

La filosofía de la mecánica cuántica

Luis Joaquín BOYA

Departamento de Física Teórica, Universidad de Zaragoza (España).

Motivación

Es inquietante que, a los 85 años de su implantación (Werner Heisenberg, 1925), todavía se sigan discutiendo la interpretación de la Mecánica Cuántica moderna y los problemas filosóficos (especialmente epistemológicos y ontológicos) que plantea; y, recientemente, también en nuestras Revistas de Física [1,2]. Ni la revolución copernicana, ni la dinámica newtoniana, ni siquiera la Relatividad de Einstein (especial y general), han estado sujetos mucho tiempo a tan tremenda discusión *por parte de los físicos*: evidentemente, los filósofos y los historiadores seguirán discutiendo e iluminando/oscurciendo todas las cuestiones, pero los científicos hace tiempo que ya han alcanzado un cierto consenso interpretativo, creemos, sobre Copérnico, Newton, Maxwell, Planck, y Einstein (por lo que a la Relatividad se refiere). Una reciente carta en *American Journal of Physics* [3] habla del “Escándalo de la Mecánica Cuántica”, etc.

En este ensayo no pretendemos zanjar estas discusiones, no somos tan ilusos. Nuestro propósito es el siguiente: aceptado un consenso en el que la mayor parte de las predicciones “paradójicas” de la mecánica cuántica han sido suficientemente comprobadas experimentalmente: por ejemplo, las desigualdades de Bell [4], los experimentos de elección retardada (*delayed choice*) [5], y los del borrador cuántico (*quantum eraser*) [6], ¿se sigue de ello que unas determinadas posiciones filosóficas están experimentalmente reforzadas hasta el punto que sus contrarias deben quedar excluidas en su pretensión de apoyar una descripción de la realidad? En otras palabras, ¿han determinado los experimentos cuánticos de los últimos 25 años la elección/selección de una determinada posición filosófica, frente a otras, contemplables *a priori* e incluso sostenidas por mucha gente durante muchos años (causalidad estricta, determinismo, realismo...)? Por ejemplo, ¿han refutado los experimentos de Aspect [7] y otros una filosofía completamente realista y/o determinista en nuestra descripción del mundo de lo muy pequeño? Finalmente, ¿hay una filosofía dominante que fluye de la mecánica cuántica moderna para la inteligibilidad del mundo material?.

Prejuicios declarados

Queremos de antemano expresar unos pocos de nuestros prejuicios personales pertinentes al tema, ya que creemos que son posiciones filosóficas (o ideológicas) apriorísticas lo que uno sospecha de un Einstein, un Bohr y otros más mundanos, cuando se expresan en relación a cuestiones comprometidas de la filosofía de la ciencia; y como eso es algo probablemente inevitable, más vale declarar nuestra posición cuanto antes. Nosotros creemos, por ejemplo, que el atomismo de Demócrito (s. V antes de C.) es el verdadero antecedente de la interpretación probabilista, o, más llamativamente, que la raíz del principio de incertidumbre está en Demócrito (“sólo podemos medir átomos con átomos, ergo, hay una limitación en la precisión de los tamaños...”); el Prof. G. Sudarshan (Austin, TX, USA) nos ha insistido muchas veces que la naturaleza atómica del mundo físico y la “negación del asno de Buridán”¹ conducen indefectiblemente a una física probabilística; el mismo argumento hace plausible que la desintegración radiactiva sea estadística, al azar, como más adelante comentaremos.

Otro “prejuicio” que mantenemos es que las dos mayores figuras nominales de la física del s.XX, Albert Einstein y Niels Bohr, no han sido favorecedoras, sino entorpecedoras, en la interpretación nítida actual de la teoría cuántica, aunque por razones diametralmente opuestas: Einstein por su aferramiento a una visión del mundo (*Weltanschauung*) estrictamente determinista, causal y realista, que proviene ya de su formación juvenil (Einstein, por ejemplo, no creía en el libre albedrío [8]), y Bohr por su insistencia en la dualidad onda-corpúsculo [9], como desarrollamos luego más en detalle, que proviene a su vez de querer salvar su principio de correspondencia (y luego el de complementariedad (1928)), que él toma (pero nosotros no) como su principal aportación a la mecánica cuántica antigua, 1913-25. Un tercer punto de vista nos ha sido recalado por Ignacio Cirac [10] y lo compartimos: es hora ya de que nos dejemos de discutir tanto los aspectos paradójicos de la teoría cuántica, que están fuera de toda duda experimental razonable; hagamos, en cambio, que esas peculiaridades trabajen a nuestro favor: utilicemos estados entrelazados (*entangled*), desarrollemos los computadores cuánticos, apliquemos la Mecánica Cuántica a la Teoría de la Información, a la Teleportación y a la Criptografía, etc.

Otra carencia de que el autor adolece parte de que la mente humana terrestre, que comprende o quiere comprender los fenómenos de la naturaleza, es, dentro del cosmos, una realidad insignificante: menos de 10^{40} átomos de materia gris (en el total de la humanidad) frente a más de 10^{80} protones

¹ El asno de Buridán es una figura medieval donde un burro acaba muriéndose ante dos montones iguales de cebada al no saber por cuál decidirse.

en el Universo. Debemos estar preparados por tanto para que la comprensión del mundo exterior incorpore muchas categorías específicamente interiores nuestras, que no tienen por qué ser cósmicas (posición próxima a la distinción kantiana entre fenómeno y noumeno), y que por ello, es lógico que la naturaleza de lo muy pequeño nos parezca muy extraña, al tener que ser comprendida a través de nuestros tamices particulares: ésta es nuestra guerra particular contra el realismo ingenuo; parte de la situación problemática es que estamos educados en lo macroscópico, y ahora queremos entender el microcosmos. Nos parece lógico, por ejemplo, la causalidad estricta, pero esa categoría probablemente está ancestralmente incrustada en nosotros, no es parte de la naturaleza exterior... Por ello debemos estar preparados a aceptar en nuestros experimentos finos, endoscópicos, que se nos desvelen aspectos de la realidad muy en contraste del, digamos, realismo ingenuo... Este punto de vista está próximo al expuesto en el reciente libro de Ramón Lapiedra [11], quien cita en ese contexto a R. Penrose [12]. Debemos salvar a toda costa, eso sí, nuestra capacidad de razonar, pues un prerrequisito de la asimilación racional de las lecciones que nos den los experimentos es que su interpretación sea lógica y no contraria a razón (en [1] se expresa un punto de vista alternativo, que *no* compartimos: dicen que hemos de cambiar (ampliar) nuestros criterios de racionalidad).

La Mecánica Cuántica es una teoría de principio (terminología de Einstein); es decir, es un condicionante para la descripción de cualesquiera fuerzas (dinámica) que aparezcan en la naturaleza; otra teoría de principio es la relatividad especial. Pero la cuántica es más negativa, sólo nos señala limitaciones y prohibiciones: no podemos precisar más allá de un cierto límite, la teoría se debe construir sin incorporar inobservables, etc.; el aspecto *positivo* de la relatividad especial es la introducción de una velocidad límite realizable, la velocidad de la luz c . El aspecto positivo de la enunciación de la teoría cuántica es la integral de camino de Feynman (ver luego), que da sentido a la nueva constante que se introduce, la constante de Planck h .

Heisenberg, Einstein y Bohr

La idea directora de Heisenberg al establecer su Mecánica de las Matrices, la primera, pero definitiva forma de la teoría cuántica moderna, es que hay que establecer la Mecánica Cuántica (el término es debido a M. Born, un poco antes) basada enteramente en relaciones entre magnitudes observables. Esto dice, literalmente, el Abstract del trabajo original, recibido el 29-VII-1925. En particular, conocemos del átomo sus líneas espectrales, pero todo intento de poner de relieve las órbitas que Bohr utiliza en la teoría cuántica antigua 1913-25 no tiene correspondiente experimental: el átomo se ionizaría al "mirarlo";

Heisenberg por ello desarrolló un cálculo con las amplitudes que aboca enseguida al álgebra no conmutativa basada en $[p, q] = h/2\pi i$, etc. Ese "positivismo" que rezuma Heisenberg, que hunde sus raíces en A. Comte, se califica a veces de instrumentalismo por algunos filósofos de la ciencia (A. Rivadulla, por ejemplo).

El primer enfrentamiento es con Einstein. Empecemos con el diálogo Einstein-Heisenberg en Berlín en 1926, cuando Einstein rechaza la incipiente interpretación de la Mecánica Cuántica (estamos todavía a un año del principio de incertidumbre o indeterminación) como elevación a categoría científica sólo de lo observable, y Heisenberg replica que él (W.H.) repite, en su rechazo de las órbitas electrónicas, el mismo argumento por el que Einstein negó la simultaneidad absoluta y abrió la escotilla para el tiempo relativo, dependiente del estado de movimiento, al sentar la relatividad especial (1905). Pero lo mejor es la respuesta de Einstein: "Es posible que yo sostuviera eso entonces, pero es una tontería de todos modos. Es la teoría quien determina qué es lo que debe ser observado". Moraleja: cuando uno es joven tiene menos prejuicios y está abierto a leer directamente de la naturaleza; al madurar, se impone ver la realidad a través de cosas preestablecidas (prejuicios adquiridos o rescatados). Es el caso de Einstein [13]: el cambio, de joven a viejo, originado por el gran esfuerzo y éxito de la relatividad general, es enorme: cuando propuso el fotón (*Lichtquantum*, 1905) buscaba incluso (aunque por muy poco tiempo) una interpretación corpuscular de las interferencias (mucha otra gente intentó eso en el decenio 1910-1920, entre otros L. de Broglie); pero luego se impuso la ontología del campo (más que la de la onda), y nunca jamás habló A.E. de gravitones, pero sí de ondas gravitacionales; es opinión del propio Einstein que él abandonó el "positivismo" (el artículo sobre el fotón (1905) empieza: "Sobre un punto de vista heurístico...") tras el éxito del Relatividad General, y abjuró de muchas cosas que de joven había mantenido (como la irrelevancia de las Matemáticas, por ejemplo; o la admiración por E. Mach): así pasó a ser el último de los físicos clásicos, más bien que el hereje revolucionario, como empezó [14]; esto no empequeñece su obra, y lo seguimos considerando, con el consenso de la mayoría, el mayor genio del siglo XX. Resumen: Einstein, con más de cuarenta años, no aceptó la filosofía subyacente a la mecánica cuántica por tener él ya su propia filosofía, en concreto determinista y realista, que además de serle congenial se veía reforzada por su construcción de la relatividad general, donde domina la idea de campo, experimentable, continuo, causal, determinista y local, y era por tanto contraria a la filosofía propugnada por la teoría cuántica (acausal, indeterminista y no local ni realista).

El caso de Bohr es distinto (el lector debe saber que el autor de este artículo *tiene una manía* especial en contra

de Bohr. Véase [9]). Bohr era, esencialmente, un *químico metido a filósofo*, que recurrió a una imagen explícitamente contradictoria del mundo al no poder superar la paradoja onda-corpúsculo (el filósofo Karl Popper vio eso muy claro [16]); el escudo de armas que eligió N.B. refleja sus contradicciones internas (*Contraria sunt complementa*, el Ying-Yang); Bohr [17] renunció a entender (“hemos de comprender que no hay nada que comprender”), cuando los experimentos de Compton (1922) apoyaron inequívocamente la naturaleza corpuscular de la luz, que para él era absolutamente inaceptable, como para Einstein el indeterminismo; Niels Bohr es el único físico teórico de la historia que rechaza explícitamente las matemáticas (su hermano Harald fue un notable matemático; ¿recurrirnos a Freud?) Si bien Einstein permanece apartado del desarrollo cronológico de la teoría cuántica, Bohr, autocalificado de pontífice, influyó decisivamente en que Heisenberg agachara la cabeza y “abjurase”, admitiendo la imagen ondulatoria, como se nota leyendo el artículo sobre el principio de incertidumbre (1927); uno de los pocos autores que se da cuenta de la tozudez y presión malsanas de Bohr es Lindley [18]; otros físicos, más independientes, sencillamente ignoraron la posición de Bohr (no hay mención alguna del principio de complementariedad ni en el texto de Dirac, ni en el de Landau; Wigner hizo caso omiso cuando lo escuchó en Bruselas en Octubre de 1927). El poder convincente de Bohr es increíble; llegó incluso a “ganar batallas después de muerto”, como El Cid: en la interpretación moderna de los experimentos de la doble rendija, se sigue hablando de que el fotón, cuando muestra interferencias, es una onda, pero cuando se sabe, en virtud de selección experimental, por cuál camino va, y por lo tanto exhibe sólo difracción, es una partícula, todo ello como ejemplo del principio de complementariedad (dualidad partícula-onda). Ello es particularmente desafortunado, pues el fotón (o el electrón) es siempre una partícula, por supuesto cuántica...y la difracción es tan “ondulatoria” como las interferencias..., consecuencia de la no preferencia entre los caminos posibles. Gell-Mann se atreve ya a decir que “Bohr ha lavado el cerebro a toda una generación” [de físicos] [9].

Afirmaciones filosóficas de la Teoría Cuántica

Las cuestiones en que la mecánica cuántica se aparta del realismo ingenuo, digamos, y que parecen paradójicas, son muchas, así que entresacamos unas cuantas, sin compromiso de completitud: *No hay una causalidad estricta*, pero sí una cierta causalidad (la dirección y el momento de la emisión de una partícula alfa por un núcleo inestable no están determinados, pero sí la vida media: un gramo de radio decae a

medio en 1500 años). *No hay determinismo* (las “órbitas” que el electrón describe en el átomo son inexistentes, pero hay electrones sujetos al átomo por fuerzas eléctricas y los niveles de energía se calculan a partir del planteamiento clásico del problema (Hamiltoniano)). La componente del espín del átomo de plata en el experimento de Stern-Gerlach (1922) no está predeterminada, pero la medida da solo proyecciones máximas, $\pm 1/2$ (ese resultado fue un rompecabezas en la cuántica antigua, anticipando que una medida produce sólo el autovalor del observable). Los sistemas cuánticos extensos pueden aparecer como un todo, de modo que una medida en un extremo local presupone el resultado de la medida en otro, espacialmente separado: hay *inseparabilidad (wholeness)* del sistema. Algunas propiedades predicables de un sistema no están objetivamente determinadas hasta que no se miden, y entonces el resultado puede ser aleatorio: hay una *relajación del realismo objetivo*.

Es interesante señalar que la desintegración radiactiva (Rutherford, 1902) y el salto del electrón de “órbita a órbita” con emisión de luz (Bohr, 1913) son *puzzles* de la teoría cuántica (del atomismo, diríamos) puestas de relieve *ya antes de la cuántica moderna*, y como tales ya fueron advertidas en su momento: Einstein se dio cuenta del carácter no causal de la caída radiactiva, lo que le produjo cierto malestar (*Unbehagen*) [8], y Rutherford preguntó a Bohr cómo demonios sabía el electrón cuándo y dónde debe caer; Einstein se atormentó por esa cuestión toda su vida (llegó a hablar del *libre albedrío* del electrón). Aquí nos interesa resaltar que bajo una concepción atomista del mundo, y con la posibilidad de estados excitados de la materia, la *causalidad estricta es imposible*: la partícula alfa tiene que emitirse, y salga por donde salga se rompe la simetría: el proceso ya no será causal estricto; la coexistencia del atomismo con la simetría rotacional implica la rotura espontánea de ésta. La combinación de un positivismo sensato y del atomismo democriteo trae como inevitable consecuencia la relajación de la causalidad estricta; ojalá las otras paradojas cuánticas se resuelvan de la misma manera. Esta es, creemos, la *lección a aprender*: entender la lógica de la teoría cuántica, para que lo que parece *paradójico* a un Einstein, por ejemplo, a nosotros nos parezca *inevitable*.

Veamos ahora en detalle *el caso del realismo*, que aun causó más quebraderos de cabeza a Einstein: el realismo (extremo) dice que hay una realidad tangible ajena al observador, que es objetiva, y que el observador sólo va descubriendo, pero que era preexistente al experimento; intentemos poner esto a prueba experimental: dos electrones (o fotones) entrelazados (*entangled*), es decir, formando parte de UN sistema, por ejemplo con espín total cero, NO tienen la dirección de su espín fijada ANTES de que se mida, como se comprueba detectando con un Stern-Gerlach la dirección de uno sólo: es al azar. Pero si detectamos la dirección del espín de uno de ellos, predecimos

la dirección del otro, cuya medida ya no es probabilística sino cierta, a pesar de poder estar espacialmente separado: aquí Einstein hablaba de acción a distancia fantasmal (*spukhafte Fernwirkung*), cuando lo que “pasa” es que la interpretación correcta es NO realista: ANTES de la medida no hay una “cosa” objetiva en cierta dirección, pero la medida sobre un electrón canaliza, conceptual pero no físicamente, la dirección del espín del otro. Admitamos, con Einstein, que el carácter no-realista de la teoría cuántica es más *atragantante* que el carácter acausal; pero los resultados experimentales son inequívocos, y es de esperar, como ha pasado con el indeterminismo, que generaciones futuras vean el realismo mitigado que propone la cuántica actual ser de algún modo también *inevitable*. Lo que comentamos aquí ha sido el origen de las *desigualdades de Bell* (1964), correlaciones no clásicas, quizás (con la integral de camino de Feynman) las únicas aportaciones al formalismo cuántico dignas de mención, desde el periodo fundacional 1925-1928; ni que decir tiene que han sido comprobadas *ad nauseam*, incluso se ha cerrado el “agujero” (*loophole*) de la deficiencia de los detectores [4], [4^B]. Incidentalmente Popper, a quien seguimos en su crítica a Bohr, acepta de buena fe el indeterminismo, incluso lo ensalza, pero se aferra a un realismo a ultranza (cuyas raíces él establece ¡debido a que ocurrió lo de Hiroshima!), e interpreta los experimentos de Aspect como debidos a acción a distancia (inaceptable); mi lectura es que ni siquiera Popper está libre de prejuicios, y su realismo preconcebido es incompatible con las lecciones de la naturaleza.

Conclusión primera: una filosofía que defienda la causalidad estricta (“todo efecto se sigue de una causa”) hay que rechazarla para explicar ciertos fenómenos atómicos, y por tanto deja de tener validez universal; pues la desintegración radiactiva es al azar, y por ello impredecible conspicuamente *en el tiempo*.

Conclusión segunda: la doctrina filosófica que asegura que hay un determinismo absoluto deja de ser válida (cualquiera que sea su aparente validez en otros dominios) en la desintegración radiactiva, pues la *dirección de emisión en el espacio* no está predeterminada (los mismos experimentos).

Conclusión tercera: la posición filosófica que afirma que existe un mundo real y objetivo, anterior e independiente de nuestra observación, es *incompatible* con ciertos resultados incontrovertibles obtenidos de experimentos llevados a cabo con partículas entrelazadas (*entangled*): pues los componentes del espín de dos partículas de espín $\neq 0$ en un estado de espín total = 0 NO tienen una realidad objetiva ANTES que se localice una de ellas, sino que es el sistema extenso el *verdadero ente objetivo único*, y por ello la detección de la dirección del espín de una de ellas determina automáticamente el resultado sobre la detección de la dirección del espín de la otra. La misma conclusión

se sigue en el experimento de las dos rendijas: no es que el fotón (o el electrón) vaya por las dos rendijas a la vez, sino que su trayectoria no es un elemento de la realidad del fenómeno: y si disponemos de información sobre la trayectoria, la figura de interferencia desaparece; hoy día hay decenas de experimentos corroborando eso mismo; volveremos sobre esto luego, al discutir la integral de caminos [12^B].

Conclusión cuarta: los sistemas cuánticos presentan una unidad-identidad que no es local, sino extensa; por ello, deja de tener sentido lo que Einstein llama “Extrañas acciones a distancia” (Mermin [19]). Los experimentos de elección retardada (*delayed choice*) apoyan esta paradójica situación sin duda alguna [5]: hay una “totalidad” (*wholeness*) espacio-temporal.

En la ref. [22] puede verse cómo la filosofía que rezuma de la obra de W. Pauli tiene muchos puntos de contacto con lo aquí expuesto, aunque en general Pauli es más bien parco en sus adhesiones a filosofías concretas.

Indiscernibilidad

Una buena teoría, una vez fijada, hace predicciones; vamos a ver si otros experimentos (posteriores o anteriores) confirman esas elecciones filosóficas, de modo que la posición científica tiene poder pre y postdictivo; nos fijaremos en dos aspectos de la realidad cuántica: la estadística de partículas idénticas y la integral de caminos de Feynman.

Ante todo, la identidad de partículas viene, de nuevo, posibilitada por el atomismo democriteo: el atomismo implica que hay un número *finito* de parámetros para determinar completamente la ontología (NO la posición espacio-temporal) de un sistema atómico. Por ejemplo, un electrón es completamente descriptible *como sistema* por su masa, su carga eléctrica y el valor de $\frac{1}{2}$ para su espín. La excusa de las “variables ocultas” (Einstein; de Broglie; D. Bohm) es un recurso numantino para NO aceptar el atomismo, como decir que hay “subvariables” en el electrón, etc. Ya Leibniz se preocupó de las consecuencias físicas de la identidad de las cosas; pero es sólo la teoría cuántica, entendemos, quien da el paso, con consecuencias físicas, de la *identidad* a la *indiscernibilidad*: si tenemos tres electrones, la teoría de la colectividad debe edificarse de modo que NUNCA, en la construcción teórica, pueda decirse de qué electrón se trata entre los tres: el “fijar” el sistema debe responder a la pregunta de cuantos electrones hay en un estado definido, y no cuáles son: ésta fue la idea directriz de Heisenberg y de Dirac, independientemente, en 1926, cuando inventaron las estadísticas cuánticas en el marco de la (nueva) mecánica cuántica. Hay aquí una postdicción: *estados* cuánticos *diferentes* son compatibles con observaciones sobre partí-

culas idénticas, por ejemplo superposiciones simétricas o antisimétricas, y de hecho Bose inventó la estadística de partículas de *spin* entero (1924), Pauli encontró empíricamente el principio de exclusión (Enero 1925) y Fermi estableció la estadística de fermiones (1926) aun ANTES de la Mecánica Cuántica definitiva (históricamente, Fermi protestó a Dirac que no mencionase su trabajo cuando el segundo estableció la estadística cuántica (Fermi-Dirac) para electrones). En una reciente conferencia en Trieste (Octubre 2008) se discutieron experimentos sobre la validez de la relación espín-estadística: todo está en orden, según parece. Un aspecto sobre el que queremos llamar la atención es la ductibilidad del formalismo cuántico: el principio de inobservabilidad de indiscernibles tiene *más de un modo* de implementarse, a saber, las estadísticas tradicionales Bose-Einstein (BE) y Fermi-Dirac (FD), además de las paraestadísticas, experimentalmente excluidas, según parece. De hecho, el vector-estado $|\psi\rangle$ (¡no el estado!) de un sistema de N partículas idénticas debe transformarse, bajo permutación, con una representación del grupo simétrico, y hay tantas de ellas como clases del grupo S_N (o particiones del número N), en particular sólo dos unidimensionales, las convencionales BE o FD.

En nuestra opinión, la estadística cuántica es una consecuencia de la filosofía “observacional” de la teoría cuántica (no tanto el teorema espín-estadística: éste depende de la dimensión (!) del espacio-tiempo; [20]); de nuevo se comprueba el *dictum* de Feynman: si las partículas son idénticas, es que son indiscernibles, y por lo tanto la teoría debe construirse de modo que NO tenga respuesta la pregunta ¿de qué partícula individual se trata?

La Integral de Camino

El físico americano Richard Feynman, a pesar de su pragmático *approach* a la ciencia, su excesivo *ego* personal, y su desprecio de la filosofía (compartido, por cierto, por otro gran americano, S. Weinberg), hizo una contribución fundamental: creemos que la mecánica cuántica del futuro se enseñará empezando por la integral de camino, que Feynman inventó en su Tesis Doctoral (1942); la integral de camino es, en nuestra opinión, la aportación más notable al formalismo de la mecánica cuántica desde su invención en 1925-27: el hecho de que Niels Bohr la rechazase aumenta, en mi opinión, su importancia. Por supuesto, las matemáticas de la integral de camino son oscuras y deben axiomatizarse, como ha pasado con tantas “novedades” matemáticas que ha introducido la física (la delta de Dirac, por ejemplo); no es que la *path integral* sea completamente novedosa, fue de hecho *deducida* por Feynman de consideraciones anteriores de Dirac (sobre el papel del lagrangiano, y por tanto de la acción, en la teoría cuántica), pero

varias eminencias (Wheeler, Dyson, hasta Gell-Mann) la proponen al principio, no como una consecuencia, de la formulación a presentar hoy día de la Mecánica Cuántica, punto de vista que compartimos nosotros, pero que (¿aún?) no está universalmente admitido.

¿De qué se trata? Si un neutrón se genera aquí (A) y se detecta allá (B), eso son las cosas observables: por lo tanto, *la teoría debe construirse de modo que NUNCA se responda a la pregunta por cuál camino ha ido la partícula entre A y B*; esto es lo que dice Feynman explícitamente. Hay, además, democracia: todos los caminos tienen, por sí mismos, igual probabilidad. La presencia del neutrón en B (y no en otro sitio) es probabilística, y el formalismo cuántico (que aquí aceptamos sin más, sin quererlo justificar pero haciéndolo verosímil) dice que la amplitud del camino γ , denotada por $z(\gamma)$, con $|z|$ constante (e.g. = 1), debe por ello ser una fase $\exp[i\phi]$ y sumar la contribución para todos los caminos entre A y B; esa fase viene dada por la acción clásica; de manera que la amplitud de llegada al punto B es

$$\text{Amp}(B) = \int_{\gamma} \exp[iS(\gamma)/\hbar] \cdot D\gamma$$

donde el borde $\partial\gamma = \{B, A\}$ es fijo. Es precioso ver cómo los números complejos dan el juego justo para admitir igual probabilidad por camino ($|z(\gamma)|=1$), pero su contribución a la presencia en el punto final se “pesa” por una fase $\phi(\gamma)$ que depende de la acción clásica módulo \hbar ; un ejemplo más de la “versatilidad” de las matemáticas para adaptarse a las realidades de la física (Wigner). Por supuesto, la probabilidad es el cuadrado del módulo de la amplitud.

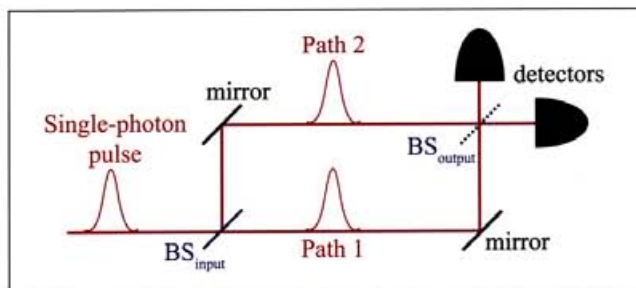


Figura 1. Experimento de elección retardada (propuesto por Wheeler). Se trata de un interferómetro de Mach-Zehnder alimentado con fotones de uno en uno; el divisor de haz BS_2 se puede poner o quitar a voluntad; sin él, los detectores D_1 y D_2 captan fotones por igual (50-50), ya que el primer divisor BS_1 actúa siempre. Con el divisor BS_2 puesto, hay interferencia, y los dos detectores capturan dependiendo de la diferencia de fase ϕ de los caminos, que también se puede modificar a voluntad intercalando (e.g. en el brazo horizontal superior) un retardador (no mostrado en la figura). La decisión de poner o quitar el divisor BS_2 se hace aleatoriamente (con un generador de números aleatorios) después que el fotón ha cruzado el divisor BS_1 (en esto consiste el *delayed choice*). La distancia entre los divisores es de 48 metros, con lo que hay tiempo suficiente.

Esto “explica” muy bien el experimento de las dos rendijas: el fotón (¡o el neutrón!) “olfatea” los dos caminos por una rendija y la otra hasta el lugar B de la pantalla, o como preferimos decir, explora *virtualmente* todos los caminos; la virtualidad aristotélica (que Heisenberg defendió en otro contexto) o la propensión popperiana son posibles modelos por hacer aceptable lo que clásicamente no lo es; se habla también de la *potentia* aristotélica.

La integral de camino de Feynman tiene otra ventaja: por fin entendemos el significado de la constante de Planck, que está oscuro, tanto en la formulación matricial como en la ondulatoria; ahora vemos que h significa que el “peso” adimensional del camino γ es el de más arriba, la fase del mismo, o sea la acción en unidades del cuanto de acción $\hbar (= h/2\pi)$ qué otra cosa se esperaría, existiendo desde 1900 el cuanto de acción? Muchos físicos realistas se “atascan” ante la frase “exploración virtual de todos los caminos” (por ejemplo, Emilio Santos), pero no vemos otra forma de expresar la implementación de la inobservabilidad de un camino concreto: yo diría que es un concepto *emergente*, inútil de retrotraer a la mentalidad y a la filosofía clásicas, por lo que supone de disminución ontológica (“las carencias de la realidad”, de que habla Lapiedra [11]) del significado del camino de la partícula.

Conclusiones

Es hora de concluir. El abordar con un bagaje filosófico concreto preconcebido los problemas interpretativos del mundo físico atómico es improcedente, puesto que nuestra experiencia, el lenguaje etc., se han forjado en lo macrocópico, muy diferente: en particular, continuidad y causalidad estricta. Pero debe ser la naturaleza, adecuadamente interrogada, quien nos diga qué prejuicios sobreviven y cuáles hemos de eliminar: esto está muy cerca de la filosofía positivista de Mach y del “Círculo de Viena” (*Wienerkreis*). La filosofía que soporta la mecánica cuántica relaja la causalidad, él determinismo y el realismo “ingenuos”. Es positivista, pero no reniega de constructos teóricos; no es sólo un recetario, sus fórmulas se siguen de un formalismo donde sus elementos tienen un contraste experimental objetivo; tampoco renuncia a entes no observacionales en su construcción formal, con tal de que NO aparezcan como posibles observables.

Para terminar, queremos resaltar uno de los últimos experimentos [5] del grupo de Alain Aspect, que ha sido destacado por la Revista *Science* recientemente (2007). Lo indicamos aquí en las Figuras 1 y 2, tomadas de dicho trabajo (Figuras 1 y 3 del mismo).

La aportación de los experimentos *delayed choice* (el que exponemos no es el único, desde luego) es que se presenta una situación no-realista en lo que se refiere al *tiempo*:

nótese que la decisión sobre cuál de los caminos (*welcher Weg*) se toma *después* que el fotón ha entrado en el aparato; fue una bonita aportación del recientemente fallecido John Wheeler proponer (1978) semejante “diabólico” experimento.

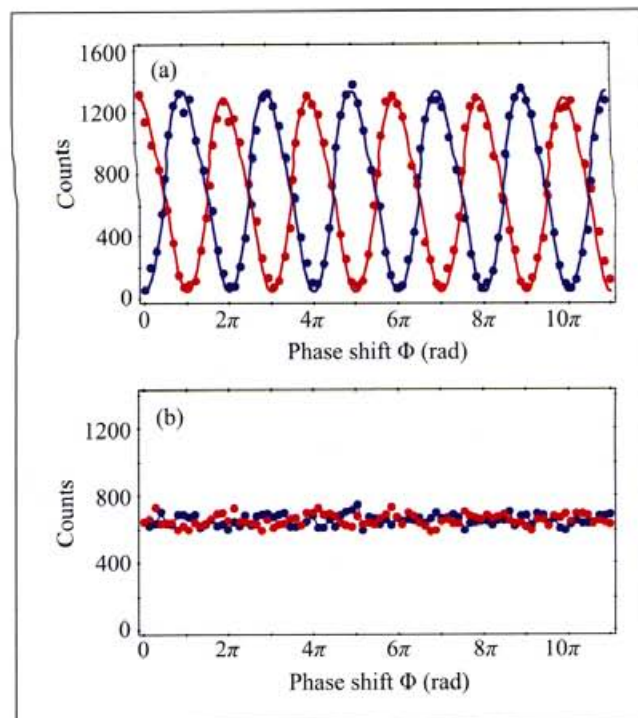


Figura 2. Resultados del experimento de elección retardada. Se varía el desfase ϕ ; cada punto tiene un tiempo de adquisición de 1.9 segundos, que corresponde a unos 2600 fotones; la cuenta de D_1 va en azul, la D_2 en rojo.

a) Interferencia con fase variable: existe el segundo divisor, y se incorpora un desfase z a voluntad; para $z = 0$, todos los fotones van a D_1 .
 b) no hay segundo divisor, y no hay interferencia: los dos detectores captan, estadísticamente, la misma intensidad. Para más detalles ver Figs. 1, 2 y 3 en el trabajo original [5].

Los resultados de ese fino y reciente experimento confirman completamente lo predicho por la teoría cuántica y ponen por tanto de relieve las mitigaciones sobre causalidad, determinismo y realismo que hemos destacado a lo largo de nuestra exposición como inherentes al formalismo, muy plausible por otra parte, de la Mecánica Cuántica actual. Creemos que de todo esto *emerge una particular filosofía de la teoría*, muy consistente, en que los enunciados convencionales de causalidad, determinismo, realismo y localidad no desaparecen, pero sí se mitigan claramente; parte de los nuevos enunciados filosóficos nos parecen ya inevitables, y esperamos que cuando profundicemos aun más, así se nos aparecerán también los demás.

Esencialmente, pensamos que falta por entender, más intuitivamente, por qué en la naturaleza atómica impera un realismo mitigado.

Al final del día, lo que nos resta por hacer es deducir nuestras aprehensiones clásicas de las cuánticas; es decir, estudiar el límite clásico de nuestras teorías microscópicas: el mundo macroscópico debe entenderse, desde luego, a través de la realidad de los átomos, es decir, del mundo microscópico, que es cuántico (de nuevo, Bohr propalaba justo lo contrario); un buen inicio en ese sentido (estudiar cómo se origina la “decoherencia”) es la reciente revisión de Zurek [21].

Agradecimientos

El manuscrito ha sido leído críticamente por J. Casahorrán, M. Asorey y J.M. Gracia-Bondía, a los cuales el autor queda muy agradecido; la versión definitiva se ha enriquecido además con comentarios de A. Rivadulla, A. Azcárraga, E. Santos y J.L. Sánchez-Gómez, quienes tienen todo nuestro reconocimiento. Sin que eso suponga, desde luego, el asentimiento de todos ellos con las afirmaciones aquí defendidas.

Referencias bibliográficas

- [1] FERRERO, MIGUEL, SANCHEZ-GÓMEZ, JOSÉ L. Y SALGADO, DAVID., *Física cuántica y orden racional*, Rev. Iberoam. Fis., **3**, 11 (Julio 2007).
- [2] GARCÍA-ALCAINE, GUILLERMO, Y ALVAREZ-GALINDO, GABRIEL, *Localidad einsteniana y mecánica cuántica*, Rev. Esp. Fis. **19**, 43 (2005).
- [3] VAN KAMPEN, N.G., *The Scandal of Quantum Mechanics*, Am. J. Phys. **76**, 989 (2008) (letter).
- [4] ROWE, M.A., et al. *Experimental violation of a Bell's inequality with efficient detection*, Nature **409**, 791, (15-II-2001).
- [4^B] EMILIO SANTOS (U. de Cantabria) insiste convincentemente en que los numerosos *loopholes* de este tipo de experimentos no están experimentalmente cerrados del todo. Véase su trabajo arXiv:0706.3445 (23-VI-07). Com. Pers., Dic., 2008).
- [5] ASPECT, A., et al., *Experimental realization of Wheeler's delayed-choice GedankenExperiment*, arXiv:quant-ph/0610241 [Science **315**, 166 (2007)].
- [6] KIM, YOON-HO, et al. *Delayed "Choice" Quantum Eraser*, Phys. Rev. Lett. **84**, 1 (2000).
- [7] ASPECT, A., GRANGIER, P. Y ROGER, C., *Experimental Realization of the Einstein-Podolski-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: a new violation of Bell's inequalities*, Phys. Rev. Lett. **49**, 91-94 (1982).
- [8] PAIS, ABRAHAM, *El Señor es sutil* (biografía científica de A. Einstein). Ariel, Barcelona 1982 (eng. ed. Oxford UP, 1979).
- [9] BOYA, LUIS J., *Rejection of the Lighth Quantum: The Dark Side of N. Bohr*, Int. J. Theor. Phys. **42**, 2563-2575 (2003). arXiv: physics/0212090.
- [10] CIRAC, IGNACIO, comunicación personal (MPI Munich, mayo 2004).
- [11] LAPIEDRA, RAMÓN, *Las carencias de la realidad*. Tusquets, Barcelona 2008 (trad. del catalán, Universitat de València 2004).
- [12] PENROSE, R., *The Emperor's new mind*. Oxford U.P., 1990.
- [12^B] Por la influencia nefasta de N. Bohr, creemos, muchos físicos aun hoy día interpretan la marcha por la doble rendija como ejemplo de la dualidad onda-corpúsculo, afirmando que el electrón, *como onda*, pasa por las dos rendijas a la vez.
- [13] ESTUDIOS sobre la relación de Einstein con la teoría cuántica moderna hay legión, aparte de [8]; uno, particularmente iluminativo, que rectifica muchas aprehensiones erróneas, es el libro de Arthur Fine, *The Shaky Game*: [U. Chicago Press, 1996].
- [14] NAVARRO, LUIS, *Einstein, profeta y hereje*. Tusquets, Barcelona 1990.
- [15] También hay innumerables trabajos sobre Niels Bohr; un buen estudio de su filosofía está en Dugald Murdoch, *Niels Bohr's Philosophy of Physics*, Cambridge U.P. 1987.
- [16] POPPER, KARL, *Quantum Theory and the Schism in Physics*. Francis and Taylor, 1982. Trad. esp. *Teoría Cuántica y el Cisma en Física*, Tecnos, Madrid 1985.
- [17] PAIS, ABRAHAM, *Niels Bohr Times*. Oxford U.P., 1991.
- [18] LINDLEY, DAVID, *Incertidumbre*; Ariel, Barcelona 2008 (orig. eng., Doubleday, N.Y. 2007).
- [19] MERMIN, DAVID, *Is the moon there when nobody looks?*, Physics Today **38**, 38 (IV-1985).
- [20] BOYA, LUIS J. Y SUDARSHAN, E.C.G., *The Spin-Statistics Theorem in Arbitrary Dimension*, Int. J. Theor. Phys. **46**, 3285-93 (2007).
- [21] ZUREK, WOJCIECH H., *Decoherence, einselection, and the quantum origin of the classical*, Rev. Mod. Phys. **75**, 715-775 (2003).
- [22] JORDAN, PASCUAL, *My recollections of Wolfgang Pauli*, Am. J. Phys. **43**, 205-208 (1975) (trad. del original alemán de 1971).