

Café con Ciencia



CAFÉS CIENTÍFICOS 2011 Un espacio para el debate de temas científicos, tecnológicos y culturales con la comunidad.

Organizados por el Centro Atómico Bariloche y el Instituto Balseiro

Juana Gervasoni - Hugo Corso
Coordinadores

Instituto Balseiro
Universidad Nacional de Cuyo

t!
(tinta libre)
ediciones

4. Café de septiembre

El nacimiento de la cuántica

Raúl O. Barrachina

Dr. en Física (Instituto Balseiro)
Investigador de la Comisión Nacional de Energía Atómica
y del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
(Centro Atómico Bariloche)

Monsieur Louis de Broglie, siendo usted muy joven se sumergió en la controversia que asolaba al problema más profundo de la Física. Y tuvo la audacia de afirmar, sin el apoyo de ningún resultado conocido, que la materia no sólo tenía una naturaleza corpuscular, sino también una naturaleza ondulatoria.

Hace más de ochenta años y con estas palabras, el presidente del Comité Nobel de Física invitaba al nuevo laureado a recibir su premio.

En este café discutiremos los orígenes y alcances de esa idea revolucionaria.

La historia que voy a relatarles comienza en Dublín, Irlanda, a principios del siglo XIX; más precisamente el 17 de agosto de 1824. Ese día, un joven dublinés de 19 años recién cumplidos, a quien por ahora llamaré William, acompañó a su tío James de visita a la casa Disney. Allí conoció a Catherine. Fue amor a primera vista. Años más tarde, William, en una carta a Louisa, hermana de Catherine, describiría aquella cena con estas palabras:

¡Qué maravilloso fue el momento cuando me pidieron que me sentara junto a ella durante la cena!; cuando, sin mediar una palabra de amor, nos dimos nuestras vidas. Ella era, como sabes, hermosa; yo en cambio sólo era inteligente...

Desafortunadamente, William no tenía ninguna oportunidad con Catherine. Debería esperar al menos tres años, hasta terminar sus estudios en el Trinity College de Dublín, para poder aspirar a un noviazgo formal. Pero aún esa ilusión era inútil, ya que pocos meses después de esa cena la madre de Catherine le informó a William que su hija se casaría con un clérigo quince años mayor que ella. Como pueden imaginar, esto lo afectó profundamente. Nuestro pobre William se enfermó gravemente e incluso llegó a considerar la posibilidad de arrojarse al Canal Real de Dublín y así ahogarse junto con su sufrimiento. Pero a pesar de todo, William siguió viviendo, y el amor entre ambos perduró. En 1848, en una carta a su amigo, el poeta Aubrey Thomas de Vere, William escribió lo siguiente:

Este recuerdo de amor ha corrido como un río a través de mi vida, ocultándose de a ratos, pero brotando de nuevo con un poder que me aterra – un grado realmente espantoso de fuerza y vitalidad.

Y así era, en efecto. Veinte años después, Thomas Disney, el padre de Catherine, visitó a William y llevó consigo a su hija. Con esta inesperada visita de su amada, el incipiente alcoholismo de William le ganó la partida, una dependencia que lo perseguiría el resto de su vida.

Hacia fines de la década de 1840, William comenzó a ayudar a James Barlow, hijo de Catherine, a prepararse para los exámenes de ingreso a la Universidad. En 1848 Catherine le escribió a William para agradecerle la ayuda que le brindaba a su hijo, dando comienzo a un intercambio epistolar entre ambos que, a lo largo de seis semanas, se fue volviendo más y más personal, siendo evidente por primera vez para ambos que el amor continuaba latente. Sintiéndose culpable, Catherine le confesó a su marido el amor que sentía por William, y acto seguido intentó suicidarse con láudano. Aunque no se separaron legalmente, Catherine se fue a vivir con su madre y hermanos.

La correspondencia entre William y Catherine se mantuvo subrepticamente a través de parientes por más de cinco años, hasta que en octubre de 1853 William recibió una caja de lápices enviada por Catherine, con el siguiente mensaje:

*De parte de quien tú nunca deberás olvidar,
Ni recordar cruelmente,
Y quien moriría satisfecha
Si tuviese un encuentro más contigo.*

Presintiendo lo peor, William corrió a la casa donde vivía Catherine y la encontró gravemente enferma. Se besaron y abrazaron, previendo que se trataba de una despedida. Y en efecto, dos semanas más tarde, ella falleció.

William llevaría consigo el retrato de Catherine por el resto de su vida.

En el lado positivo de esta triste historia, el amor de William por Catherine lo llevó a reforzar su pasión por la poesía, un hábito que había abrazado poco después de la muerte de su padre y que -junto con el alcohol- lo absorbería por completo en períodos de angustia. Y la vida no le escatimó tales momentos. En particular, las muertes de su amigo Wordsworth, de su amada hermana Eliza y de su tío James, así como el suicidio de su colega James MacCullagh, tuvieron un profundo impacto en su estado emocional. Por otra parte, su matrimonio con Helen Maria Bayly, con quien tendría dos hijos y una hija, se volvió amargo con el paso del tiempo y empeoró aún más cuando en 1855 Helen encontró una carta de Dora Disney, cuñada de la fallecida Catherine, y se enteró de que nunca había ocupado el primer lugar en el corazón de su esposo.

William se destacó como poeta. En la universidad ganó el premio de poesía inglesa, con el que años más tarde también serían galardonados el poeta y dramaturgo John Todhunter y el gran narrador Oliver Joseph St. John Gogarty. William Wordsworth, uno de los más importantes poetas románticos ingleses, fue su gran amigo y mentor, al igual que la poetisa Jane Francesca Agnes Elgee, también conocida por su seudónimo artístico de “Esperanza” y por ser la madre de Oscar Wilde. En 1854 Esperanza pidió a William que fuese el padrino de su hijo, un honor que William rehusó.

El 13 de mayo de 1825, poco después del casamiento de su amada Catherine, William compuso uno de sus poemas más conocidos, *Farewell*, que termina así:

*Sería extraño, muy extraño, que nos volviéramos a encontrar;
Como extraños, y como extraños nos separaremos.
Tal vez yo sea olvidado,
Y se haya enfriado este corazón apasionado:
Sin embargo, aunque no seas más mi estrella de esperanza,
Mi fuente más elevada, mi más dulce fantasía,
Tu imagen adorada jamás me abandonará;
Todavía te deseo toda la alegría que te aguarda;
¡Todavía rezo para que la Tierra sea como un más joven cielo para ti!*

En una carta del 22 de noviembre de 1831, Wordsworth le escribió a su amigo William, diciendo

Me envías esos hermosos versos que recibo con mucho placer tal como hacemos todos; y aún así tememos que esta ocupación pueda seducirte y alejarte del camino de la ciencia, que pareces destinado a transitar con mucho honor para ti y beneficio para otros.

¿Qué le está sugiriendo Wordsworth a ese genuino exponente del Romanticismo que era William? ¿Que abandone la poesía para seguir el camino de la ciencia? Su preocupación no era desacertada, pues William no era sólo un muy buen poeta, sino también un genio científico. Pero allí donde Wordsworth imaginaba una dicotomía, William veía una comunión. Como matemático que buscaba la belleza y el placer estético en las matemáticas, veía a la ciencia como una creación estética, completamente afín a la poesía, con sus propios misterios y momentos de profunda revelación. William le escribió a Wordsworth lo siguiente:

No se debe hablar de las actividades y las contemplaciones de la ciencia como si no tuviesen también el poder de agitar las pasiones y los afectos de la humanidad. Pues la ciencia, así como la poesía, tiene su propio entusiasmo, y lleva a cabo su propia comunión con todo lo que es sublime y bello en el Universo.

Y en efecto, la pasión de William por la ciencia llegó a ser tan grande como su amor por la poesía. En una carta escrita a su hermana Eliza cuando apenas contaba con 17 años recién cumplidos escribió:

Todas las energías de la mente son llamadas, todas las facultades se esfuerzan para el descubrimiento. A veces aparece una dificultad inesperada, y casi se desespera por el éxito. A menudo, si se es tan inexperto como yo, se detectarán errores propios, que implican un retroceso. Pero cuando todo se ha rectificado, cuando la pista ha sido felizmente encontrada y seguida, cuando las dificultades, quizá inusualmente grandes, han sido completamente superadas, ¡qué arrebató! En especie, aunque no en grado, como el experimentado por Newton, cuando encontró el simple y omnipresente principio que rige los movimientos del universo, desde la caída de una manzana hasta las órbitas de las estrellas.

Bueno, es hora de develar el misterio. Este poeta perdidamente romántico fue, ni más ni menos, que William Rowan Hamilton, uno de los más grandes genios matemáticos del siglo XIX.

Antes de los 16 años, William Hamilton ya había leído los *Elementos de Álgebra* de Clairaut, los *Principia* de Newton, y los cinco volúmenes del *Tratado de Mecánica Celeste* de Laplace, donde además detectó un error. Este logro extraordinario se difundió rápidamente, dándole fama al joven prodigio y justificando que, al recordar su primer encuentro con Catherine, pudiese decir sin falsa modestia aquello de que ella era hermosa; y que él, en cambio, sólo era inteligente...

A los 17 años Hamilton había escrito su primer trabajo sobre óptica geométrica. Al presentar este trabajo, John Brinkley, primer astrónomo real de Irlanda, dijo que ese joven no sólo sería, sino que ya era el primer matemático de su época. En 1827 envió a la Royal Irish Academy un segundo trabajo donde transformaba la óptica geométrica en una nueva estructura analítica. Como resultado de este trabajo, Hamilton fue nombrado profesor del Trinity College cuando todavía no se había graduado. Así que se vio en la extraña posición de tomar examen a estudiantes avanzados o inclusive graduados mucho mayores que él. En 1827 se trasladó al Observatorio Dunsink, a ocho kilómetros de Dublín, donde vivió el resto de su vida. Pero es justo decir que así como fue un muy buen poeta, resultó un pésimo astrónomo.

En cambio, su poder de abstracción y concentración parecía sobrehumano. Tal como recordaba su hijo mayor William Edwin Hamilton,

Solía realizar largos procesos de cálculo mentalmente durante los cuales se olvidaba hasta de la necesidad terrenal de comer. Solíamos llevarle un plato de comida y dejarlo en su estudio. La intrusión era respondida con una leve inclinación de cabeza y a menudo ese era el único resultado. El plato quedaba allí abandonado mientras seguía con sus elucubraciones.

Pero no piensen que por ello pasaba hambre. De hecho su prematura muerte en 1865, a los 60 años de edad, se debió a una afección de gota agravada por sus excesos con la comida y, sobre todo, la bebida. Hamilton está enterrado en el Cementerio de Monte Jeremías de Dublín. Una vez escribió:

Siempre he admirado la descripción que hace Tolomeo de su gran maestro de astronomía, Hiparco, como un amante del trabajo y la verdad. Que tal sea mi epitafio.

Se preguntarán por qué empecé esta charla, referida a la física cuántica, hablando de William Rowan Hamilton. Por un lado, lo hice para resaltar que la ciencia no nace de la nada, sino que es creada por personas de carne y hueso, que sufren, que aman, que tienen alegrías y desgracias como cualquier hijo de vecino, y que pueden llegar a pensar en el suicidio o caer en el alcoholismo. Por otra parte, porque entre 1833 y 1835 publicó una serie de trabajos notables que se adelantaron a la revolución científica que ocurriría muchas décadas más tarde

y que, tal como veremos, darían la base formal para el desarrollo de la nueva teoría que emergería de esa revolución.

Cuando a comienzos del siglo XX ciertos extraños resultados experimentales forzaron a los físicos a buscar nuevas leyes de la naturaleza, la mayor parte de la Mecánica Clásica se volvió obsoleta, salvo las teorías desarrolladas por Hamilton, que pasaron a ocupar el centro de la escena de la nueva física cuántica. De hecho, cualquier estudiante de Física sabe que el primer paso en la resolución de un problema de física cuántica es encontrar una función llamada, con toda justicia, Hamiltoniano.

A veces, como en este caso, usamos ciertas palabras sin pensar demasiado en su origen o su sentido original. Nos ocurre por ejemplo con la palabra “Revolución”. La asociamos casi inmediatamente con gentilicios tales como “Francesa” o “Rusa”, dándole el sentido de un cambio súbito y usualmente violento de orden político, social y/o económico; en esencia, una ruptura radical y profunda del orden establecido. Aparentemente la palabra “revolución” fue utilizada por primera vez con este significado en Inglaterra a fines del siglo XVII, cuando el católico rey Jacobo II de la casa de los Estuardo fue derrocado y reemplazado por el protestante Guillermo III de la casa de Orange-Nassau en 1688. Al año siguiente el parlamentario John Hampden utilizó el término Revolución Gloriosa para referirse a este derrocamiento del último rey católico de Inglaterra. Pero la palabra ya había sido utilizada más de un siglo antes, y si bien lo fue en un contexto muy distinto, ese uso original produjo tal “revolución” que terminó adoptando el significado que le damos hoy. Proviene del título de un libro de astronomía escrito en latín por Nicolás Copérnico y publicado en 1543, el año de su muerte, en Núremberg, ciudad en aquel entonces del Sacro Imperio Romano Germánico. Su título era *De Revolutionibus orbium coelestium*, es decir sobre las Revoluciones de las Esferas Celestes. O sea que el sentido original de la palabra era el de girar o dar vueltas. Y Copérnico se refería a que los planetas, incluida la Tierra, daban “revoluciones” alrededor del Sol.

A la larga, este representó un cambio más radical que cualquier revolución política, donde meramente se cambia un gobierno por otro. Copérnico no sólo derrocaba a la Tierra de su posición en el centro del Universo para sustituirla por el Sol, sino que la asimilaba a los otros planetas, las estrellas errantes. Así que no es de extrañar que el título de esta obra, cuyo sentido original era de algo regular y repetitivo, pasara, con el tiempo, a referirse a exactamente lo contrario, es decir a un cambio drástico. Pero la revolución copernicana no fue la única revolución que ocurrió en la ciencia, aunque sin duda fue una de las más importantes ya que inauguró la ciencia moderna siendo considerada el punto de partida de lo que se conoce como “Revolución Científica”. Pensemos también en la Revolución que significó la publicación de los *Origen de las Especies* en 1859 por Charles Darwin. Por su parte, a principios del siglo XX la Física iba a atravesar una revolución semejante, un rotundo cambio de paradigmas; y esta revolución se iba a dar en más de un frente. Uno de ellos, y tal vez el más importante, prolongado y beligerante de estos procesos simultáneos, es el que dio lugar al nacimiento de la física cuántica. Así que veamos de qué se trató.

La física cuántica fue creada a principios del siglo XX en respuesta a ciertos resultados experimentales que resultaban difíciles de explicar en el marco de la física clásica. Esta teoría aportó tres grandes revoluciones. En primer lugar nos brindó nuevas y poderosas herramientas para investigar un nuevo rango de fenómenos, tales como las propiedades de los átomos y las moléculas, el complejo mundo de las interacciones químicas, la física del núcleo atómico o las características de la materia sólida.

La segunda revolución fue que puso en entredicho el determinismo, que siempre había sido un ingrediente incuestionable de la física. Si la descripción cuántica es correcta, el resultado de cualquier experimento no es predecible. Todo lo que se puede hacer es estimar la probabilidad de que se dé un resultado particular. Este aspecto aleatorio de la física cuántica es de una naturaleza distinta del que ocurre, por ejemplo, al arrojar un dado. En este último caso la descripción probabilista se da por una falta de conocimiento acerca del estado original del sistema, mientras que en la física cuántica es de un carácter intrínseco. Sin embargo, estamos acostumbrados a observar un comportamiento aleatorio en el mundo que nos rodea, y por lo tanto podemos llegar a aceptarlo como una característica de la física cuántica, sin violentar demasiado nuestro sentido común.

Este no es el caso con la tercera revolución, ya que pone a prueba una creencia básica, implícita en toda la ciencia y en casi todo el pensamiento humano, de que existe una realidad objetiva, una realidad que no depende para su existencia de que sea observada o no. En general este punto es pasado por alto en casi todos los libros de texto sobre física cuántica, a pesar de que expone claramente las dificultades conceptuales de su fundamentación.

¿Recuerdan la cena donde Hamilton conoció a su amada Catherine? Eso ocurrió en 1824. Exactamente un siglo después, el 25 de noviembre de 1924, un no tan joven estudiante de Física defendía su tesis doctoral en París ante un jurado presidido ni más ni menos que por Jean Perrin, quien ganaría el premio Nobel dos años después, y compuesto por grandes científicos de la época como, por ejemplo, Paul Langevin y Élie Cartan.

Durante los últimos años habían pasado muchas cosas en el mundo de la Física, como el descubrimiento del electrón, por J. J. Thomson, o el descubrimiento del núcleo atómico por Ernest Rutherford. Pero estas nuevas piezas no encajaban del todo bien en el marco de la Física desarrollada a partir de Newton, y había algunos científicos que empezaban a proponer soluciones bastante extrañas. Uno de ellos fue, justamente ese estudiante de doctorado, llamado Louis Victor Pierre Raymond, séptimo duque de Broglie. Trece años antes, su hermano Maurice, también físico y 17 años mayor que él, había servido como secretario de la primera conferencia Solvay de Bruselas donde los más grandes físicos de la época, como Planck, Rutherford, Einstein, o el mismo Perrin se habían reunido para discutir los nuevos descubrimientos que parecían poner patas para arriba todo lo conocido.

Junto con Paul Langevin, quien era director de su tesis, Maurice había compilado y publicado las memorias de la conferencia. Louis leyó estas notas y descubrió su vocación. Años más tarde recordaba su reacción en estos términos:

Con el ardor de mi edad me entusiasmé con los problemas que allí se trataban, y me prometí dedicar todos mis esfuerzos a lograr una comprensión de los misteriosos “cuanta” que Max Planck había introducido diez años antes en la Física Teórica, pero cuyo significado profundo aún no había sido comprendido.

Para 1913 se había licenciado en Física y había ingresado en el cuerpo de ingenieros del ejército para cumplir con el servicio militar. Pero antes de que le dieran la baja estalló la guerra y Louis tuvo que permanecer en servicio hasta agosto de 1919, destacado en la sección de telegrafía estacionada en la Torre Eiffel. Tal como recordaría Maurice,

Mi hermano deploró la interrupción de sus pensamientos; más tarde lamentaría que su ímpetu había sido detenido, y le tomó varios años recuperarlo.

De regreso a la vida civil, Louis retomó los estudios de Física con la idea de escribir una tesis doctoral sobre los cuanta. Este trabajo lo desarrolló en contacto con apenas tres personas; naturalmente con su hermano Maurice, con Paul Langevin, su director y director de la tesis de su hermano, y con Leon Brillouin; y prácticamente con nadie más y casi en completa ignorancia de todo lo demás, en particular de los más recientes avances en el tema.

Y finalmente llegó el día de defender su tesis. La propuesta que planteó era relativamente sencilla de entender, pero sin duda revolucionaria. Si como proponía Einstein, la luz, que es una onda, podía comportarse también como partícula, entonces una partícula tendría que poder tener asociada una onda. Esa onda guiaría a la partícula en su movimiento de manera parecida a como una ola empuja a un surfista. Y más aún, la matemática de esa idea ya había sido desarrollada muchísimos años antes, aunque aparentemente nadie se había dado cuenta. Se trataba ni más ni menos que de la dinámica planteada por Hamilton entre 1833 y 1835.

¿Se acuerdan? El había planteado una estructura formal similar para la óptica y para la dinámica. De hecho, demostraba que a toda partícula se le puede asociar la fase de una onda cuya evolución obedece cierta ecuación que hoy reconoceríamos como muy parecida a la ecuación de Schrodinger de la física cuántica. El impulso es igual al gradiente de esa función y, por lo tanto, la partícula es empujada por la onda. La idea de de Broglie era

que tal vez, modificando la dinámica clásica en la formulación de Hamilton, se podría lograr una nueva teoría que se ajustara a los resultados que se venían obteniendo desde hacía más de dos décadas.

En esta tesis, posiblemente la más relevante y conocida de cuantas tesis doctorales hayan sido defendidas en el siglo XX, por primera vez se presentaba una dinámica de los cuanta; pero de Broglie tenía claro que no había respondido todas las preguntas. En particular había dejado intencionalmente vago el sentido de esa onda. De hecho, en su tesis indicaba que su propuesta debería considerarse más como un esquema cuyo contenido físico principal no está completamente definido, que como una doctrina consistente y definitivamente establecida.

El jurado se llevó una buena impresión de la presentación de de Broglie, aunque su contenido no los convenció completamente. 30 años después, uno de sus miembros, Charles Victor Mauguin, recordaba que

Durante todo el tiempo que duró la defensa de la Tesis, no creí en la realidad física de las ondas asociadas a las partículas de materia. Más bien las veía como muy interesantes objetos de la imaginación que permitían, por primera vez, evitar el carácter completamente empírico de las reglas de cuantización, proveyendo a estas con una interpretación simple, casi familiar, análoga a las leyes de las cuerdas vibrantes.

Langevin, quien admiraba la consistencia interna de la nueva teoría, le envió una copia de la tesis a Albert Einstein, incluso antes de su defensa, y este le respondió diciendo que de Broglie había logrado “levantar la esquina del gran velo que cubría de misterio la nueva física”. Inclusive el 16 de diciembre de 1924 Einstein le escribió a Hendrik Lorentz en estos términos:

El más joven de los hermanos de Broglie ha hecho un muy interesante intento de interpretar las reglas de cuantización de Bohr-Sommerfeld. Creo que este es el primer tenue rayo de luz que ilumina el peor de nuestros acertijos físicos.*

De hecho, el apoyo que le dio Einstein ayudó a que la teoría fuera aceptada fuera de Francia. Con el tiempo esta idea ganaría la adhesión de la comunidad científica, haciendo que de Broglie fuera un justo ganador del Premio Nobel de 1929. Pero volvamos a la defensa de la tesis ese día de noviembre de 1924. En un momento, el presidente del jurado, Perrin, le hizo “esa” pregunta que da en la tecla, que va a la esencia del problema. Perrin le preguntó a de Broglie si se le ocurría alguna verificación experimental de sus ideas y éste le respondió que tal vez se pudiese llegar a observar un efecto de difracción de partículas a través de ranuras estrechas, lo cual sería una confirmación directa de la existencia de las ondas piloto.

¿A qué se refería de Broglie? Pues no se trata de nada nuevo. Justamente es el mismo tipo de experimento imaginado por Thomas Young en 1807 para demostrar que la luz era de naturaleza ondulatoria. Veamos de qué se trata.

Consideremos un cañón que dispara partículas contra una pared sobre la cual hemos realizados dos incisiones en la forma de dos ranuras paralelas entre sí. Concentrémonos en lo que le podría pasar a una de estas partículas. En el marco de la física clásica, la partícula llega a la pared y rebota contra la misma o pasa hacia el otro lado a través de una u otra de las dos ranuras. No hay ningún misterio en esto. ¿Cómo sería la descripción cuántica del mismo problema? Bueno, ahora la partícula sería representada por una onda, o mejor dicho por un paquete de onda, algo parecido a las ondulaciones que se producen en una superficie de agua al arrojar una piedra. Cuando esta onda alcanza la pared se distorsiona y parte de ella pasa a través de las ranuras. Del otro lado de la pared la onda es despreciable en casi todo el espacio salvo en dos pequeñas zonas que describen la transmisión a través de una u otra ranura. A partir de esta onda puede calcularse la probabilidad de que, al realizar una medición, encontremos que la partícula haya pasado a través de una u otra de las ranuras. Hasta este punto lo que nos está diciendo la física cuántica no parece ser muy distinto de la que ocurre en la física clásica, ni está demasiado en contra de nuestro sentido común. De hecho podemos imaginar una explicación simple de lo ocurrido. En ambos casos la partícula se mueve hasta alcanzar la pared. Al llegar allí seguirá de largo a través de una u otra de las ranuras. Una observación sólo confirmará esa realidad, indicando por cuál de

* Einstein se refiere a un primer modelo atómico desarrollado por Niels Bohr en 1913 y perfeccionado por Arnold Sommerfeld en 1916.

las dos ranuras atravesó la pared. En otras palabras hasta este punto medir significa observar la realidad, no crearla.

Todavía podríamos discutir de qué depende que la partícula pase a través de una u otra de las ranuras. Por ejemplo, podríamos pensar que existen algunos parámetros iniciales, como por ejemplo la dirección precisa con que la partícula salió del cañón, cuyos valores determinan que la partícula logre pasar a través de una u otra ranura. De esta manera se mantiene el determinismo, y el aspecto aleatorio sólo entra a través de nuestra ignorancia de esos valores, exactamente como en la física clásica.

Esta explicación no parece estar en contra de nuestro “sentido común”. De hecho no parece diferir demasiado de una explicación clásica. Lamentablemente, y tal como veremos a continuación, esta explicación es incorrecta; y lo es de dos maneras distintas.

Supongamos que modificamos nuestro experimento colocando una pantalla del otro lado de la pared, de manera que registre la llegada de las partículas que la atraviesan a través de las rendijas. Uno esperaría que estas marcas estén en aquellos puntos correspondientes a haber atravesado una u otra rendija. Sin embargo sabemos que para la física cuántica esto no es así. Según la física cuántica, se observa una distribución con máximos y mínimos. ¿Qué es esto? ¿De dónde viene? Pues bien, si hiciésemos el mismo experimento con ondas veríamos que se forma precisamente la misma distribución. Exactamente lo mismo ocurre con la luz, y esto dio la pauta a Thomas Young a comienzos del siglo XIX para asegurar que se trataba de una onda. La conclusión ahora es inevitable. Las partículas parecen estar comportándose no como partículas, sino como ondas. Y al hacerlo, no están pasando por una u otra ranura, sino por ambas simultáneamente. O sea que si tapo una u otra rendija, veo sólo una línea de luz. Pero si dejo ambas abiertas, no veo dos líneas de luz, sino un espectro de interferencia. Para poder interpretar este resultado debemos aceptar que cada partícula pasa simultáneamente por ambas rendijas. Y esto es realmente muy raro. Es como si la partícula se dividiera en dos partes, una de las cuales pasa por una rendija y otra por la otra.

Este resultado no sólo parece estar en contradicción con nuestra primera suposición de que la partícula pasaba a través de una u otra rendija, pero nunca se dividía en dos partes, sino con nuestro sentido común. Durante muchos años los físicos lucharon con este problema ensayando diferentes interpretaciones de la física cuántica. Para poder sobrellevar la contradicción anterior entre el mundo observado y nuestro esquema de la realidad se suele indicar que, mientras este último esquema se basa en nuestra experiencia del mundo macroscópico, las aparentes contradicciones ocurren a un nivel microscópico que nos es inaccesible en forma directa. Por lo tanto las palabras y metáforas que usamos para describir nuestra realidad no son adecuadas en el mundo de lo pequeño. No hay contradicción. Solo debemos intentar construir un nuevo esquema de la realidad aplicable a ese mundo microscópico disjunto del nuestro de las experiencias diarias. Por ejemplo, en ese mundo microscópico existe una complementariedad entre las nociones de partículas y ondas. Así la descripción ondulatoria es adecuada para explicar un fenómeno de interferencia, mientras que la noción de partícula es útil en todo proceso de medición. Puesto que esta dualidad ocurre en otro mundo que el de nuestra experiencia diaria, no tiene sentido cuestionar su inserción en nuestra noción de la realidad.

Esta interpretación de la física cuántica se debe en gran medida a Niels Bohr y se denomina interpretación de Copenhague. Indica que nuestra manera clásica de pensar debe abandonarse al analizar el mundo microscópico. Todas aquellas contradicciones que nacen al aplicar nuestros conceptos clásicos a la interpretación de ese mundo pierden sentido y no deben formularse. Lo único que tiene sentido discutir es el resultado de los experimentos y los cálculos.

Los detractores de la interpretación de Copenhague indican que esa doctrina es anti-realista, pues implica que no debemos construir teorías que expliquen las observaciones, sino tan sólo que estén de acuerdo con ellas, que sean “empíricamente adecuadas”. Al adoptar tal actitud positivista nos negamos a explicar nuestras observaciones en base a un modelo de la realidad, aún cuando creemos en la existencia de tal realidad externa. La física cuántica deja de ser un modelo de la realidad y se transforma en una herramienta de cálculo. Quienes no están de acuerdo con esa actitud indican que, así como en general aceptamos que el campo magnético

producido por un imán es real, también debemos considerar que la función de onda no es sólo un ente matemático abstracto. Y en principio hay varias razones por las cuales considerar esta idea.

En primer lugar tenemos la evidencia de que las funciones de onda pueden interferir. Si quiero explicar esas oscilaciones que veo en la pantalla al otro lado de la pared con las dos ranuras, necesito una función de onda. No hay salida.

Por otro lado, el hecho de que un electrón sea indistinguible de otro, se refleja en una propiedad de la función de onda que llamamos “anti-simetría”. Esta propiedad, a su vez, da origen a importantes predicciones que han sido ampliamente verificadas, y que serían difíciles de comprender sin utilizar funciones de onda. De hecho todas las formulaciones de la física cuántica, todas ellas, requieren el uso de funciones de onda. Louis de Broglie estaba en lo cierto, no hay duda al respecto.

Ahora bien. Nuestra primitiva noción de existencia se refiere a objetos con una localización espacial, es decir que están en algún lugar. No es difícil extender esta noción a la idea de “densidad”, como hacemos, por ejemplo, con un gas. Esta densidad no está en un lugar particular, sino que en cada punto del espacio toma un valor representativo. La función de onda de una partícula es similar a una densidad, aunque con dos valores en cada punto de la región de espacio considerada. De esta manera podemos imaginar fácilmente a la función de onda como “algo” desparramado en el espacio con una cierta cantidad en cada punto. Posiblemente la mayoría de los físicos tengamos esta imagen. Sin embargo hay dos dificultades asociadas con ella. La principal se debe al hecho de que el mundo no consiste en una sola partícula.

En 1935, Einstein Podolsky y Rosen propusieron un “experimento pensado” que, aunque no fuera ese su objetivo original, hace explícito el conflicto entre la naturaleza no-local de la física cuántica y nuestro esquema de la realidad. Consideremos una partícula con espín cero. El espín es cierta propiedad de cada partícula, así como lo puede ser su masa o su carga, y que es similar a un estado de rotación interna. Supongamos ahora que esa partícula es inestable, y que se divide dos partículas más pequeñas de espín distinto de cero. Así como ocurre con la carga, el espín debe conservarse, y por lo tanto si el espín de una de las partículas está girando en un sentido, el de la otra debe compensarlo girando en sentido opuesto.

Ambas partículas se alejan una de otra, y al cabo de algún tiempo se encuentran totalmente separadas. La no-localidad del formalismo cuántico es aquí evidente, ya que, independientemente de cuán separadas estén ambas partículas, sus espines seguirán estando relacionados entre sí a través de esa ley de conservación. En efecto, si medimos el espín de una de las partículas en una dada dirección, entonces sabemos que la otra tendrá espín opuesto en esa misma dirección.

Ahora, y aquí está lo interesante, la física cuántica parece decirnos que el espín de esta segunda partícula no estaba definido antes de la medición. Solo al medir el espín de la primera partícula, el estado de la segunda definió su valor. Y ello ocurre instantáneamente, no importa cuán lejos se encontraba de la primera.

Las implicancias de esta observación son trascendentes: al efectuar la medición se produce una modificación en la función de onda que es independiente de su extensión espacial. Esta predicción, debida a la no-localidad del formalismo cuántico, parece estar en contra de la hipótesis de que no puede haber influencia entre regiones no conectadas causalmente. En otras palabras, cabría esperar que ambas partículas puedan estar lo suficientemente alejadas una de otra como para que la medición del espín de una de ellas no influya sobre la medición del espín de la otra.

El conflicto planteado por la paradoja EPR puede expresarse en forma cuantitativa mediante un sencillo teorema publicado por John Stewart Bell en 1964. No voy a entrar en detalle, pero lo que Bell propuso es lo que se llama un “experimento crucial”, que permite decidir entre dos opciones contradictorias.

Bell propuso una cierta medición tal que si el resultado se encontrara en un cierto rango de valores, la física cuántica sería local, y si se encontrara en otro rango de valores, sería no local. El primer intento de realizar este experimento ocurrió en 1972 y se debió a John Francis Clauser y Stuart Freedman. Y desde entonces han

habido varios intentos más. En su mayoría indican que la física cuántica es no-local, y creo que la comunidad científica se ha convencido mayoritariamente de que no es posible formular una teoría local. Aunque es justo decir que todavía hay críticos que cuestionan estos resultados, indicando que todos y cada uno de los experimentos realizados y que supuestamente demuestran el carácter no local de la física cuántica están invalidados por fallas en el dispositivo o en la técnica utilizada.

Aún así, adoptemos una actitud pragmática y digamos que hasta ahora todo parece indicar que no es posible una descripción local de la naturaleza. Es decir que no existe separabilidad en la descripción de dos porciones de un sistema cuántico, no importa cuán alejadas entre sí se encuentren esas partes. Esta es una de las dos grandes dificultades que surgen al considerar a la función de onda como atributo de la realidad. Me refiero al carácter no-local del formalismo cuántico, puesto en evidencia por la paradoja EPR de Einstein Podolsky y Rosen.

Pero al comienzo había dicho que había una segunda dificultad, quizás más grave, que tiene que ver con el proceso de medición. Cuando realizamos una medida, la función de onda cambia de una manera súbita y discontinua. Además, y tal como vimos, este cambio es fuertemente no-local, en el sentido de que las mediciones realizadas en un punto del espacio cambian la función de onda en otros puntos, instantáneamente, no importa cuán alejados estén. El experimento de las dos rendijas provee un buen ejemplo de tal proceso de reducción. Si un detector ubicado tras una rendija señala el paso de la partícula, el trozo de función de onda en la otra rendija se vuelve cero inmediatamente. Ahora, ¿cuál es el problema?

Suele decirse que la física cuántica generaliza a la física clásica. Por lo tanto debería poder aplicarse al aparato que usamos para “medir”, y así explicar en qué consiste la reducción de la función de onda. Sin embargo, es aquí donde se plantea el problema más serio. Dentro de este marco, el sistema “partícula + aparato” debería evolucionar de una manera continua y bien determinada descrita por el formalismo cuántico, y no de una forma discontinua y aleatoria como en un proceso de medición. Vemos que la física cuántica parece contener una contradicción interna. Aparentemente no puede describir los instrumentos necesarios para realizar mediciones. Este es “el problema de la medición”.

Han habido varios intentos de resolver este problema. Pero no nos queda tiempo hoy para seguir por ese camino. Seguramente alguien podrá hablar de este tema en algún futuro café científico. Sólo quisiera mencionar algunas de las interpretaciones más curiosas y extravagantes.

Por ejemplo, tenemos el modelo del observador consiente propuesto entre otros por Eugene Wigner, donde la mente del observador jugaría un papel crucial. Esta interpretación “mentalista” le parecía absurda a muchos colegas, entre ellos a Erwin Schrödinger, quien como forma de atacarla propuso su famosa historia del gato dentro de la caja que está simultáneamente vivo y muerto hasta que un observador consciente abre la caja y mira en su interior.

Otra solución posible al problema de la reducción de la función de onda fue propuesta por Hugh Everett III en 1957. En la interpretación de Everett la paradoja se resuelve incluyendo al observador en la descripción cuántica. En este esquema, el “error” de la interpretación usual reside en la suposición tácita de que nosotros podíamos observar al mundo desde afuera, y con ello concluir que un resultado de la observación ocurría y los otros no. La conciencia demanda un resultado (es decir, realiza una medición) y con ello elige una rama donde existir. Pero como todas las ramas son equivalentes, la conciencia también se ramifica, una por cada resultado.

Y ahora quisiera terminar con un comentario que me vuelve a traer a Hamilton y de Broglie.

Una manera de evitar todos los problemas que vimos hasta aquí está dada, precisamente, por una línea de pensamiento que nace en la tesis de de Broglie. De hecho, muchos físicos nunca estuvieron de acuerdo con la manera en que la teoría cuántica se había desarrollado y mantuvieron viva la idea de que las partículas siguen trayectorias definidas. En ese caso el rol de la función de onda sería actuar como una “onda piloto” que guía estas trayectorias, tal como en la teoría de Hamilton de 1833 y en la de de Broglie de 1924. Estas ideas fueron desarrolladas matemáticamente por David Bohm en 1952.

Los resultados que se obtienen de esta manera son completamente equivalentes a los de la física cuántica tradicional, salvo que ahora no se necesita incluir la idea de la reducción de la función de onda para explicar el proceso de medición. La medición sólo consiste en una verificación del estado pre-existente de la partícula. Pero por varias razones esta teoría no fue aceptada por la mayoría de los físicos. En primer lugar porque, al intentar mantener el determinismo en la teoría cuántica, fue vista como una reacción conservadora en contra de la revolución conceptual que significaba la física cuántica en su interpretación ortodoxa.

Desde un punto de vista más pragmático, hay que destacar que estas teorías son bastante complicadas en contraste con la simplicidad, economía y elegancia de la teoría usual. Y por este motivo, esa "Cuántica" de Hamilton, de de Broglie, y de David Bohm, no es la que enseñamos hoy a nuestros estudiantes. Sino la que quedó fijada y santificada durante la conferencia Solvay de 1927, con la fuerza de la autoridad de Bohr, Heisenberg y Pauli.

¿Y el resto? Bueno, el resto fue herejía...