

Realismo, Instrumentalismo y Explicaciones Científicas en la Mecánica Cuántica.

Javier Agustín Krick

Resumen

En este artículo sostengo que las interpretaciones de la mecánica cuántica no ofrece una explicación completa debido a no dar cuenta de los procesos mecánico-causales que hacen que se produzca el explanandum. Gran parte de los científicos toman una posición empirista e instrumentalista con respecto a la mecánica cuántica y una de sus principales razones es el hecho de que no es posible hacer un experimento crucial como para discriminar entre distintas interpretaciones. Debido a eso expondré un criterio razonable no empírico para determinar si una interpretación total es relevante. El criterio considera relevantes las interpretaciones que son capaces de dar una explicación óptica mecánico-causal de los fenómenos que la teoría pretende explicar. Mostraré cómo las interpretaciones usuales de la mecánica cuántica no señalan los mecanismos, sino que más bien, añaden nuevas hipótesis sin ofrecer un mecanismo claro según el cual estos supuestos fenómenos son producidos. Por último, ofrezco algunos requisitos que debe considerar una interpretación total de la mecánica cuántica para que pueda ser considerada una teoría completa.

Palabras clave: explicación epistémica, explicación óptica, explicación completa, causal, interpretación minimal, interpretación total, teoría completa.

1- Introducción

Suele haber un alto grado de consenso en que una teoría científica debe ofrecer explicaciones y predicciones de fenómenos naturales. A su vez, se espera que una teoría científica pueda describir y unificar varios fenómenos mostrando que pueden ser descritos bajo un mismo conjunto de leyes. La mecánica cuántica es una de las teorías con mayor éxito predictivo y logra predecir múltiples fenómenos, sin embargo, no queda claro qué tipo de explicación física ofrece, si es que ofrece una.

Comenzaré el trabajo analizando los debates tradicionales acerca de la explicación científica y argumentaré a favor de que una teoría científica debe dar lo que llamaré explicaciones completas. Mostraré a partir de esto que las interpretaciones más usuales la mecánica cuántica (en conjunción con el formalismo matemático), a pesar de ser capaces de dar explicaciones epistémicas, no pueden dar cuenta de las explicaciones ónticas que son necesarias para que la teoría ofrezca una explicación completa.

Luego en la sección 3 mostraré cómo este problema se relaciona con otro que está presente en la mecánica cuántica. Este otro problema es el hecho de que hay múltiples interpretaciones empíricamente equivalentes. Ofreceré un criterio no empírico para poder distinguir entre interpretaciones totales fútiles e interpretaciones adecuadas y completas; y mostraré cómo las interpretaciones totales que se suelen dar acerca de la mecánica cuántica no cumplen con este criterio. El criterio que se ofrece en este trabajo permite discernir la adecuación de teorías¹ con el mismo formalismo matemático y con las mismas predicciones empíricas². Es importante aclarar también que a pesar que en este trabajo trataré específicamente los problemas en relación con la teoría de la mecánica cuántica estándar no relativista,

¹ En este trabajo se considerará que una teoría física es un formalismo matemático interpretado. Es decir, una teoría no consiste únicamente en el formalismo matemático sino también en las conceptualizaciones utilizadas para dar cuenta de los existentes del que habla la teoría.

² Una consecuencia de esto es que el criterio no permite comparar la teoría GRW, la Mecánica Bohmiana y la mecánica cuántica estándar, ya que al no utilizar el mismo formalismo las consecuencias observacionales de estas teorías son distintas. Más bien el criterio sirve para comparar teorías que tengan el mismo formalismo matemático, que sean empíricamente equivalentes y que tengan una interpretación diferente. Por ejemplo, el criterio podría aclarar si la interpretación de Copenhague genera (o no), una buena teoría, y luego debido a eso, permitiría que se compare a la interpretación de Copenhague con, por ejemplo, la interpretación de Everett.

aunque el criterio para discriminar interpretaciones empíricamente equivalente es general y puede ser aplicable a otras teorías científicas. Por ejemplo, en GRW existen dos interpretaciones que son empíricamente equivalentes, una de densidad de materia, y otra que proporciona una ontología de flashes. El criterio que expondré podría juzgar si una de estas interpretaciones es válida o no. Por otra parte, la interpretación de muchos mundos y la interpretación de Copenhague sí serán evaluadas debido a utilizar el formalismo estándar.

Posteriormente, argumentaré la necesidad de que los científicos formulen conceptos para poder dar cuenta de los fenómenos causales de la teoría y así poder dar explicaciones completas de los fenómenos. Y luego mostraré cómo se relaciona esto con el espíritu empirista e instrumentalista de gran parte de la comunidad científica que trabaja en la mecánica cuántica.

Por último, expondré cuáles son las características que debe tener en cuenta una conceptualización de los fenómenos cuánticos para poder dar explicaciones que resulten completas, adecuadas.

2- Explicaciones epistémicas, explicaciones ónticas y explicaciones completas

La mecánica cuántica es una de las teorías que está mejor confirmada empíricamente. Para poder entender qué tipo de explicación nos ofrece es necesario analizar en detalle qué se dijo de las explicaciones científicas por los filósofos de la ciencia. Las dos concepciones de explicación científica más desarrolladas en la literatura de la filosofía de la ciencia pueden ser catalogadas como la concepción óntica de la explicación científica, y la concepción epistémica de la explicación científica. La concepción óntica o mecánica de la explicación científica considera que una teoría da una explicación, si se apelan a las causas de un fenómeno. La concepción epistémica, por otra parte, considera que dar una explicación científica es dar un argumento.

La primera versión de la explicación epistémica fue escrita por Hempel y se encuentra en “Estudios de la lógica de la explicación” (1948). Con el tiempo la postura se fue desarrollando siempre teniendo como principal referente al mismo

filósofo. Si seguimos esta concepción de la explicación científica, la mecánica cuántica provee, por un lado, explicaciones nomológicas deductivas y por otro lado explicaciones de tipo inductivo-estadísticas. Bajo esta postura, todo *explanandum* es explicado debido que es conclusión de una inferencia, ya sea deductiva o inductiva a partir de leyes empíricas generales bien confirmadas y condiciones iniciales. Que el *explanandum* se infiera a partir de las leyes generales y las condiciones iniciales hace que el *explanandum* sea esperable y, por ende, quede explicado.

Por ejemplo, supongamos que tenemos la ley empírica general L que dice “todos los cuervos son negros”, y tenemos un cuervo negro. Según el criterio epistémico de explicación científica podríamos explicar el color del cuervo infiriendo el color del cuervo a partir de L y del hecho de que hay un cuervo. Esta inferencia hace que el color negro del cuervo sea algo nómicamente esperable, y, que como resultado el fenómeno quede explicado.

Los filósofos de la ciencia con el tiempo descubrieron que hay razones para considerar que las explicaciones epistémicas no cumplen con un criterio de suficiencia para una explicación científica:

Uno de los problemas es señalado por Bromberger (1966). El problema está en que este tipo de explicaciones pueden no cumplir con criterios de asimetría. Por ejemplo, la sombra de una bandera junto con el ángulo del sol podría explicar la altura de la bandera. Esto se vuelve paradójico ya que, pese a que ambos hechos son suficientes como para afirmar que la bandera tiene una determinada altura, la altura de la bandera no se debe al largo de la sombra.

Otro problema, como marca Salmon (1971, p.34), es que utilizando únicamente este criterio puede haber explicaciones espurias. Por ejemplo, que Juan no quede embarazado podría ser explicado a partir de una inferencia que tiene como premisa la ley que dice que los hombres que toman pastillas anticonceptivas regularmente no quedan embarazados y el hecho que Juan tomó pastillas anticonceptivas. El problema radica en que esto sería absolutamente útil si no fuese porque ningún hombre queda embarazado.

Otro problema ya muy conocido, es que en casos de correlaciones estadísticas entre A y B, no queda claro si A causa B, B causa A o si A y B tienen una causa C en común. Algo que en principio una explicación científica debería explicar.

Todos estos problemas son razones para mostrar que el modelo de explicación inferencial no establece condiciones suficientes para una explicación científica adecuada. Sin embargo, parece razonable considerar que este criterio sí ofrece condiciones necesarias para una buena explicación. Esto se debe a que es evidente que toda ley científica debe ofrecer predicciones y que parte del rol de una explicación científica es mostrar cómo estas predicciones se infieren a partir de leyes generales y las condiciones iniciales. Sin embargo, los problemas expuestos de la concepción epistémica de la explicación pueden ser superados si se añaden explicaciones ónticas de los fenómenos físicos.

Wesley Salmon es el principal expositor de la concepción óntica de la explicación científica. En las explicaciones ónticas, la causalidad toma un papel importante dentro de la explicación. Lo principal es entender que la relación causal entre eventos tiene una estructura asimétrica a diferencia de muchas de las explicaciones inferenciales. Para una explicación científica de carácter mecánico-causal, ofrecer una explicación no es ofrecer una inferencia ya que los relata de la relación explicativa son ónticos, no entidades abstractas. La relación de explicación está en mostrar la relevancia causal que hay para producir un evento. En otras palabras, explicar es proporcionar hechos explicativos que constituyan causas del explanandum, procesos causales que conectan causas y efectos, y regularidades causales que gobiernan los mecanismos que involucran el explanans. La explicación en este caso ocurre cuando se encuentran hechos del mundo que hacen que sea esperable la producción del efecto que se pretende explicar. Una última característica es que a diferencia de lo que llama un pseudo-proceso (procesos que únicamente exhiben regularidades), un proceso mecánico-causal tiene la capacidad de transmitir marcas de manera continua (Salmon, 1984, p.297).

Por ejemplo, la mecánica clásica habla de fuerza, masa, movimiento. Gracias a estas conceptualizaciones podemos luego explicar causalmente cómo, debido a la tercera ley de Newton, una bola de billar impactada por otra sale dirigida para tal dirección.

Como señalé anteriormente, es necesario que una teoría científica pueda dar explicaciones epistémicas. En caso de que no las den, dada unas leyes empíricas L , y unas condiciones iniciales C , sería imposible predecir un fenómeno F a partir de L y C . Sin embargo, debido a los problemas expuestos arriba, parecen haber razones

para creer que una explicación epistémica no ofrece un criterio suficiente para dar cuenta de las buenas explicaciones científicas. Afortunadamente, todos los problemas expuestos arriba se solucionan cuando se dan explicaciones causales. Esto se debe a que la causalidad tiene una estructura asimétrica y las paradojas expuestas ocurrían debido a que las inferencias no tienen este tipo de estructura. Debido a esto introduciré lo que llamo una explicación completa. Una explicación completa ocurre cuando el fenómeno a explicar puede ser deducido a partir de las leyes de la teoría y un conjunto de condiciones iniciales, y cuando estas leyes y condiciones iniciales, pueden ser vistas, a la luz de los términos teóricos de la teoría, como causas explicativas del fenómeno explanandum. En otras palabras, una teoría produciría una explicación completa en caso de que logre dar tanto explicaciones epistémicas como explicaciones ónticas.

3- Los modelos de explicación y la mecánica cuántica.

Si la mecánica cuántica ofrece una explicación científica completa, es necesario que en primer lugar pueda dar explicaciones epistémicas. En caso de que no dé una explicación epistémica, no contaría con buenas predicciones. Sin embargo, la mecánica cuántica es de las leyes con mayor éxito predictivo; por lo tanto, la mecánica cuántica debería dar una explicación epistémica.

Para dar un ejemplo de cómo la mecánica cuántica ofrece explicaciones, expondré el experimento de la doble rendija y cómo la mecánica cuántica ofrece explicaciones epistémicas de este hecho. Una de las versiones de este experimento consiste en emitir un electrón hacia una pantalla. Entre el aparato que lanza el electrón y la pantalla receptora, hay una pared con dos rendijas abiertas. Si se realiza sucesivamente el experimento y se registra la ubicación de dónde impactan los electrones en la pantalla se genera un patrón de interferencia.

Si queremos preguntarnos por qué la mecánica cuántica explica (epistémicamente) que un electrón haya impactado en una ubicación determinada, podemos decir, que se debe a que el resultado podía ser inferido de manera inductivo-estadística. El argumento explicativo diría: a partir de la ecuación de

Schrödinger, la regla de Born y las condiciones iniciales del experimento, se puede inferir de manera inductiva que la ubicación final del electrón era de esperar.³ Así la mecánica cuántica explicaría epistémicamente por qué un electrón llegó a donde tenía que llegar y por qué al realizar sucesivamente el experimento se realiza el patrón de interferencia.

Un posible problema es que no queda claro si la regla de Born es una ley. En caso de que no sea, no podría ser utilizada como explanans para esta inferencia o, como alternativa, los requisitos para que algo forme parte del explanans le deben ser debilitados. Haley (2017) dice “La regla de Born, no es una ley de la teoría cuántica, no restringe ni elementos matemáticos de los modelos cuánticos ni ninguna magnitud física que pueda representar. La regla de Born gobierna aplicaciones de modelos cuánticos y emerge poco a poco en sus aplicaciones legítimas”. Sin embargo, para la teoría epistémica de las explicaciones esto no sería un problema ya que las leyes a partir de las cuales se trazan las inferencias son consideradas nada más regularidades empíricas. Más adelante en el artículo se verá cuál es la conexión entre las explicaciones epistémicas y el espíritu antimetafísico que tiene si se la considera un criterio suficiente de explicación científica.

Volviendo al experimento de las dos rendijas, a través de las condiciones iniciales, la ley dinámica y la regla de Born, podemos inferir de manera inductiva la posición de impacto de manera probabilista del electrón en la pantalla. Y como vimos, según la explicación epistémica, esto genera una esperabilidad nómica que hace que el fenómeno quede explicado. La pregunta ahora es si la mecánica cuántica ofrece explicaciones ónticas del experimento de las dos rendijas. En el caso del experimento de la doble rendija la ley de Schrödinger, junto con la regla de Born, logran predecir con gran precisión la distribución de los electrones luego de varias sucesiones de los experimentos. Sin embargo, al menos las interpretaciones usuales no ofrecen un mecanismo que explique por qué luego de varias emisiones aparece un patrón de interferencia y por qué si ahora hacemos que el electrón pase por una única rendija desaparece también el patrón.

³ En las primeras versiones de explicaciones inductivo-estadísticas esta inferencia sólo puede explicar eventos que sean altamente probables. En esa versión de explicación solo serían explicables los casos en los que la probabilidad de que ocurra algo sea alta según la inferencia. Sin embargo, en Hempel (1977) quita este requisito de alta probabilidad, y, en principio, la inferencia podría incluso explicar los casos de baja probabilidad.

Otro problema que impide la explicación de tipo causal es que no se tiene ninguna idea de qué clase de trayectorias tiene el electrón desde que es emitido hasta que llega a la pantalla. Uno también podría conjeturar que se está trabajando con ondas, pero luego no se explica por qué cuando se realiza una medición, el electrón aparece localizado en un punto y no se encuentran detecciones en el resto de la pantalla. Dirac (1967) intenta resolver este tipo de complicaciones agregando un colapso tras una medición. Posteriormente Von Neumann llamó a esto el postulado de proyección (Von Neumann 1955). Y como marca Einstein en el experimento de las dos cajas (Einstein, 1927) esto tomado así va en contra del principio de localidad, por lo que entraría en conflicto con la teoría de la relatividad general otra teoría física bien contrastada. Lamentablemente, el postulado de proyección no explica por qué ocurre el colapso ya que no da cuenta de un mecanismo que le corresponda. Lo único que se tiene es una receta predictiva interpretada de manera mínima y con muchas cajas negras. Este tipo de problemas hace que no se pueda identificar si la mecánica cuántica expone procesos mecánicos causales o sólo describe pseudo-procesos.

Como consecuencia, puede notarse que la mecánica cuántica, pese a efectivamente dar explicaciones epistémicas, es incapaz de dar explicaciones ónticas. Como consecuencia puede afirmarse que la mecánica cuántica también es incapaz de dar lo que llamamos una explicación completa. Más adelante se verá como esto se debe a una falta de conceptualización de los temas que trata. Sin embargo, pese a que la conceptualización es necesaria para ofrecer buenas explicaciones científicas es necesario establecer buenos criterios para seleccionar interpretaciones de una teoría. En parte, debido a la escasez conceptual de la teoría empezaron a aparecer muchas interpretaciones empíricamente equivalentes que confunden más que eliminar los problemas centrales para que haya una interpretación apropiada de la mecánica cuántica. En la siguiente sección expondré un criterio adecuado para decidir entre interpretaciones que son empíricamente equivalentes.

4- Interpretación mínima e interpretación total.

En esta sección argumentaré que una interpretación mínima ofrece condiciones necesarias para tener una teoría que pueda ser aplicable. Sin embargo, no todo tipo de interpretación que va más allá de la interpretación minimal es fútil. Mostraré, que hay un tipo de interpretación que es útil para dar una explicación completa de los fenómenos. A su vez, distinguiré entre lo que es una teoría completa, y una teoría incompleta.

En la mecánica cuántica, la ley dinámica es expresada por la ecuación de Schrödinger. Esta ley explica cómo evoluciona de manera continua el sistema a lo largo del tiempo. En principio, esta ecuación es un objeto matemático. Como dice Cassini (2016, p 21), si ningún símbolo matemático es interpretado físicamente, la teoría es puramente formal. Es a través de una interpretación física que es posible darle contenido empírico al objeto matemático. En la mecánica cuántica, además de la ecuación dinámica, es necesario interpretar la regla de Born que se aplica a la función de onda para poder calcular la probabilidad de encontrar un sistema físico en un estado determinado. Cassini en el artículo sostiene una distinción entre interpretaciones mínimas, es decir, aquellas interpretaciones que tienen como única función darle contenido empírico a la teoría; y por otro lado, las interpretaciones totales. Cassini sostiene en el artículo citado que sin una interpretación minimal, la teoría carecería de contenido empírico y por lo tanto es condición necesaria de una teoría. Esto es cierto, debido a que cualquier interpretación que se haga de una teoría por sobre la interpretación minimal no debería añadir nuevas consecuencias observacionales. A su vez, añade que una interpretación minimal es condición necesaria y suficiente para cualquier aplicación de la teoría y para cualquier uso práctico de ella. Esto también es cierto, si uno pretende predecir un sistema físico, en varias ocasiones puede utilizar la mecánica cuántica y no es necesario de una interpretación que vaya más allá de una teoría minimal para poder dar predicciones de la teoría. Siguiendo el argumento de Cassini, debido a que es posible construir más de una interpretación para dicha teoría y debido a que estas interpretaciones totales no pueden ser confirmadas por ninguna experiencia, las interpretaciones totales no constituyen más que empresas metafísicas inconfirmables. Como consecuencia, concluye que la teoría cuántica no necesita más interpretación que la interpretación minimal. Es en estos últimos puntos que estoy en desacuerdo.

Es cierto que para cualquier aplicación de la teoría no es necesaria ninguna interpretación total. Esto se debe a que con la interpretación minimal es suficiente como para pegar el formalismo con los datos observables. También si lo único que se busca es dar una explicación epistémica, una interpretación minimal es más que suficiente. Sin embargo, no considero que cualquier tipo de interpretación sea mayor que una interpretación minimal es fútil. Una interpretación total que no sirve para elucidar los procesos mecánico-causales es irrelevante mientras que una interpretación total que pueda representarlos de manera que forme una teoría coherente sería una interpretación completa y fructífera. El punto central que quiero defender es que a pesar de que puede haber múltiples interpretaciones totales empíricamente equivalentes, sí, a diferencia de lo que dice Cassini, hay criterios no empíricos para discernir entre una buena y una mala interpretación.

En primer lugar, si lo que debe hacer la ciencia es dar explicaciones completas, es necesario buscar interpretaciones totales que tengan en cuenta los fenómenos causales. Es decir, si la ciencia debe dar explicaciones completas, parte de la tarea del físico es buscar conceptualizaciones como para que la teoría pueda explicar los fenómenos de manera causal. A su vez, si el problema de una interpretación total radica en la incapacidad de hacer un experimento crucial como para decidir entre interpretaciones, considero que si una interpretación logra dar explicaciones ónticas (y la otra no) parece un buen criterio para decidir qué teoría optar. Así, el truco para discriminar entre empresas metafísicas con el mismo contenido empírico está en distinguir si la teoría junto a la interpretación total ofrece explicaciones ónticas o no. Debido a esto llamaré teorías completas a aquellas teorías que tienen los conceptos adecuados como para dar explicaciones completas además de buenas predicciones. Mostraré a continuación ejemplos que evidencian que es posible discriminar entre teorías interpretadas que no ofrecen explicaciones completas y teorías interpretadas que sí lo hacen.

Para no alejarnos de nuestro objeto de estudio, comienzo dando ejemplos de interpretaciones insatisfactorias dentro de la mecánica cuántica. Podemos considerar la interpretación de muchos mundos y la de Copenhague y ver cómo se adecuan a un experimento donde se lanza un fotón hacia un divisor de haz al 50%. Según ambas interpretaciones, la función ψ evoluciona acorde a la ecuación de Schrödinger y obtenemos un sistema superpuesto y hay una $pr(0,5)$ de que llegue el

fotón a un detector y una $pr(0,5)$ de que aparezca en el otro detector cuando es realizada la medición. Sin embargo, siempre que se realiza la medición obtenemos un único resultado. La interpretación de Copenhague dice, introduciendo un nuevo postulado ad hoc, que cuando se realiza una medición hay un colapso de la función de onda de manera que aparece el fotón en el lugar medido. La interpretación de muchos mundos dice que el fotón fue efectivamente por ambas rutas y el mundo se dividió en dos, de manera que en un mundo el fotón llegó a un detector y en el otro mundo llegó al otro. Las probabilidades en la interpretación de muchos mundos son interpretadas de manera epistémica y dicen cuáles son las chances de estar en cada mundo, y la medición es lo que afirma en cual mundo estas.

El problema de ambas interpretaciones es que agregan nuevos postulados, pero sin explicar cómo ocurren. Por ejemplo, asumamos que hubo un colapso, ¿qué tipo de mecanismo es el colapso? Esto es algo que no se entiende bien y que tampoco queda claro para los defensores de esta interpretación. De hecho, para esta postura, en la versión más radical, no tiene sentido ni preguntarse qué trayectoria tuvo el electrón antes del colapso. A su vez, e incluso más grave, no queda explicado por qué una medición debe hacer que se active el colapso. Con la interpretación de muchos mundos ocurre algo similar, afirma que el mundo se ramificó, pero no sugiere ningún tipo de mecanismo que explique ópticamente por qué esto pasa, lo único que afirma es que de hecho ocurre. Uno pretende tener una teoría para explicar cómo el existente cuántico se comporta en el mundo, pero la interpretación de muchos mundos no explica las cadenas causales ni en este ni en cualquier otro mundo; dice que el mundo se ramifica y que cada electrón llega a cada detector, pero no debido a qué mecanismo causal lo hace. A su vez, la interpretación de muchos mundos no sólo no explica cómo se divide el mundo sino por qué me encuentro en el mundo que estoy y no en otro. Lo que vuelve una interpretación total legítima es si clarifica dando explicaciones de manera mecánico-causal. Si el mundo se divide, una explicación mecánico-causal debería explicar bajo qué mecanismo está ocurriendo eso. A su vez, ninguna de estas interpretaciones sirve para explicar qué trayectorias tiene el fotón en este u otros experimentos. En definitiva, ambas interpretaciones más que iluminar que pasa el experimento evidenciando las cadenas causales que transcurren, agregan nuevos fenómenos y nuevos mecanismos que deberíamos explicar. En mi manera de ver el asunto, este tipo de interpretaciones confunden más que dar una explicación de los fenómenos cuánticos.

Por otra parte, podemos pensar en muchos ejemplos por fuera de la mecánica cuántica de interpretaciones completas y fructíferas. Para dar un ejemplo, podemos mencionar la explicación que da la mecánica clásica del comportamiento de bolas de billar tras un impacto. Nótese que podría tenerse un modelo matemático mínimamente interpretado equivalente a la mecánica clásica que describiera por igual los movimientos de las bolas, pero no darían una explicación completa del tema como sí lo hace la mecánica clásica. En última instancia, dar una explicación causal es lo que hace que el fenómeno sea explicado.

Imagine ahora una interpretación alternativa del formalismo matemático utilizado en la mecánica clásica. Esta interpretación en vez de hablar de fuerzas y leyes de acción y reacción, pretende explicar los movimientos de las bolas de billar debido a la intención de las hadas del bosque. Supongamos que la teoría lograra enchufar el formalismo matemático con las bolas de billas. En este caso, la teoría poseería una interpretación total, pero la teoría no sería completa debido a no dar cuenta de los mecanismos físicos de los objetos. Alguno podría decir que este ejemplo es absurdo, ninguna teoría física habla de hadas y las interpretaciones físicas que se suelen hacer parecen mucho más ligadas a una concepción fisicalista. Las teorías físicas suelen dar explicaciones causales y no cuentos de hadas. Sin embargo, pese a que esto es cierto, ya quedó mostrado que dos de las interpretaciones más populares de la mecánica cuántica ofrecen interpretaciones que no ofrecen mecanismos causales. En cuanto a los criterios epistemológicos presentados para poder discriminar entre interpretaciones rivales, la interpretación de muchos mundos y la interpretación de Copenhague no son muy distintas a una historia de cuentos de hadas.

Con este ejemplo quiero demostrar que a pesar de que no hay criterios empíricos para distinguir y valorar una interpretación sobre otra, tenemos la capacidad de identificar cuando una interpretación ofrece una explicación mecánico-causal. Debido a esto estamos justificados para afirmar que hablar fuerzas, acción y reacción es mucho mejor que hablar de cuentos de hadas. Algunas interpretaciones no son más que historias, mientras que otras ofrecen explicaciones ópticas de los fenómenos. Sin embargo, no siempre poseemos una buena interpretación que elucide adecuadamente los fenómenos que desean ser explicados. En aquellos casos, el prudente asumir un compromiso ontológico sólo con una interpretación

minimal; pero eso no significa que el científico deba estar satisfechas con esto, ya que el científico debería buscar dar explicaciones completas.

Como conclusión, la interpretación minimal es condición necesaria de una teoría física y es condición necesaria y suficiente para la aplicación. Pero no es condición suficiente para tener una teoría que ofrezca una explicación completa. Considero que el criterio de completitud de una teoría debe ir ligado al debate de explicación científica. Para que haya una explicación completa, la teoría debe dar una explicación tanto óptica como epistémica. A su vez, este criterio sirve para discriminar entre interpretaciones totales adecuadas e inadecuadas.

5- Realismo, Empirismo y El estado actual de la mecánica cuántica.

Dos preguntas válidas son, cómo la capacidad de dar explicaciones por parte de una teoría se relaciona con el realismo científico y qué hay que hacer cuando todavía no se encontró una interpretación completa de una teoría. Considero que el compromiso ontológico debe ir ligado a la explicación que ofrezca la teoría. En caso de que se encuentre una interpretación completa y adecuada, el compromiso ontológico debe ser con la interpretación total y completa. Por otra parte, cuando todavía no se desarrolló una interpretación completa de una teoría, el compromiso debe ser con la interpretación minimal, y la explicación de la teoría será incompleta. Sin embargo, que no se encuentra una interpretación completa de una teoría no significa como muchos consideran que los científicos deban abandonar su búsqueda.

Es cierto que todavía no hay una interpretación de la mecánica cuántica que pueda explicar ópticamente los fenómenos cuánticos. Esto significa que, por ahora, el compromiso ontológico debe ir junto con la interpretación minimal y se debe entender que la mecánica cuántica no ofrece todavía una explicación completa de los fenómenos que pretende explicar. Sin embargo, considero que, si uno pretende que la mecánica cuántica ofrezca explicaciones completas de los fenómenos clásicos, es necesario el desarrollo teórico de nuevos conceptos y representaciones con el fin de eventualmente poder dar cuenta de las cadenas causales que ocurren

en los fenómenos cuánticos. Debido a esto, considero que mi postura está asociada con lo que Christian De Ronde llama la actitud realista representacional [Representational realist stance (en inglés)](De Ronde, p 12). La actitud realista representacional considera que una teoría física debe ser capaz de dar una representación física y metafísica de la realidad en términos de una red conceptual coherentemente relacionada con el formalismo matemático. Considero que una actitud realista representacional correcta debe armar redes conceptuales pero con el objetivo de dar explicaciones completas, es decir, que se puedan inferir consecuencias observacionales y que dé cuenta de los fenómenos causales que producen el explanandum.

Una pregunta es por qué los científicos no buscaron dar interpretaciones totales. Parte de la respuesta se debe al espíritu instrumentalista de varios representantes de la mecánica cuántica. El approach más general para tratar los fenómenos cuánticos es tomar al formalismo matemático como un algoritmo de predicción que permite dar cuenta de entes clásicos. Siguiendo esta idea, Fuchs y Peres dicen:

La teoría cuántica no describe la realidad física. Lo que hace es proporcionar un algoritmo para computar las probabilidades de los eventos macroscópicos("clicks en detectores") que son consecuencias de las intervenciones experimentales." (Fuchs y Peres p. 53, 70, (2000))

Sin embargo, como dice Cassini, la idea de un algoritmo matemático es incoherente ya que la teoría necesita algún tipo de interpretación para que no sólo sea una estructura matemática (Cassini, p. 22 (2019)). Sin embargo, haciendo una idea caritativa de lo que quisieron decir la idea es simple, si la mecánica cuántica trata únicamente de clicks en detectores darle una interpretación total es una acción inútil. Podemos predecir los futuros clicks y mantenernos con el vocabulario del aquí ahora observable. Una idea un poco más moderada fue introducida por Bohr en la respuesta a EPR (Bohr, 1935).

La estrategia de Bohr es darle contenido empírico a la mecánica cuántica haciendo una interpretación que utiliza términos clásicos elegidos según el arreglo experimental para dar cuenta de los observables de la teoría. Según el arreglo experimental uno puede determinar cómo tratar al existente (como onda o partícula). Algo que si se lo toma de una manera realista no tiene nada de sentido. La idea central de este giro de argumentación por parte de Bohr está en asumir que no se

necesitan nuevos conceptos para interpretar la mecánica cuántica, y que es posible hacer física manteniéndose con el vocabulario de la mecánica clásica y así poder darle contenido empírico a la teoría. De esta manera se restringe la mecánica cuántica a las condiciones del arreglo experimental. A su vez, como dice Christian De Ronde (De Ronde 2016 p.16) respecto a esto, Bohr opta por dar una descripción clásica de los fenómenos a cambio de perder la posibilidad de una representación de la realidad cuántica.

Parte de las motivaciones de Bohr como de Fuchs y Peres está en tener una concepción de la ciencia asociada al empirismo y positivismo lógico. Si la ciencia pudiese desprenderse de los términos teóricos podrían armarse teorías sin ningún tipo de bagaje metafísico. No es casualidad que la concepción de explicación más popular dentro de los empiristas lógicos era el modelo de explicaciones epistémicas de la ciencia desarrollada por Hempel y expuesto anteriormente. Si lo único que tiene que hacer la ciencia para ofrecer explicaciones es poder hacer inferencias y predicciones, entonces cualquier manera que tengamos para pegar nuestro algoritmo matemático con algún observable es suficiente para tener una teoría científica adecuada.

La diferencia de esta perspectiva está en creer que una teoría además de dar predicciones tiene que generar una comprensión del asunto que describe. Es en este marco en el que se instalan la posición de que las teorías deben dar explicaciones completas. Si dar explicaciones completas significa dar explicaciones ónticas además de predicciones, es necesario entonces tener conceptualizaciones metafísicas (y físicas) que puedan describir el mundo bajo la luz de la teoría.

6- Requisitos para una explicación cuántica completa

Es cierto como dije antes que todavía no existe una explicación completa de los fenómenos cuánticos. El formalismo matemático permite hacer predicción de gran precisión, y por eso no hay grandes motivos para considerar que deba ser modificado. En cambio, parte de lo faltante para tener una explicación completa de la mecánica cuántica es poder dar cuenta de las relaciones causales de los relata

cuánticos. Sin embargo, no hay una manera clara en cómo resolver este problema. Debido a esto mencionaré los distintos requisitos y problemas que se deben considerar para encontrar una explicación óptica satisfactoria de la mecánica cuántica. Considero que esta lista no es exhaustiva; más bien es un esbozo de los problemas centrales que deben ser solucionados.

La ecuación de Schrödinger evoluciona en el tiempo de manera determinista, sin embargo, las predicciones que hace la mecánica cuántica se obtienen aplicando la regla de Born a la función de onda y son de carácter probabilístico. Debido a esto se debe explicar cómo es posible una teoría mecánico causal con estados superpuestos y predicciones probabilistas.

Lo primero que se debe hacer para desarrollar una teoría cuántica completa es desarrollar un significado físico a la superposición de estados. Las superposiciones son consecuencias del formalismo de Hilbert y es necesario que haya una interpretación física adecuada de estas. Una postura posible puede ser la que desarrolla Christian de Ronde (De Ronde 2016) que considera que los distintos estados superpuestos tratan de poderes con un modo de existencia potencial. El modo de existencia potencial que tiene los poderes significa que tienen las propiedades de ser indeterminados, contradictorios y no-individuales.

Otro requisito que debe cumplir una teoría cuántica completa es el desarrollo de una teoría de la interpretación objetiva de la probabilidad y que sea aplicable a una teoría que proporcione explicaciones causales. Esto se debe a que si se pretenden dar explicaciones causales, es necesario que la probabilidad no sea entendida como ignorancia acerca de un estado de cosas. A su vez, además de ser objetiva, la interpretación de la probabilidad no puede ser frecuentista debido a que la teoría debe poder dar explicaciones causales de hechos individuales y no sólo de colectivos. La interpretación debe ser estadísticamente relevante (no como el caso de los anticonceptivos mencionado en la sección 2) y debe tener poder causal. Debido a la Paradoja de Humphries, la interpretación de la probabilidad no debería ser consistente con los axiomas de Kolmogorov. Esta paradoja muestra que la causalidad es asimétrica mientras que los axiomas de Kolmogorov son simétricos. En los axiomas de Kolmogorov se sigue que si la probabilidad de A dado B está definida, la probabilidad de B dado A también lo está. En cambio, si A es causa de B, no implica que B sea causa de A. Sin embargo, es importante que además de una

interpretación que cumpla estos requisitos, la axiomatización de la probabilidad debe ser compatible con la asimetría en la probabilidad condicional entre eventos. Otra razón por lo que la probabilidad no tiene que cumplir con los axiomas de Kolmogorov es debido a lo que Accardi (1982) demostró: que toda teoría que no cumpla con las inequidades de Bell tiene un modelo no cumple con la axiomatización de Kolmogorov.

Una interpretación posible de alguna axiomatización de la probabilidad puede ser la interpretación propensivista que desarrolló Popper (1957). En líneas generales, esta interpretación dice que la probabilidad es una propiedad física relacional de un arreglo experimental que hace que se tienda a generar una frecuencia. Pese a que la interpretación originalmente fue pensada para una axiomatización de Kolmogorov no hay nada que impida que la interpretación propensivista pueda ser utilizada en otras teorías de la probabilidad. Sin embargo, esta no es la única candidata, luego de la interpretación de Popper se desarrollaron otras posturas propensivistas que podría cumplir con estos requisitos (Miller (1975); Gillies (2000), entre otros) Otra Interpretación de la probabilidad es la desarrollada por Christian de Ronde que considerarla a la probabilidad como la potencia de los poderes potenciales (el modo de existencia de los estados).

Otro requisito es que la teoría debe poder dar cuenta de las trayectorias de los existentes cuánticos para dar una explicación continua que sea conmensurable con una teoría mecánico-causal. La teoría debe explicar qué tipo de mecanismo ocurre cuando hay un entrelazamiento y por qué estos se producen.

La teoría tiene que ser compatible con la serie de teoremas no-go como el teorema de Bell (1964) y el teorema de Kochen-Specker (1967). Por ejemplo, no puede tener variables ocultas locales, se le tiene que dar cuenta un significado físico a la no-localidad, a la no-separabilidad y al contextualismo cuántico (entendido de manera objetiva y expuesto por Kochen-Specker).

Por último, la imagen del mundo que ofrezca la teoría debe ser coherente y debe dar una explicación óptica y causal de los fenómenos cuánticos. De hecho, esto último es relevante para que la teoría pueda tener una interpretación completa y cumpla con el objetivo de dar explicaciones completas.

5- Conclusión

La teoría cuántica, en el estado que se encuentra actualmente, no ofrece una explicación completa de los fenómenos cuánticos. Para poder dar una explicación completa, es necesario además de que tenga éxito predictivo, explicar por qué ocurren causalmente los fenómenos. Es cierto como dice Cassini (2016) que la mecánica cuántica posee una interpretación minimal que es necesaria y suficiente para la aplicación de la teoría y que toda interpretación total de la teoría no puede ser contrastada o comparada empíricamente. En otras palabras, es cierto que no es posible hacer un experimento crucial para poder elegir entre interpretaciones totales. Sin embargo, hay criterios no empíricos para poder discernir entre interpretaciones totales adecuadas e inadecuadas. El criterio para evaluar interpretaciones totales debe estar ligado a si ofrecen o no una explicación científica completa. La interpretación debe dar explicaciones ónticas, explicaciones epistémicas y debe ser coherente. Debido a que es posible discernir e identificar cuándo una teoría ofrece explicaciones ónticas, hay un criterio adecuado para poder elegir entre interpretaciones.

La mecánica cuántica, en el estado que se encuentra actualmente, no tiene una interpretación total satisfactoria y no está claro si en algún momento la tendrá. Esto se debe a que gran parte de la comunidad científica está alineada a un programa de investigación empirista e instrumentalista y a que las interpretaciones de la mecánica cuántica realistas que pretenden dar una ontología a la teoría, no ofrecen explicaciones ónticas. Para poder desarrollar una interpretación de la mecánica cuántica que ofrezca una explicación completa, es necesario desarrollar nuevos conceptos para poder dar cuenta de la causalidad y de los modos de existencia de los distintos fenómenos cuánticos. Para que esto ocurra, las representaciones creadas por la interpretación total, debe dar cuenta de una interpretación objetiva de la probabilidad que tenga poder causal, dar cuenta de las superposiciones de estados, debe explicar ónticamente qué es el entrelazamiento y debe ser compatible con los teoremas no-go.

Por último, vale la pena mencionar que a pesar de que el trabajo ofrece criterios para resolver problemas dentro de la mecánica cuántica, varias de sus conclusiones y herramientas son aplicables a otras teorías científicas.

Referencias Bibliográficas:

Accardi, “*Foundations of quantum probability*”, *Rend. Sem. Mat. Univ. Politecnico di Torino*, 249-270 (1982).

Albert Einstein, *Solvay Conference (1927) - (Two boxes experiment)*

Alejandro Cassini, *El Problema Interpretativo de la Mecánica Cuántica* (2019)

Carl Hempel, *Studies in the Logic of Explanation* (1948)

Carl Hempel, *Nuevas ideas sobre los problemas de las explicaciones estadísticas* (1977)

David Miller, *Propensity: Popper or Pierce?* (1975)

Christian De Ronde, *Probabilistic Knowledge as Objective Knowledge in Quantum Mechanics* (2016).

Christopher Fuchs, y Asher Peres, Quantum theory needs no ‘interpretation’ , *Physics Today*, 53, 70. (2000)

Donald Gillies, *Philosophical Theories of Probability* (2000)

John Stewart Bell, On the Einstein Podolsky Rosen Paradox, *Physics* 1, 195 (1964)

John Von Neumann, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*. Princeton University Press (1955).

Karl Popper, *Propensities, Probabilities and the Quantum Theory* (1957)

Niels Bohr, *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete' ?* (1935)

Paul Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics* (1967)

Richard Healey, *The Quantum Revolution in Philosophy* (2017)

Simon Kochen y Ernst Specker, *The problem of hidden variables in quantum mechanics*”. *Journal of Mathematics and Mechanics* (1967).

Sylvain Bromberger, *Why-Questions* (1966)

Wesley C. Salmon, *Scientific Explanation and the Causal Structure of the World* (1984)

Wesley C. Salmon, *Statistic Explanations and Statistical Relevance* (1971)

Wesley C. Salmon, *Scientific Explanation: Three Basic Conceptions* (1984)