

¿Acerca de qué habla la mecánica cuántica?

Federico Holik

IAFE-UBA

holik@iafe.uba.ar

Resumen

En este trabajo exploramos la posibilidad de explotar el método de trabajo esbozado en las *Investigaciones Filosóficas* para aclarar problemas de interpretación en mecánica cuántica. Partimos de la crítica de Bell al concepto de medición en cuántica, y a través de la investigación de su significado de acuerdo al uso, buscamos nuevos conceptos en camino de abandonar la aplicación de los términos medición y sistema en la mecánica cuántica.

1. Introducción

El hecho de que conceptos clásicos como los de individualidad, posición, velocidad, partícula, que fueron tan exitosos en sus aplicaciones a la mecánica clásica entren en crisis cuando se los intenta incorporar a la mecánica cuántica, podría ser explicado de la siguiente forma. Si aceptamos que el significado de las palabras y conceptos está dado de acuerdo al uso, y que ese uso está ligado a un determinado contexto socio-histórico, es decir, a una determinada praxis, debemos admitir como posibilidad que, debido al carácter cambiante de las sociedades, el consecuente cambio en las prácticas implique la necesidad de modificar o abandonar viejos conceptos. En el caso particular de la física del período comprendido entre fines del siglo XIX a principios del siglo XX, diversos factores influyeron en el desarrollo del estudio de fenómenos que ocurren a escalas cada vez más pequeñas. Así la física se vio inundada por el estudio de los procesos atómicos. Y rápidamente, los físicos se encontraron con un microcosmos que se mostraba probabilístico antes que determinístico; que presentaba un carácter discreto, en contraposición a la continuidad reinante en el macrocosmos; los experimentos “gedanken” se volvían cotidianos frente a la imposibilidad de acceder en forma directa a los procesos atómicos. Frente a esta nueva praxis, muchos conceptos, como el de trayectoria clásica, se mostraron inapropiados. Otros, como el de medición u observable, fueron tibiamente resignificados, dando lugar a famosos problemas interpretacionales. Pensamos que algunos elementos señalados en las *Investigaciones Filosóficas* (Wittgenstein 1999) podrían ser útiles para elucidar problemas de interpretación en mecánica cuántica. Esto se debe a que el análisis wittgensteiniano estudia justamente la relación entre el significado, el uso de los conceptos y la adecuación de su aplicación.

2. La medición, ejemplo paradigmático

En un artículo titulado “Contra la medición” (Bell 1990), el físico J. Bell critica el uso de este concepto en las reglas interpretativas fundamentales de la mecánica cuántica. En un pasaje de este artículo señala:

“En otros contextos, los físicos fueron capaces de tomar palabras de nuestro lenguaje cotidiano y usarlas como términos técnicos sin hacer gran daño. Tomemos como ejemplo, la ‘extrañeza’, el ‘encanto’ y la ‘belleza’ de la física de partículas elementales. Nadie se confundió con este ‘hablar ingenuo’. Podría haber sido así con ‘medición’. Pero de hecho la palabra ha tenido un efecto tan dañino en la discusión, que creo que debería ser completamente desterrada de la mecánica cuántica.” (Bell 1990)

Los cargos que Bell le atribuye a la inclusión de la palabra ‘medición’ en los axiomas de la mecánica cuántica son, por un lado, que ancla allí la división del mundo entre sistema y aparato. Por otro lado, sostiene que la palabra “viene cargada con significado de nuestra experiencia cotidiana, significado que es completamente inapropiado en el contexto cuántico”. Continúa afirmando que cuando se dice que algo es medido, “es difícil no pensar el resultado como refiriéndose a una propiedad preexistente del objeto en cuestión”, operación que como sabemos, está prohibida por los “*no go theorems*” (Mittelstaedt 1998).

Teniendo en cuenta estas observaciones de Bell, vale la pena preguntarse ¿no estamos aquí frente a un problema originado en el uso inadecuado del lenguaje, de acuerdo a la definición wittgensteniana de “problema filosófico”? Si así fuera, ¿cuál sería el procedimiento propuesto por este pensador para enfrentarlo? Creemos que sería razonable obrar de la siguiente forma. En primer lugar, deberíamos rastrear cuál es el significado (adquirido de acuerdo al uso) de la palabra ‘medición’ en la mecánica clásica, con el objeto de determinar los prejuicios ocultos que el concepto lleva arraigados. Posteriormente, determinar a qué usos se refieren los físicos cuando usan esta palabra en el contexto de la mecánica cuántica. Una vez hecho esto, buscar un nuevo concepto ligado a la praxis de la medición cuántica, que se encuentre desprovisto de la carga de prejuicios clásicos que posee la palabra ‘medición’, evitando así los efectos perniciosos de su uso en la fundamentación de la mecánica cuántica.

3. Nuevos conceptos

La mecánica clásica se encuentra inmersa en un universo conceptual que versa acerca de objetos, los cuales existen en el espacio y en el tiempo. Partículas que poseen identidad, objetos con propiedades. De este modo, se asume que, independientemente de que el sistema sea medido o no, las preguntas que se pueden hacer sobre el sistema tienen un resultado definido de antemano: “el sistema tiene tal propiedad o no la tiene” (Aerts 1981).

Hay que agregar también que, detrás de la concepción clásica del proceso de medición, se encuentra la idea de un determinismo que abarca a todos los procesos físicos, y por lo tanto, de que estas propiedades preexistentes en el sistema determinan el resultado de las mediciones a realizar. Por ello, la medición clásica razonablemente asume que el resultado se corresponde unívocamente con una propiedad preexistente en el sistema. Además, se presupone que el proceso de medición puede ser llevado a cabo de forma tal de no alterar, al menos en principio, las propiedades del objeto a medir. De este modo tenemos el

“sistema clásico”, como una porción del mundo aislada del resto para nuestro estudio, para “conocer” sus propiedades realizando mediciones sobre ella.

Vemos entonces que la medición clásica presupone que se está lidiando con sistemas, que además los resultados de la medición reflejan propiedades de esos sistemas, que estas propiedades son las que determinan los resultados de las distintas magnitudes que se elige medir sin ser influenciadas por esta elección, y que, en principio, es posible llevar a cabo el proceso de medición sin modificar apreciablemente el objeto que se está midiendo. Podríamos definir al proceso de medición clásico como un proceso de interacción particular que cumple con estos requisitos, y que arroja como resultado información acerca de las variables del sistema que son de interés para el observador.

Pero es bien sabido que cada uno de estos presupuestos ha llevado a problemas de consistencia cuando fue extrapolado al dominio de la mecánica cuántica. La idea de determinismo, las nociones de propiedad y de objeto, la hipótesis de “observar sin perturbar”, fueron fuertemente sacudidas con el advenimiento de esta teoría. La crisis de estos presupuestos es la que lleva a que la palabra ‘medición’ deba ser interpretada en un sentido totalmente diferente al clásico. Ahora bien: ¿a qué se refiere exactamente un físico cuando habla de medición en el contexto de la mecánica cuántica?

Analicemos la siguiente frase, que es común encontrar en muchos textos de mecánica cuántica (*cf.*, por ejemplo, Ballentine 1990):

“El resultado de la medición de un determinado observable sólo puede ser alguno de los autovalores del operador correspondiente a ese observable”

Como muchos autores señalaron, entre ellos Niels Bohr, esta frase debe ser interpretada en la práctica como el resultado de una experiencia que transcurre en un laboratorio macroscópico, con aparatos de medición macroscópicos, los cuales interactúan con el sistema cuántico a estudiar, al cual sólo se puede acceder en forma indirecta. De esta forma, el resultado de la medición (la lectura de la aguja del aparato) dará como resultado uno de los autovalores del operador que corresponde a dicho observable. Pero las condiciones en las que ocurre este proceso “cuántico” de medición se alejan radicalmente de las condiciones que señalamos arriba para la medición clásica. Tratemos de sacar a luz cuáles son los presupuestos en este caso.

Lo primero a resaltar es que los resultados del proceso devienen finalmente en la lectura de la aguja de un aparato que necesariamente debe ser considerado macroscópico, de forma tal que pueda ser apreciado por nuestros sentidos. Por supuesto que es posible detenerse en este nivel y adoptar una postura instrumentalista, predicando solamente acerca de las posiciones de la aguja. Pero es claro que esta posición no presenta ningún problema interpretacional, porque en el fondo *no dice nada*. La experiencia ha demostrado que si no se hacen hipótesis adicionales acerca de un “objeto de estudio” que vaya más allá de las posiciones de la aguja del aparato, la mecánica cuántica pierde todo sentido de utilidad, incluso los dispositivos experimentales carecerían de sentido (¿no podrían siquiera ser diseñados!). Es por ello que la mayor parte de las interpretaciones suponen la existencia de alguna suerte de “entidad”, a la que sólo se puede acceder en forma indirecta, y que en general se condensa en el concepto de “sistema cuántico”. De este modo se produce una separación conceptual entre un laboratorio macroscópico y un sistema cuántico sobre el cual no hay acuerdo acerca de su estatus ontológico. De hecho, las discusiones más fuertes

se centran en torno a la pregunta: ¿de qué estamos realmente hablando cuando nos referimos a un sistema cuántico? La mecánica cuántica se convierte así en una teoría que permite hacer afirmaciones sobre dos conceptos: por un lado, prediciendo probabilidades sobre la aguja del aparato y, por otro, predicando acerca de lo que un sistema cuántico puede ser y lo que no (¿partícula?, ¿onda?). Si además tenemos en cuenta que (*cfr.* Mittelstaedt 1998):

“El resultado de una medición no puede ser atribuido a una propiedad perteneciente al sistema antes de que la medición fuera realizada”

Vemos entonces que el uso de la palabra ‘medición’ conlleva en cuántica un significado muy diferente al de su uso en mecánica clásica, ya que la mecánica cuántica viola los presupuestos que este concepto hereda de su significado histórico. Teniendo en cuenta lo discutido hasta aquí, parece razonable abandonar el concepto clásico de medición y buscar un nuevo concepto que lo reemplace. Lo mismo vale para el concepto clásico de sistema, que es inherente al concepto clásico de medición. Los conceptos son construcciones humanas, históricas, y por lo tanto no son inmutables. Los conceptos clásicos de sistema y medición se mostraron útiles en muchas aplicaciones, pero no son adecuados para la mecánica cuántica. Estos conceptos deberían ser resignificados (o abandonados).

4. ¿Cómo enfrentar el problema?

¿Qué sugerencia podemos extraer de la lectura de las *Investigaciones Filosóficas*? Una alternativa posible sería explotar la idea de significado de acuerdo al uso. Esto es, establecer el significado de las nociones de ‘sistema cuántico’ y ‘medición’ a partir de la praxis. Con respecto a la noción de ‘medición’, seguiremos la sugerencia de Bell, de reemplazarla por ‘experimento’ (Bell 1990), ya que esta última no está necesariamente cargada de los prejuicios clásicos.

¿Cuál es el contenido que le damos a estos significantes en el juego de lenguaje de la mecánica cuántica? Para responder a esta pregunta, hacemos la siguiente observación: la praxis a la que estamos haciendo referencia no sólo remite a las manipulaciones que se hacen en el laboratorio, sino (y principalmente) a las manipulaciones que hacemos con nuestros conceptos previamente existentes, es decir, remite a procesos mentales, a las operaciones abstractas que los físicos teóricos realizan cotidianamente. De este modo, nunca accedemos a los sistemas cuánticos a través de nuestra percepción sensorial. Sólo obtenemos información de ellos a través de lo que nuestros sentidos pueden percibir, a saber, las agujas de los aparatos que usamos en los experimentos.

A través del uso de la teoría y de sus conceptos, los físicos fueron aceptando que no es posible atribuir propiedades a los sistemas cuánticos mediante resultados de los experimentos. Si esta afirmación es llevada a sus últimas consecuencias, se sigue que los sistemas cuánticos *no están en ningún lugar* y que *no se mueven en ninguna dirección*. Simplemente, no es posible atribuirles una trayectoria en el espacio-tiempo. De aquí se concluye que no es posible “señalar” a un sistema cuántico (ni a su función de onda); sólo podemos señalar al dispositivo experimental al que el sistema cuántico va a influenciar (¡aunque esto no impide que los físicos hablen de él!). Lo mismo vale para el resto de las magnitudes de interés, es decir, para el resto de los “observables”. En particular, como señaló E. Schrödinger, no tiene sentido hablar sobre su identidad: “una partícula elemental

no es individuo” (Schrödinger 1998). La identidad (así como la posición y el momento) tiene más que ver con la influencia que los sistemas cuánticos tienen sobre lo que nosotros podemos observar, que con una propiedad que estos posean. Lo único que podemos afirmar es que, en cada instante, se encuentran en un determinado estado que evoluciona según las leyes de la mecánica cuántica. Pero este estado no representa algo que exista en algún lugar del espacio-tiempo, sino *la posibilidad de que una región del espacio-tiempo sea influenciada por el sistema cuántico*.

Señalamos también que los físicos aceptaron una relación intrínsecamente no determinística entre el estado del sistema cuántico y las posiciones de la aguja del aparato. Esta “resignificación de la causalidad” (consecuencias que no están unívocamente determinadas) echa por tierra todo tipo de explicación del proceso de medición apelando a las nociones de “tiempo” y de “evolución temporal” comúnmente usadas en física. En general, el tiempo es considerado un parámetro, con el orden de los números reales, y la evolución se describe como una sucesión de estados que se modifican según la acción de un Hamiltoniano. Pero esta descripción de la evolución a como una sucesión de “fotos” congeladas no captura la esencia del fenómeno cuántico y es intrínsecamente determinista (por ejemplo, la ecuación de Schrödinger). Es el estado el que evoluciona en forma determinística, pero no la influencia que el sistema cuántico tiene sobre lo que podemos observar. En efecto, en los enfoques ortodoxos el carácter intrínsecamente probabilístico debe ser incorporado como un postulado adicional. Esto lleva a introducir supuestos como la hipótesis del colapso o la regla de Born. Las teorías de decoherencia disponibles actualmente no escapan a este problema.

Recordamos arriba que el resultado de una medición (o experimento) no puede ser concebido como refiriendo a una propiedad perteneciente al sistema antes de la medición. Pero analicemos cuidadosamente esta afirmación. Sería erróneo concluir a partir de ella que un sistema cuántico no posee ningún tipo de propiedad, ya que la aguja del aparato no hace cualquier cosa. Los valores que la aguja puede tomar están relacionados con una suerte de “propiedad” del sistema cuántico. Como señalamos arriba, en cada instante el sistema se encuentra en un determinado estado, el cual evoluciona según la ecuación de Schrödinger. Los sistemas cuánticos pueden tener además otras propiedades independientes del estado, como en algunos casos la carga eléctrica o el spin.

Sostenemos que no se incurre en contradicción al hacer afirmaciones del tipo: ‘el sistema está en un determinado estado’, incluso antes de que los aparatos que van a intervenir en el experimento a realizar hayan sido construidos o concebidos en la imaginación del experimentador. El estado es representado matemáticamente por un vector en un espacio de Hilbert y admite una descomposición en una infinidad de bases, las cuales no necesariamente deben tener un correlato con los aparatos construibles en el laboratorio. Una vez que se eligen y se construyen los aparatos que corresponden a un determinado experimento y se fija por lo tanto una determinada base de autovectores correspondientes al conjunto completo de observables que conmutan (el COCC) definido por los aparatos, queda determinada una descomposición del vector de estado si el experimento se va a realizar de hecho. La contradicción aparece con la pretensión de que el estado del sistema coincida con uno de los vectores de la base elegida. Y es de esperar que esta contradicción en efecto aparezca si se tiene en cuenta que esta base está determinada en última instancia por la elección del observador, y no por el sistema. El sistema se encuentra en un determinado estado independientemente del experimento que elijamos realizar, y este hecho es el que le asigna un carácter *objetivo* al sistema cuántico.

Sólo en casos especiales podremos predecir con certeza el resultado de un experimento. En vez de ello, siempre podemos predecir probabilidades, y ésta es la descripción más completa que se puede dar. Esto se produce en la experiencia de forma tal que la estructura algebraica de las proposiciones que podemos hacer sobre la certeza de los resultados de los experimentos (¡y no acerca del sistema!) sea la de un retículo no distributivo (Aerts 1981). Esto expresa el hecho de que hay proposiciones incompatibles, y nos remite a la idea de complementariedad de Bohr. Creemos que esta característica debería ser tomada como constitutiva de *la relación* entre los sistemas cuánticos y los experimentos que realizamos. Asumiremos, entonces, que un sistema cuántico puede influir en lo que nosotros percibimos, de forma tal que existan proposiciones incompatibles. De este modo, si tenemos la certeza que una cierta proposición es verdadera, no tenemos derecho a afirmar que otra proposición incompatible con la primera es verdadera o que sea verdadera su negación. Esta característica parece inundar el dominio de la cuántica. Además, vemos que la relación entre el “estar en un estado” de un sistema cuántico y los resultados de nuestros experimentos en cuántica, es muy diferente a la del caso clásico. Es por ello que no es adecuado referirse al hecho de “estar en un estado” como a una propiedad en el sentido usual. El cambio del significado de un concepto implica una automática resignificación de todos los demás conceptos relacionados con él. Cuando el término ‘propiedad’ sea usado en mecánica cuántica, ya nunca podrá ser interpretado en un sentido clásico, sino sólo de acuerdo al uso que se le da en ese dominio.

5. Conclusiones

En este trabajo nos propusimos sacar a luz los presupuestos que subyacen a los conceptos de ‘medición’ y de ‘sistema’, estableciendo su significado de acuerdo al uso que tienen en la mecánica clásica, siguiendo la propuesta de Wittgenstein en *Investigaciones Filosóficas*. Una vez hecho esto, investigamos el uso que se da a tales conceptos en la mecánica cuántica y, de acuerdo con ello, mostramos los presupuestos que gran parte de la comunidad física acepta. En particular, estudiamos la crítica que hace Bell al concepto de “medición” y lo relacionamos con la definición de “problema filosófico” wittgensteiniana. A partir del análisis de su uso, propusimos reelaborar estos conceptos de forma tal de dejar sistemáticamente de lado los presupuestos clásicos, y sólo usar las construcciones conceptuales propias de la mecánica cuántica. Así, siguiendo a Bell, reemplazamos “medición” por “experimento”, investigando de acuerdo al uso qué cosas se pueden afirmar y qué cosas no acerca de este concepto. Este método de trabajo nos llevó a establecer una distinción conceptual entre los aparatos del laboratorio y los sistemas cuánticos. Estos últimos tienen una existencia que puede considerarse independiente del experimentador y sólo nos enteramos de su existencia en forma indirecta a través de los experimentos. Concluimos que estos experimentos, lejos de revelarnos propiedades de los sistemas cuánticos, nos hablan acerca de la *forma* en la que estos sistemas son capaces de influenciar sobre lo que nosotros podemos observar (las agujas de los aparatos, que son necesariamente clásicas). Y que, debido a esto, los resultados de estos experimentos no son independientes de nuestra intervención como observadores. Desde este punto de vista, las afirmaciones de la mecánica cuántica no sólo versan sobre los sistemas cuánticos sino, principalmente, sobre la *forma* en que se da la *relación* entre estos sistemas y nuestros instrumentos de laboratorio.

Referencias:

- (1) Aerts, D., "The one and the many: towards a unification of the quantum and classical description of one and many physical entities", doctoral dissertation, Brussels Free University, Brussels (1981).
- (2) Ballentine, L., "Quantum Mechanics", Prentice Hall Englewood Cliffs, New Jersey (1990).
- (3) Bell, J.: "*Against measurement*", in Sixty--Two Years of Uncertainty. Historical, Philosophical and Physical Inquiries into the Foundations of Quantum Mechanics, Proceedings of a NATOAdvanced Study Institute, August 5--15, Erice, Ed. Arthur I. Miller, NATO ASI Series B vol. 226 , Plenum Press, New York (1990).
- (4) French, S. y Krause, D., "Identity in Physics: A historical, Philosophical, and Formal Analysis", Oxford University Press (2006).
- (5) Mittelstaedt, P., "The interpretation of quantum mechanics and the measurement process", Cambridge University Press (1998).
- (6) Schrödinger, E., "What is an elementary particle?", reprinted in Castellani, E. (ed.), "Interpreting bodies: classical and quantum objects in modern physics", Princeton Un. Press, pp. 197-210, (1998).
- (7) Wittgenstein, L., "Investigaciones filosóficas", Ediciones Altaya (1999).