

Como una
escuela
de todas
las cosas...



CAFÉS CIENTÍFICOS 2012 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 agosto

La herejía 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)

En Diciembre de 1926, en una carta dirigida a su colega Max Born, Albert Einstein opinaba que *“La mecánica cuántica es ciertamente imponente. Pero una voz interior me dice que todavía no alcanzó su versión definitiva. [...] Yo, en todo caso, estoy convencido de que Él no juega a los dados.”*

En este café discutiremos los orígenes y alcances de una versión alternativa de la mecánica cuántica que confirma esa convicción de Einstein y que, tal como dijo otro gran físico llamado John Stuart Bell, *“debería ser enseñada como un antídoto contra la complacencia prevaleciente; para mostrarnos que la vaguedad, la subjetividad, y el indeterminismo no nos son impuestos por los hechos experimentales, sino que son el resultado de una deliberada elección teórica”*.

En 1987 John Stuart Bell (1928 – 1990) escribió lo siguiente¹,

Pero en 1952 vi lo imposible hacerse realidad, cuando David Bohm demostró que la mecánica ondulatoria podía transformarse de indeterminista en determinista. Más importante aún, la subjetividad de la versión ortodoxa, la referencia necesaria a un "observador", podía ser eliminada. Pero, ¿por qué Max Born no me habló de esta teoría aunque no fuese más que para señalar lo que supuestamente estaba mal con ella? ¿Por qué von Neumann no la tuvo en cuenta?

Esta opinión tiene el peso de la autoridad de John Bell quien, si no hubiese muerto sorpresivamente de hemorragia cerebral en 1990, posiblemente habría ganado el premio Nobel de Física. A continuación discutiremos los orígenes de esta versión alternativa de la Mecánica Cuántica, predicha por Albert Einstein (1879 – 1955) y pregonada y alabada por John Bell. Pero tenemos que comenzar por el principio, o al menos por algún principio. ¿Y qué mejor que empezar por el descubrimiento de la ecuación que da base y sustento a la teoría cuántica, la ecuación de Schrödinger?

Erwin Schrödinger (1887 – 1961) sufría de tuberculosis, y en varias oportunidades durante la década de 1920 debió internarse

¹ John Stuart Bell: “Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics” (Cambridge: Cambridge University Press, 1987) p. 160.

en un sanatorio suizo de Arosa. Unos pocos días antes de la Navidad de 1925, Schrödinger, entonces un poco conocido profesor de Física de la universidad de Zurich, llegó a Arosa para una estadía de dos semanas y media. Llevaba consigo una copia de la tesis escrita por el físico francés Louis de Broglie (1892 – 1987) el año anterior, una amante vienesa cuyo nombre no conocemos y dos perlas. Con la amante en su cama y las perlas en los oídos para evitar distracciones, Schrödinger leyó la tesis de de Broglie. Y es así como el 9 de Enero de 1926, cuando emprendió el regreso a Zurich, ya había descubierto la ecuación por la cual recibiría el Premio Nobel de física siete años más tarde.

Schrödinger agradeció profusamente a su amigo Hermann Weyl (1885 – 1955) por la ayuda que le brindó con la matemática de su trabajo. No fue la única ayuda que recibió de él durante ese invierno. Como en tantas oportunidades antes y después, Weyl se ocupó de alojar a la esposa de Schrödinger en su casa, mientras él hacía algunas de sus habituales escapadas con jóvenes amantes. Pues resulta que Schrödinger no era soltero. El 6 de Abril de 1920, cuando contaba con 33 años de edad, se había casado con Annemarie Bertel, una hermosa mujer diez años menor que él a quien todos conocían como Anny. Pero ese lazo nunca fue impedimento para que Schrödinger intentara conquistar a cuanta mujer cayera en su rango de visión. Es más, Schrödinger tenía una serie de pequeñas libretas negras donde—usando un código personal— anotaba cuidadosamente los detalles de sus relaciones con sus amantes. Uno de los grandes logros de los historiadores de la ciencia ha sido el descubrimiento de este código², lo que permite conocer los pormenores de sus encuentros amorosos. Poco tiempo después de su regreso a Zurich en Enero de 1926, aceptó ser el tutor de matemática de dos gemelas de 14 años de edad llamadas Itha y Roswitha Junger, pero conocidas familiarmente como Ithi y Withi. Tenían una relación de parentesco con Schrödinger ya que su suegra era hija ilegítima del abuelo de las niñas. Durante las lecciones de matemática, el tío Schrödinger abusó de Ithy, a quien llamaba Ithy-Bithy. Lo

² Walter Moore, “Schrödinger: Life and Thought” (Cambridge University Press 1992).

sabemos porque el mismo Schrödinger lo dice en unos poemas que le escribió a la niña. Finalmente, cuando Ithy tenía 16 años, la sedujo y la convirtió en su amante, dejándola embarazada al año siguiente. La familia de ella la indujo a un aborto que la dejó estéril. Para este entonces, Schrödinger ya había perdido interés en la joven, aunque se volvieron a encontrar en otras oportunidades. La última vez fue en Londres en 1934.

Otro de los amores de Schrödinger fue Hilde March, esposa de su asistente Arthur March (1891 – 1957). La relación con Hilde fue tal que ella se fue a vivir con Schrödinger y su esposa Anny, convirtiéndose en una segunda esposa. Además le dio una hija, llamada Ruth, que Arthur adoptó como propia pero que vivió en la casa de Schrödinger siendo criada por Hilde y Anny. Cuando cumplió diecisiete años Ruth supo que Arthur no era su verdadero padre, sino ese tío a quien llamaba Ervinilly. Pero eso no era todo, ya que Anny iba mucho más allá en la tolerancia al comportamiento de su marido. No sólo soportaba sus aventuras románticas, sino que participaba en muchas de ellas. Un curioso papel que desempeñaba era el de espantar a la amante de turno cuando su marido se había cansado de ella. La buscaba, se ponía en plan de esposa indignada, y asustaba a la joven. Schrödinger tuvo muchas, muchísimas amantes, varias de ellas entre sus propias alumnas. Además de Ruth, se sabe que fue padre de al menos otras dos hijas. En 1944 conoció en Dublín a Sheila May, una actriz de teatro, quien le dio una segunda hija. También irlandesa fue su siguiente amante, Kate Nolan, quien trabajaba en una oficina gubernamental de la ciudad, y de cuya relación nació su tercer hija en junio de 1946.

Erwin Schrödinger había recibido una excelente educación y era muy culto. Además del alemán, hablaba inglés, francés y español con fluidez. Durante la primera guerra mundial fue oficial de artillería del ejército austrohúngaro en el frente italiano, dedicándose al cálculo de ángulos de tiro y trayectorias, tal como varios de sus colegas a uno y otro lado de las líneas de batalla. Posiblemente a Schrödinger le interesó más la filosofía (y obviamente, las mujeres) que la física, y llegó a la cuántica ya

siendo mucho mayor, al menos en comparación con la generación de Pauli, Heisenberg y otros. En 1944 escribió el libro “¿Qué es la vida?” donde discute la posibilidad de que el código genético esté alojado en moléculas complejas. De acuerdo a James Dewey Watson (1928), esta fue la fuente de inspiración que lo llevo al descubrimiento de la estructura de la doble hélice del ADN. También Francis Crick (1916 – 2004) fue inspirado por este libro.

A partir de la publicación de su famosa ecuación tuvo los mejores años de su carrera. Pero llegó el nazismo al poder y, aunque no era judío, decidió marcharse de Alemania. Fue uno de los pocos intelectuales de esa talla que se exiliaron sin ser forzados. Cuando hizo su peregrinaje por Oxford, Madrid, Gante, Roma y Dublín dejó perplejas a las audiencias. Por un lado hacía las delicias de sus oyentes hablándoles de física, folclore, antropología, filosofía ó música. Por otro lado escandalizaba a ese mismo público con sus frecuentes líos de faldas, y por convivir con dos esposas. Fue expulsado de la Universidad de Oxford, y posiblemente ese fue el motivo por el cual no se estableció en Princeton.

Schrödinger falleció de tuberculosis en Viena el 4 de Enero de 1961, a la edad de 73 años.

No es este el ámbito para discutir la ecuación de Schrödinger. Sólo diré que su solución es un artefacto matemático denominado función de onda, que incluye todo lo que se puede saber sobre un sistema físico.

Tal vez la mejor manera de intentar un acercamiento a lo que es la función de onda sería con un experimento pensado ideado por el físico norteamericano Richard Feynman (1918 - 1988) en el marco de unas famosas clases que dictó en Caltech a partir de 1961. Su idea fue hacer pasar electrones a través de ranuras delgadas.

Ya describí este experimento en un café del año pasado³, pero no viene mal repetirlo aquí: Consideremos un cañón que dispara partículas contra una pared sobre la cual hemos realizados dos incisiones en la forma de dos ranuras paralelas. En el marco de la física clásica, las partículas llegan a la pared y rebotan contra la misma o pasan 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? Ahora la partícula sería representada por una función de 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. Y justamente aquí es donde entra la ecuación de Schrödinger, ya que nos da una manera de calcular la función de onda. Cuando esta onda alcanza la pared se distorsiona y parte de ella pasa a través de las ranuras. Pero veamos por qué esta descripción en términos de una función de onda parece ser más apropiada que la otra. Para ello supongamos que modificamos nuestro experimento colocando una pantalla del otro lado de la pared de manera que registre la llegada de las partículas que pasan por las rendijas. Si consideramos partículas moviéndose en trayectorias rectas, uno esperaría que estas marcas estén en aquellos puntos correspondientes a haber atravesado una u otra rendija. Sin embargo en la práctica se observa una distribución con máximos y mínimos. Y justamente la función de onda puede describir este resultado. La conclusión parece ser inevitable. Las partículas estarían comportándose no como partículas, sino como ondas. Y estas ondas no pasan por una u otra ranura, sino por ambas simultáneamente. O sea que si tapamos una u otra rendija, veremos sólo una línea de luz. Pero si dejamos ambas abiertas, no veremos dos líneas de luz, sino un “espectro de interferencia”. Y para interpretar este resultado no tenemos más remedio que aceptar a la función de onda como un atributo de la realidad. Lo que quiero decir es 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

³ R. O. Barrachina: “El Nacimiento de la Cuántica”. En J. Gervasoni y H. Corso, eds. “Café con Ciencia” (Tinta Libre, Córdoba, Argentina, 2012).

matemático abstracto solución de una ecuación ideada por un genio de dudosa moral.

Ahora bien. Ya tenemos la función de onda. Ahora, ¿qué hacemos con ella? ¿Cómo obtenemos a partir de ella algo medible, algo observable? La solución a este dilema fue provista por el físico alemán Max Born (1882 – 1970), y lo hizo casi sin darse cuenta.

Según el obituario que publicó The Times, Max Born fue una persona apreciada por sus muchos colegas y alumnos en virtud de su calidez y la sencilla franqueza de su personalidad. Entre sus estudiantes de doctorado se destaca Maria Goeppert – Mayer (1906 – 1972), quien ganó el premio Nobel de Física en 1963. De hecho, sigue siendo la única mujer, aparte de Marie Skłodowska-Curie (1867 – 1934), que hasta el presente ganó el Nobel de Física. Como detalle anecdótico digamos que una nieta de Max Born alcanzó cierta popularidad. Se trata de Olivia Newton-John. Salvo eso, no hay otros chismes jugosos que contar acerca de él. Así que sigamos con la historia.

Max Born introdujo su solución al problema de la interpretación de la función de onda en un artículo publicado en 1926 y que se conoce como el primer artículo de 1926. Con toda sagacidad ya habrán adivinado que Born publicó un segundo artículo en 1926 y que de alguna manera es muy importante. Hablaremos sobre el mismo en un momento. Pero ahora concentrémonos en éste. Notablemente, ese artículo no tenía nada que ver con el problema de la interpretación de la función de onda. El objetivo era desarrollar una teoría de colisiones, es decir tomar la teoría cuántica, que hasta entonces sólo se había aplicado a átomos aislados, y usarla para describir la colisión entre ellos.

Permítanme, antes de continuar, recordarles cómo es el proceso de publicación de un artículo científico. Uno lo escribe y lo envía a una editorial. El editor hace una primera lectura y si está satisfecho se lo envía a uno, dos o más científicos, quienes lo revisan y dan su opinión de manera anónima. Si todo va bien, con

algunas eventuales idas y vueltas entre el editor y el autor, el artículo pasa a imprenta. Pero antes de ser publicado el autor recibe lo que se llama “prueba de galera” o “galerada”. Este nombre proviene del de galera o galerín, que es la caja donde se acomodaban los tipos móviles en la imprenta tradicional. Cuando el autor recibe esta prueba de galera, es su última oportunidad para hacer cualquier corrección o agregado en el artículo. Por supuesto que debe ser a lo sumo una corrección muy pequeña. Y Max Born aprovechó esa posibilidad para introducir en la prueba de galera de su artículo la nota al pie más importante de la historia de la física. En el artículo había escrito que la función de onda determinaba una probabilidad. Por supuesto que este era, en el mejor de los casos, un concepto poco claro, y en el peor de los casos, incorrecto. Born se dio cuenta de ello, y escribió una nota añadida en la prueba de galera que decía que

Un análisis más detallado muestra que la probabilidad es proporcional al cuadrado de la función de onda.

Así, con esa breve frase de apenas una docena palabras, nació la llamada interpretación probabilística de la física cuántica y Max Born, que para entonces ya tenía 44 años, se aseguró el premio Nobel de Física. Pero es justo decir que la idea ya estaba en el aire, y si Born no hubiese encontrado ese resultado primero, otro lo habría hecho antes de finales de ese año. El artículo de Born fue recibido por la editorial de Zeitschrift für Physik el 25 de Junio de 1926. Cuatro días antes, el 21 de Junio, Annalen der Physik había recibido un artículo de Schrödinger donde deducía, a partir de su ecuación de ondas, una ecuación que conocemos como ecuación de continuidad y que asocia el cuadrado del módulo de la función de onda con una densidad. Pero Schrödinger no dio el saldo de imaginación de considerarla como una densidad de probabilidad. Para él era tan sólo una densidad de carga. Sin embargo, el físico inglés Paul Dirac (1902 – 1984) había llegado a la idea de una densidad de probabilidad casi al mismo tiempo que Born, pero no publicó ese resultado. También el húngaro Eugene Wigner (1902 – 1995) estaba considerando identificar al módulo de la función de onda con alguna forma de

probabilidad. Cuando leyó el artículo de Born, primero pensó que éste se había equivocado al tomar el cuadrado del módulo de la función de onda, pero después se dio cuenta de que estaba en lo cierto. Vemos que si Max Born no hubiese escrito esa frase en la prueba de galera, igual se hubiese desarrollado la interpretación probabilista, ya que sin duda estaba dando vueltas en las mentes de varios físicos de la época.

Así llegamos a la famosa conferencia Solvay de 1927. Parecía que Schrödinger primero y Born unos pocos meses más tarde habían resuelto el gran misterio cuántico. Después de un cuarto de siglo de búsqueda, finalmente se disponía de una ecuación que permitía encontrar una función de onda y una interpretación para la misma. Y con estas dos herramientas se estaban logrando explicar cuantitativamente todos los fenómenos cuánticos que se habían resistido por tantos años. Pero no todo era un lecho de rosas. Por ejemplo, junto con la interpretación propuesta por Born se había colado en la física cuántica la idea de una probabilidad. Y lo hacía de una manera bastante extraña, donde ya no sería posible predecir el resultado de una medición, sino sólo estimar la probabilidad de obtener un resultado dado. Peor aún, cuando realizamos una medición, es decir cuando observamos un sistema físico, la función de onda no sólo cambia de una manera aleatoria, sino también de forma súbita y discontinua.

El problema era que se esperaba construir una teoría que generalizara a la mecánica clásica, donde la evolución se diese de una manera continua y bien determinada, y no de una forma discontinua y aleatoria como en un proceso de medición. Vemos que ya desde su nacimiento la mecánica cuántica parecía contener una contradicción interna. La manera propuesta por físicos tales como Niels Bohr (1885 – 1962), Werner Heisenberg (1901 - 1976) y Wolfgang Pauli (1900 – 1958) para lidiar con este y otros problemas fue, básicamente, dejar de pensar en ellos. Y no me refiero a negarlos, sino -simplemente- a desestimarlos, a no tenerlos en cuenta. Con el tiempo esta propuesta iba a ser conocida con el nombre de interpretación de Copenhague, por el

lugar donde vivía y trabajaba su principal paladín, Niels Bohr. Según esta interpretación en el mundo microscópico existe una complementariedad entre las nociones de partículas y ondas. Así la descripción ondulatoria provista por la ecuación de Schrödinger es adecuada para explicar un fenómeno de interferencia, y allí todo ocurre de manera continua y bien determinada, mientras que la noción de partícula es útil en todo proceso de medición, y es allí, en la medición, donde aparece la discontinuidad y la probabilidad. Tal como explicamos el año pasado, para sobrellevar esta contradicción inherente entre el mundo observado y nuestro esquema de la realidad, la interpretación de Copenhague señala 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 supuesto que los problemas de la teoría ortodoxa no terminan allí. Hay otras rarezas que ya mencionamos el año pasado, como por ejemplo la no-localidad puesta de manifiesto por la llamada “paradoja EPR”.

En 1935, Albert Einstein, Boris Podolsky (1896 – 1966) y Nathan Rosen (1909 – 1995) propusieron un experimento pensado que ha tenido una enorme influencia en el análisis de la interpretación de la mecánica cuántica. Una partícula inestable se divide en dos más pequeñas que se alejan una de otra y al cabo de algún tiempo se encuentran totalmente separadas. La teoría cuántica nos dice que hay ciertas propiedades que se mantienen relacionadas y si hacemos una medición sobre una de las partículas, entonces sabremos con certeza el resultado de una medición similar efectuada sobre la otra partícula. Ahora, y aquí está lo interesante, la física cuántica parece indicar que el estado de esta segunda partícula no estaba definido antes de la medición y que sólo se define al medir la primera partícula. Además ello ocurre instantáneamente, independientemente de cuán lejos se encuentre una de la otra, aun cuando cabría esperar que ambas partículas

puedan estar lo suficientemente alejadas como para que una medición sobre una de ellas no influya sobre la medición de la otra.

Por casi tres décadas esta paradoja permaneció como un gran misterio a resolver hasta que John Stuart Bell, uno de los físicos más lúcidos del siglo XX, logró expresar la paradoja EPR en forma cuantitativa mediante un sencillo teorema publicado en 1964. Bell propuso una medición cuyo resultado permitiría determinar si la cuántica era local o no local. Desde el primer experimento realizado en 1972 por John Francis Clauser y Stuart Jay Freedman, han ocurrido otras muchas verificaciones, y creo que la comunidad científica se ha convencido de que no es posible formular una teoría local de la cuántica.

Tenemos entonces dos puntos claves de la teoría cuántica. Uno es la no-localidad puesta en evidencia por el teorema de Bell. Cualquiera sea la teoría que se construya, tiene que ser no-local. El segundo es el problema de la medición. Y el hecho es que no todos los asistentes a la reunión de Bruselas de 1927 estaban tan contentos o convencidos acerca las bondades de esta teoría recién nacida y la interpretación que se estaba gestando. Y uno de los primeros en plantear su preocupación fue Albert Einstein.

En Diciembre de 1926 Einstein le escribió una carta a Max Born donde confesaba que, a pesar del entusiasmo de sus colegas, él sentía que la teoría cuántica todavía no había alcanzado su versión definitiva. Y remataba con la famosa frase acerca de que Dios no juega a los dados. Buscando un confesor para sus dudas, Max Born parecía ser el menos apropiado o el que menos estaría dispuesto a aceptar esa herejía planteada por Einstein. Después de todo, Born era el padre de la interpretación probabilística, por la cual sólo tenía que sentarse a esperar que tarde o temprano le dieran el premio Nobel. Pero ocurre que Born compartía las dudas de su colega. En un artículo enviado a publicar en 1926 un mes después del que mencioné hace un rato, Max Born comenzaba discutiendo la idea de que las partículas podrían representarse con

una función de onda, y acto seguido decía algo absolutamente sorprendente:

Ninguno de estos puntos de vista me parece satisfactorio. Me gustaría intentar una tercera interpretación y probar su aplicabilidad a procesos de colisión: Así que pongo mis esperanzas en un comentario de Einstein acerca de la relación entre el campo ondulatorio y el corpúsculo de luz. El dice que las ondas sólo pueden imaginarse como guiando a los corpúsculos, y habla en este mismo sentido de un “campo fantasma”. [...] Y aquí es obvio ver a las ondas de de Broglie y Schrödinger como un “campo fantasma”, o mejor aún como un “campo guía”.

El comentario de Einstein al que hace referencia Born databa de dos décadas antes pues, como en tantas otras cosas, el primero en imaginar una teoría de esta naturaleza fue Albert Einstein. Desde 1905 estaba enfrascado en un intento por reconciliar el electromagnetismo de Maxwell, o sea la óptica (que naturalmente predecía la existencia de fenómenos de interferencia), con la existencia, planteada por el mismo, de partículas de luz o fotones.

En ese marco, a Einstein se le ocurrió que el campo electromagnético podría empujar y guiar al fotón, algo que él llamó campo guía o *führungsfeld*, de manera similar a como una ola empujaría a un surfista. Basándose en esta idea, el resto del segundo artículo de Born fue un intento –no del todo logrado– de formular una teoría cuántica alternativa donde la función de onda es en realidad una “onda piloto” que guía a la partícula en su trayectoria. Pero esto no iba a quedar ahí. Al año siguiente, Louis de Broglie logró lo que Born había esbozado, poniendo la relación entre la partícula y su onda guía en términos matemáticos precisos. De la mano de verdaderas eminencias como Einstein, Born y de Broglie se estaba creando así una formulación alternativa a la visión probabilística. Como veremos, la batalla entre estas dos teorías iba a darse en la conferencia Solvay de 1927. Y de esa encrucijada iba a salir victoriosa la versión probabilística, y la otra iba a ser condenada y relegada a un

injusto olvido del cual sólo comenzó a recuperarse durante los últimos años del siglo XX.

En 1927, como continuación natural de su tesis de 1924 y en el marco de la conferencia Solvay de ese año, de Broglie demostró que -en efecto- era posible construir una teoría donde el movimiento de una partícula es guiado por una función de onda. De esta manera se tiene al mismo tiempo una partícula y la explicación de los efectos de interferencia. En particular, de Broglie utilizó su teoría para calcular las órbitas del electrón en el átomo de Hidrógeno. La charla de de Broglie fue seguida por las de Born y Heisenberg, naturalmente referidas a la interpretación probabilística, y por la de Schrödinger, quien se limitó a hacer una presentación puramente matemática de la ecuación de ondas y su solución. Finalmente, Bohr cerró esa sesión con una vuelta a la interpretación probabilística. Pero fue la primera charla de de Broglie la que despertó mas controversias y debates. Einstein fue el único que salió en su apoyo. Aún cuando no estaba en contra de la nueva teoría, Hendrik Kramers (1894 – 1952) planteó que no veía ninguna ventaja operativa respecto de la teoría de Schrödinger, una observación que no estaba del todo desacertada. Finalmente, tomó la palabra Pauli, a quien en una de las dos fotos de grupo tomadas durante la conferencia se lo ve mirando a de Broglie con cara de “te voy a reventar”. Y en efecto lo hizo. Pauli planteó una objeción referida a la aplicación de la teoría de onda piloto a un experimento realizado en 1914 por James Franck (1882 – 1964) y Gustav Hertz (1887 – 1975) para probar la cuantificación de los niveles de energía de los átomos. No era una objeción difícil de refutar, pero el tímido y reservado de Broglie no era el mejor campeón de una nueva teoría. Estas palabras escritas en 1973 por el entonces ministro de cultura francés, Maurice Druon⁴,

⁴ A. George, et al., “Louis de Broglie: sa conception du monde physique. Le passé et l’avenir de la mécanique ondulatoire” (Gauthier-Villars, Paris, 1973).

“Delgado, discreto, secreto, Louis de Broglie se para a la entrada del camino que él abrió, y con una sonrisa de cortés caballero, mira el futuro pasar.”

representan una forma elegante de decir que de Broglie no era oponente para Pauli. De hecho, la leyenda dice que su respuesta a la objeción de Pauli fue bastante pobre, causando una muy mala impresión en la audiencia. No fue así. La respuesta de de Broglie fue correcta, pero aparentemente la audiencia se perdió en los detalles técnicos. Además, el contraste entre la gentileza de de Broglie y la rudeza de Pauli dio la impresión de que las objeciones de Pauli eran correctas. Naturalmente, Born no dijo nada al respecto. Ya había logrado respeto, fama y un posible premio Nobel por su primera propuesta probabilística, y posiblemente se dio cuenta de que no era sabio escupir para arriba.

Así que la propuesta de de Broglie fue olvidada completamente. El mismo de Broglie la rechazó en artículos y conferencias posteriores, llegando a decir que se lo había malinterpretado. El golpe de gracia fue dado por John von Neumann (1903 – 1957) en 1932, cuando publicó un artículo donde aseguraba haber demostrado la imposibilidad de cualquier teoría de variables ocultas, como lo era la propuesta por de Broglie. De hecho, la demostración de von Neumann estaba basada en suposiciones incorrectas, tales como que la física cuántica era local, y por lo tanto no iba en contra de la teoría de de Broglie. Pero eso no se advirtió sino hasta varias décadas después.

Como ya he mencionado a Von Neumann y Eugene Wigner permítanme una digresión. Von Neumann y Wigner eran dos de los más geniales científicos de una camada de brillantes físicos y matemáticos húngaros que se exilaron en Estados Unidos antes o durante la Segunda Guerra Mundial. Se caracterizaban por una enorme influencia política y un muy fuerte acento, que había sido popularizado por el actor Béla Lugosi (1882 – 1956) en la película “Drácula” de 1931. El nivel educativo que estos

científicos traían de Hungría era muy superior al americano de aquel entonces, y por comparación parecían tener un intelecto sobrehumano.

La broma de moda acerca de ellos, y que ellos mismos adoptaron, decía que eran los descendientes de una fuerza expedicionaria marciana que aterrizó en Budapest entre 1890 y 1900. Ahora se habían trasladado a América, desde donde intentarían dominar el mundo. Esta broma se originó en una paradoja debida a Enrico Fermi (1901 – 1954), según la cual hay una enorme probabilidad de que existan otras civilizaciones extraterrestres, pero no hay evidencia incuestionable sobre las mismas. Aparentemente Leó Szilárd (1898 – 1964) replicó que los extraterrestres ya estaban viviendo en la Tierra, salvo que se llaman a sí mismos húngaros. Si alguna vez ven o si ya han visto la película de 1964 de Stanley Kubrick (1928 – 1999), “Dr. Strangelove o cómo aprendí a dejar de preocuparme y a amar la bomba”, y lo hacen en su idioma original, advertirán que el personaje del Dr. Strangelove que interpreta Peter Sellers (1925 – 1980) tiene un muy fuerte acento centro-europeo. De hecho, para componerlo, Peter Sellers tomo como modelos al alemán Wernher von Braun (1912 – 1977), y a los húngaros Edward Teller (1908 – 2003), padre de la bomba de hidrógeno, y von Neumann, quien creó la idea de la Destrucción Mutua Asegurada o MAD por sus siglas en inglés (Mutual assured destruction), que es justamente la base argumental de la película.

Volviendo a la otra teoría cuántica, era evidente que para tener mejores oportunidades de imponerse necesitaba un campeón más energético que el tímido de Broglie. Y lo encontró un cuarto de siglo más tarde en la figura del físico norteamericano David Joseph Bohm (1917 – 1992), quien posiblemente fue la primera persona que genuinamente comprendió el significado e importancia del trabajo de de Broglie de 1927.

Bohm era hijo de inmigrantes. Su padre era húngaro y su madre lituana, ambos judíos. Toda su vida tuvo inclinaciones políticas de tipo socialista, por lo cual en Norteamérica fue catalogado de

radical. Esto le acarreó innumerables dificultades. Por ejemplo, cuando comenzó el proyecto Manhattan, Bohm estaba realizando su tesis bajo la dirección de Robert Oppenheimer (1904 – 1967). Lo natural hubiese sido que se trasladara con su jefe a Los Álamos, pero no recibió el permiso de seguridad. Así que tuvo que permanecer en Berkeley, siendo dirigido por correspondencia. Pero el colmo se dio cuando terminó los cálculos de colisiones de protones y deuterones que formaban parte de su proyecto de tesis. Este trabajo fue clasificado por motivos de seguridad nacional. Así que se le prohibió a Bohm tener acceso a sus propios cálculos y borradores. Es más, se le prohibió escribir la tesis, o inclusive defenderla. Se salió de esta situación ridícula cuando la Universidad de California aceptó un certificado de Oppenheimer donde este aseguraba que Bohm había completado su tesis, y así le fue otorgado el doctorado.

Después de la guerra, Bohm consiguió empleo en Princeton, donde trabajó con Einstein. En 1949 fue llamado a presentarse ante el Comité de Actividades Antiamericanas de Joseph McCarthy (1908 – 1957). Pero él se negó a testificar y rehusó dar evidencia en contra de sus colegas. Por ello fue arrestado a comienzos de 1950. En Mayo fue liberado, pero Princeton ya lo había suspendido. A pesar de la presión de Einstein para que se lo readmitiera, la Universidad mantuvo su rechazo. Así que Bohm tuvo que buscar trabajo en otro lado, y lo encontró en la Universidad de San Pablo por invitación de Jayme Tiomno (1920 – 2011). Al llegar a Brasil el consulado de Estados Unidos le confiscó su pasaporte. Así que decidió rechazar la ciudadanía norteamericana y optar por la brasileña. Recién en 1986 entabló un juicio y recuperó su ciudadanía original.

En San Pablo, Bohm logró formar un grupo de colaboradores y alumnos, entre ellos el argentino Mario Bunge (1919), quien trabajó con Bohm durante un año, y Guido Beck (1903 – 1988), otro prócer de la física argentina y brasileña, quien en algún momento enseñó en Bariloche. El CNPq⁵ financió su trabajo y le

⁵ Conselho Nacional de Pesquisa.

otorgó becas para sus alumnos. Para ese entonces Bohm ya había terminado de escribir un libro de física cuántica que se publicó en 1951 y fue muy bien recibido. Pero al poco tiempo comenzó a sentirse insatisfecho con la formulación ortodoxa que allí presentaba. Había descubierto el trabajo de De Broglie de 1927 y eso lo llevó a considerar la idea de una onda piloto. Y así, durante su estadía en San Pablo, Bohm publicó dos trabajos en *Physical Review*, donde redescubría lo que de Broglie ya sabía en 1927, que si realizamos algunos pasos mágicos con la ecuación de Schrödinger obtenemos la segunda ley de Newton de la física clásica, la famosa “fuerza igual a masa por aceleración”, pero con una fuerza adicional que depende, justamente, de la función de onda. En otras palabras, la ecuación fundamental de la mecánica “clásica” parece seguir siendo válida, siempre que se incluya una fuerza “cuántica”. Después se iba a descubrir que había una forma más elegante de escribir este resultado, donde en lugar de usar la segunda ley de Newton se puede trabajar con una ecuación llamada ecuación guía.

En este nuevo contexto, el proceso de resolución de cualquier problema cuántico sería así. Primero se resuelve la ecuación de Schrödinger y se calcula la función de onda. Se toma la fase de esta función de onda y se la reemplaza en la ecuación guía, con lo cual se obtiene la velocidad de la partícula y con ella su trayectoria. O sea que la dicotomía “onda o partícula” sería falsa. La misma idea de la famosa complementariedad entre onda y partícula perdería sentido, ya que no se tendría que elegir entre onda o partícula sino que, en todo momento, se tendrían ondas y partículas. Las ondas guían a las partículas en sus trayectorias, pero no las reemplazan.

Lo notable, lo más impresionante de esta formulación, es que así funciona también la teoría clásica. Hacia mediados del siglo XIX la formulación original de Isaac Newton (1643 – 1727) de la mecánica clásica se había transformado en algo más elegante y poderoso, la teoría de Hamilton-Jacobi. En esta nueva formulación se resuelve dicha ecuación de Hamilton-Jacobi para obtener la fase de una función de onda. Y a partir de ella se puede

obtener la velocidad y la trayectoria de una partícula cualquiera utilizando la misma ecuación guía de la teoría cuántica. Y la similitud entre ambas teorías va más allá, ya que la ecuación de Schrödinger es equivalente a la ecuación de Hamilton-Jacobi de la mecánica clásica, excepto por un término que se anula en el límite clásico.

O sea que cuando en Diciembre de 1900 Max Planck (1858 – 1947) dio inicio a la física cuántica con su famosa presentación sobre la radiación del cuerpo negro, ya se tenían todos los elementos para construir una nueva teoría. Se podría haber hecho a partir de la ecuación de Hamilton-Jacobi. Pero en el proceso de crear una explicación para los efectos del mundo microscópico, esto fue olvidado y se decidió comenzar desde cero.

Pero si la teoría cuántica es casi idéntica a la clásica, ¿dónde y cómo aparece la probabilidad? Porque, después de todo, en la mecánica clásica se puede -en principio- calcular las trayectorias de las partículas exactamente, y con eso conocer el resultado de una medición con todo detalle. ¿No es así? Bueno, ocurre que aún en la física clásica tal opción no es del todo factible, ya que no se pueden conocer las condiciones iniciales de un problema con total precisión. Haber olvidado o despreciado esta idea sencilla es lo que llevó a que el mundo científico se sorprendiera cuando, a fines de la década de 1960, se descubrió la teoría del caos determinista. Conceptos como el efecto mariposa provienen de esta limitación sobre el conocimiento de las condiciones iniciales. En realidad, todo lo que se puede llegar a estimar para cada condición inicial posible es una probabilidad. Esto esto no quiere decir que las partículas no puedan seguir trayectorias precisas, si no que no se pueden conocer con total precisión las condiciones iniciales. En otras palabras, sólo se puede trabajar con probabilidades o, mejor dicho, con densidades de probabilidad.

Cuando repensamos el problema desde esta perspectiva, vemos que la teoría cuántica no sería tan extraña como parecía. Tal como en la mecánica clásica no se puede conocer el estado inicial de un

sistema con total precisión. Pero ahora ese desconocimiento no se debe tanto a una incapacidad técnica sino a algo intrínseco a la teoría, y me refiero al principio de incerteza de Heisenberg. Por todo esto, la teoría cuántica resultaría ser, ni más ni menos, que una extensión natural de la mecánica clásica. Y para más inri, esta asociación de la física cuántica con la física clásica, cuando se la interpreta como un flujo de probabilidad, era algo que se conocía aún antes de esa reunión de 1927 donde de Broglie presentó su teoría.

En 1926, es decir inmediatamente después de que Schrödinger descubriera su ecuación y antes de la conferencia Solvay, el físico alemán Erwin Madelung (1881 – 1972) encontró que la ecuación de Schrödinger es equivalente a las ecuaciones que describen la evolución de un fluido no viscoso, salvo que ahora aparece una presión de origen cuántico. Entonces, ya sea en la versión de de Broglie y Bohm o en la de Madelung, es posible interpretar la evolución cuántica en términos de una densidad de probabilidad sobre la que actúa una fuerza, en el primer caso, y una presión, en el segundo, ambas de origen cuántico.

Entonces, si la física clásica y la cuántica son tan parecidas, ¿dónde está la diferencia? Ocurre que en la física cuántica no se puede hacer desaparecer la función de onda y llevar toda la teoría a una forma que dependa sólo de las posiciones de las partículas y las fuerzas entre ellas. Esta imposibilidad de reconstruir la teoría sin referencia a una función de onda hace que aparezcan fenómenos cuánticos tales como la interferencia y la no localidad. De esta manera, al estar basada en la ecuación de Schrödinger, la teoría de onda piloto, también llamada mecánica bohmiana, teoría de de Broglie-Bohm o interpretación causal, hereda y hace explícitas todas las características, conclusiones y propiedades de la mecánica cuántica.

Pero, ¿qué ha pasado? Volvimos a la ecuación de Schrödinger, y sólo agregamos una ecuación adicional, la ecuación guía. No parece que cambió mucho, sin embargo, ese pequeño agregado

cambia todo. Cambia, de hecho, la ontología de la teoría. Podríamos decir que la ontología de la mecánica clásica consiste en trayectorias y la de la mecánica cuántica ortodoxa en una función de onda. Por su parte, la ontología de la teoría de de Broglie y Bohm adopta ambas, es decir trayectorias y una onda piloto. En cada momento existe no sólo una función de onda tal como en la formulación ortodoxa de la mecánica cuántica, sino también una configuración bien definida tal como en la mecánica clásica.

Para ir terminar esta historia de una manera apropiada, debería mostrar cómo se las ingenia esta teoría de de Broglie y Bohm para describir los fenómenos más conocidos de la física cuántica como, por ejemplo, la interferencia, la incerteza, el problema de la medición, la probabilidad, la no localidad, los observables o el espín; por nombrar sólo algunos. Pasar revista a todos estos desafíos requeriría mucho más espacio del que disponemos, así que voy a dejar eso para otra oportunidad. Pero al llegar a este punto tenemos que ser comprensivos, pues estamos enfrentando una teoría ortodoxa consolidada por décadas de trabajo de un sinnúmero de científicos, contra otra que recién está comenzando a ser utilizada por un número apreciable de físicos, y no sólo como una rareza estudiada por algunos herejes aislados como Bohm o Bell.

Tal vez el punto de quiebre se dio a comienzos de este siglo, cuando el químico Robert E. Wyatt de la Universidad de Texas en Austin desarrolló un método de cálculo llamado de “trayectorias cuánticas”. Básicamente, en esta técnica se divide la función de onda en pequeños elementos y se los deja evolucionar como si fueran partes de un fluido. Este método ha sido adaptado, extendido y utilizado en diversas áreas de física y química. De hecho, ya hay algunos libros referidos al método de las trayectorias cuánticas. Pero estos tienen un carácter técnico y no educativo. Por su parte, sobran los dedos de una mano para contar los libros de donde se presenta a la teoría cuántica desde el punto de vista de De Broglie – Bohm y que eventualmente puedan

aspirar a convertirse en libro de texto para introducir la cuántica en el marco de dicha formulación. Es poco frente al gran número de textos de la cuántica ortodoxa, pero por algo se empieza...

Como conclusión. Es sorprendente como en 1927, habiendo dos teorías básicamente similares, la comunidad científica optó por una de ellas en detrimento de la otra. Si las circunstancias hubiesen sido otras, tal vez la historia hubiese sido diferente, y hoy algunos físicos herejes estarían planteando la posibilidad de una cuántica sin trayectorias. Como alguien dijo una vez⁶ (y lamento escribir la cita en inglés, pero es una de esas expresiones intraducibles),

Would Bohr be born if Bohm were born before Born?

O sea, jugando con la semejanza de la palabra nacido (born) con los apellidos de Bohr, Bohm y Born, ¿hubiese nacido Bohr si Bohm hubiese nacido antes que Born? O en otros términos, ¿habría prevalecido la interpretación de Copenhague de Niels Bohr si David Bohm hubiese nacido antes que Max Born? Da que pensar...

⁶ H. Nikolić: "Would Bohr be born if Bohm were born before Born?" American Journal of Physics, Volume 76, Issue 2, pp. 143-146 (2008).