siempre habrá una incerteza en la energía asociada con el tiempo de que disponemos para medirla. La onda monocromática que representa a un electrón libre permite asignarle a este una energía perfectamente definida dada por $E = \hbar\omega$. Para un intervalo de tiempo Δt hay una

extensión temporal de la onda similar a la de la figura 11 sustituyendo la coordenada espacial por el tiempo (coordenada temporal). Aplicando el razonamiento hecho para el tren de ondas de longitud espacial se llega a un resultado equivalente a la expresión anterior.

Como ya se mencionó, la aplicación de mayor relevancia proviene del fenómeno denominado tunelamiento cuántico, ilustrado esquemáticamente en la figura 12. Aceptando que un objeto cuántico, generalmente una partícula, por ejemplo un electrón, se puede describir mediante una función de onda, la figura representa la amplitud de una onda (partícula) que incide desde la izquierda sobre una *barrera de potencial*, un obstáculo para que esa onda o partícula continúe hacia la derecha. Lo que se observa clásicamente es que la partícula o el objeto *rebota* contra el obstáculo, para el caso ilustrado mediante una pared. En la práctica la pared puede ser el espacio vacío entre dos metales o entre dos semiconductores o entre un semiconductor y un metal. El electrón forma parte del trozo de materia a la izquierda, pero hablando en términos probabilísticos (cuánticos) puede entrar a formar parte del trozo de materia a la derecha violando provisionalmente el principio de conservación de la energía. La línea discontinua representa la energía que tiene la partícula. La altura de la barrera representa la energía necesaria clásicamente para que el objeto *dé el salto*, pasando de uno a otro material. El efecto se da también en los núcleos atómicos: un nucleón (el neutrón, por ejemplo), puede abandonar el núcleo, espacio en el que usualmente está confinado, por *efecto túnel*. La amplitud de la onda a la derecha, menor que la de la izquierda, representa la probabilidad de encontrar la partícula del lado derecho. El espacio entre las dos regiones está representado probabilísticamente por una intensidad decreciente de izquierda a derecha. Si la pared o el obstáculo es muy extenso, es en la práctica imposible que se dé el paso de una a otra región. Por el contrario, una pared muy delgada facilitará que se dé el tunelamiento.

En el caso de los semiconductores, usualmente esa región suele ser de unas cuantas decenas o centenas de nanómetros. Cuando el principio se aplica al potencial nuclear, una barrera de potencial que clásicamente impediría a los neutrones abandonar el núcleo,

FIGURA 12. *Tunelamiento cuántico.*

el principio da cuenta de la desintegración nuclear en situaciones diversas. También explica la fusión de dos protones para formar deuterio, el principio de la bomba de hidrógeno y muchas cosas más.

Cuánticamente el vacío no existe. De lo que se llama vacío surgen permanentemente (se crean) y desaparecen partículas y antipartículas. El caso mejor conocido y de mayor aplicación es el de un par electrón-positrón. El PET, por sus siglas en inglés (positron emission tomography), es solo uno de los múltiples ejemplos que se pueden dar, con enormes aplicaciones en física médica. Una de las contribuciones a este volumen se refiere ampliamente a su uso.

7. Principio de superposición

Sin duda alguna el principio de superposición es a la vez el más impactante e importante de la nueva física. Aunque se ha sugerido o está contenido implícitamente en los experimentos discutidos, su enunciado explícito es el núcleo de la teoría cuántica. No es por casualidad que varios de los textos más afamados sobre el tema empiezan explicándolo. Así lo hace Paul Dirac en su famoso texto, *Principios de la mecánica cuántica*, cuyo capítulo inicial es precisamente *Principio de superposición*. En lenguaje más moderno se recomienda el clásico texto de Sakurai [13].

El principio de superposición se puede enunciar diciendo que un sistema cuántico puede estar en una combinación cualquiera de todos los estados permitidos (funciones de onda o vectores de estado), por ende la función de onda que lo describe es una

superposición de todas las funciones de onda permitidas, mientras no se observe el sistema para ver en qué estado se encuentra.

En los experimentos discutidos atrás, dos ranuras, MZI, polarización y SG, hemos escogido la situación más sencilla: dos alternativas, dos posibilidades, dos caminos o dos valores posibles. Pero el principio que acabamos de enunciar se aplica a situaciones en que hay más de dos posibles valores. Así, por ejemplo, cuando la cantidad de movimiento de un fotón está perfectamente determinada y se puede describir mediante una función de onda monocromática (frecuencia determinada), el principio de superposición nos dice que la posición puede ser cualquiera entre todas las infinitas posibilidades.

Cada vez se escriben más textos de divulgación sobre lo que constituye el fundamento de la teoría más universal, más precisa y de mayor impacto en sus aplicaciones, la denominada mecánica cuántica. Las referencias suministradas a continuación son solo una pequeña muestra. Se hacen cada vez mayores esfuerzos por presentar visualmente la inobservable fenomenología cuántica, cuya manifestación es en últimas clásica: a eso se reduce la observación. La interpretación continúa siendo *un asunto personal* [26, 27].

Referencias

- [1] E. Klein, *Física Cuántica* (Siglo XXI Editores Mexico, 2003).
- [2] J. Giraldo, *Unos cuantos para todo* (Ediciones Buinaima, Bogotá, 2009).
- [3] J. Giraldo, *Quantum Sapiens I* (Editorial Universidad Nacional, Bogotá. En preparación, 2019).
- [4] J. Giraldo, *Quantum Sapiens II* (En preparación, 2020).
- [5] A. Hobson, *Tales of the Quantum: Understanding Physics' Most Fundamental Theory* (Oxford University Press, New York, 2010).
- [6] D. Grandy, *Everyday quantum reality* (Indiana University Press, Bloomington, 2017).
- [7] A. Rae, *Quantum physics* (Oneworld Publications, Oxford, 2011).

-
- [8] O. Chad, *How to Teach Quantum Physics to Your Dog* (Simon&Schuster, New York, 2010).
- [9] J. Giraldo, *Unos cuantos para todo II* (Versión electrónica extendida de este artículo en: <http://conciencia.com.co/>, 2019).
- [10] J. Gribbin, *The quantum mystery* (Kindle Single, Amazon, 2015).
- [11] R. Feynman, *The Feynman Lectures on Physics* (Addison Wesley, Reading, Ms., 1963).
- [12] J. Claus, *Zeitschrift für Physik* **161** (1961).
- [13] J. Sakurai, *Modern quantum mechanics*. (Addison Wesley, 1994).
- [14] J. Giraldo, *¿De qué se trata la mecánica cuántica?*. (El Tiempo, 2018).
- [15] Wikipedia, “Mach - zehnder interferometer,” (2019).
- [16] Wikipedia, “Quantum tunnelling,” (2019).
- [17] Wikipedia, “Heisenberg’s microscope,” (2019).
- [18] E. Britannica, “Quantum mechanics,” (2019).
- [19] Tamiz, “Cuántica sin fórmulas,” (2009).
- [20] M. Van Biezen, “Particle physics (17 of 41) what is a photon?” (2015).
- [21] CuriosaMente, “¿qué es la mecánica cuántica?” (2017).
- [22] T. Munsen, “Física cuántica, explicación muy didáctica,” (2013).
- [23] R. Beach, “Historía de la física cuántica tienes que ver este documental by mv technologies 30,” (2017).
- [24] edX, “The quantum world — harvardx on edx,” (2017).
- [25] P. S. Time, “Quantum entanglement and the great bohr-einstein debate — space time — pbs digital studios,” (2016).
- [26] F. Laloë, *¿Do we really understand quantum mechanics?* (Cambridge University Press, New York, 2013).
- [27] L. Smolin, *Einstein’s unfinished revolution* (Penguin Press, New York, 2019).