

DESARROLLOS TECNOLÓGICOS PARA LOS FUNDAMENTOS DE LA MECÁNICA CUÁNTICA EN EL SIGLO XXI

TECHNOLOGICAL DEVELOPMENTS FOR THE FOUNDATIONS OF QUANTUM MECHANICS IN THE 21ST CENTURY

JAVIER BERJÓN DE GORTARI
Universidad Nacional Autónoma de México
javier.berjon1@gmail.com

RECIBIDO: 25/08/2021

ACEPTADO: 02/05/2022

Resumen: El surgimiento de algunas teorías alternativas a la mecánica cuántica estándar, así como las diferentes propuestas para resolver el problema de la “gravedad cuántica”, han dado lugar al desarrollo de tecnología que sirva para someter a prueba experimental sus predicciones novedosas. En este trabajo se estudia la relación entre dichas tecnologías y las teorías correspondientes: GRW y la gravedad semiclásica. La conclusión es que la relación entre éstas no es lineal ni tampoco unidireccional, sino multidimensional y ciertamente bidireccional.

Palabras clave: fundamentos de mecánica cuántica; filosofía de la tecnología; filosofía de la física; gravedad semiclásica; teorías de colapso objetivo; problema de la medición; experimentación cuántica.

Abstract: The appearance of some alternative theories to standard quantum mechanics, plus the different proposals for solving the problem of “quantum gravity”, have given rise to the development of technology which allows to put their novel predictions to test. In this work we study the relationship between said technologies and their respective theories: GRW and semiclassical gravity. The conclusion is that the relationship between them is neither linear nor unidirectional, but rather multidimensional and certainly bidirectional.

Keywords: foundations of quantum mechanics; philosophy of technology; philosophy of physics; semiclassical gravity; objective collapse theories; measurement problem; quantum experimentation.

Introducción

Uno de los secretos no guardados sobre mecánica cuántica es que la teoría básicamente es incomprensible incluso para los científicos mismos, esto es un corolario del “problema de la medición”. Además, hoy en día, tal vez por ello, existen distintas alternativas e interpretaciones de lo que se conoce como el “formalismo estándar de la mecánica cuántica” (Okon, 2014; Albert, 1992; Maudlin, 2010). Dos ejemplos de otros formalismos son la teoría de Onda Piloto, construida por el físico David Bohm y las llamadas teorías de Colapso Objetivo. Algunas de estas versiones alternativas podrían en principio someterse a pruebas experimentales, con el objetivo de corroborar sus predicciones novedosas. Aunque por ahora no se ha alcanzado el umbral tecnológico para llevar a cabo los experimentos necesarios, también es cierto que no nos encontramos lejos de él. En años próximos se podría alcanzar el desarrollo tecnológico-experimental necesario para someter a prueba algunas de las teorías cuánticas alternativas. En este artículo analizaré la situación actual con respecto a las posibilidades experimentales y tecnológicas que dos teorías particulares: la teoría de GRW con densidad de masa y la teoría de la gravedad semiclásica.

Posiblemente el caso más notable de entre la variada multitud de alternativas al formalismo estándar, sea la teoría GRW, especialmente en su variante conocida como “GRW con densidad de masa” (Albert, 1992; Bassi, 2005; Albert, 2015). Su nombre viene de las iniciales de sus creadores: Carlo Ghirardi, Alberto Rimini y Tullio Weber. Se le considera una de las teorías de colapso objetivo debido a que los estados cuánticos en este formalismo alternativo colapsan espontáneamente por sí mismos, sin la necesidad de apelar a ningún *observador* o *mediciones*. Esta teoría arroja predicciones que la mecánica cuántica estándar no, así

que debería ser posible ponerlas a prueba en este respecto. Para ello es necesario realizar experimentos que requieren nuevas tecnologías aún no desarrolladas (Ghirardi, 1990; Bassi, 2019).

Vale la pena tener en cuenta en este contexto a la teoría de gravedad semiclásica, que está ligada también (pero no tan directamente) con el problema de la medición en mecánica cuántica y que igualmente podría someterse a pruebas experimentales muy pronto (Carlip, 2008; Adler, 2007; Bassi, 2013). Es así que en este aún joven siglo XXI, donde parece que gracias a un nuevo salto tecnológico podría finalmente hallarse un sucedáneo para la tan aquejada teoría cuántica, la filosofía de la tecnología puede aprovechar estos momentos para analizar la relación dinámica que entreteje a teoría, experimentación y desarrollo tecnológico en el ámbito de las ciencias físicas. Mi tesis es que estos componentes forman un círculo de retroalimentación en los casos de GRW y gravedad semiclásica, que lleva al desarrollo de nuevo conocimiento, técnicas y métodos experimentales, con el propósito de autorregularse, complementarse y ponerse a prueba. De cualquier forma, el papel que la tecnología juega para las dos teorías debería ser de sumo interés para la filosofía de la tecnología; además de que la filosofía de la ciencia misma debería prestar más atención a lo que está ocurriendo en este escenario experimental que involucra a los fundamentos de la mecánica cuántica. Primero porque lo que está en juego es de primera importancia para la filosofía de la ciencia y de la tecnología, a saber, la posible aceptación o refutación de dos teorías sobre los niveles más básicos de la naturaleza. La aceptación por parte de la comunidad científica de alguna de estas nuevas teorías implicaría cambios fuertes para las ciencias físicas. También es de gran interés para el filósofo de la ciencia y/o la tecnología porque esto es algo que ocurre ahora mismo, así que es posible hacer un análisis *in situ* de la relación entre teoría y tecnología que tiene lugar para

GRW y gravedad semiclassical, así como la dinámica compleja que se da durante los procesos de falsabilidad y confirmación empírica en el contexto de justificación teórica. Por ello es necesario prestar atención a esta área de las ciencias físicas, justo ahora, desde la perspectiva tanto de la filosofía de la tecnología como de la ciencia.

A continuación, se presentarán dos breves introducciones a ambas teorías, así como los obstáculos experimentales a los que se enfrentan. Para el caso de GRW es necesario además hablar sobre el problema de la medición, que fue la motivación para su desarrollo.

Sobre el problema de la medición

La teoría de la mecánica cuántica siempre ha tenido una serie de controversias que la han atormentado hasta el día de hoy. Los mismos padres de la teoría estaban al tanto de esto, por lo que personajes como Erwin Schrödinger, Louis de Broglie o el mismo Albert Einstein trataron de arrojar luz sobre los puntos polémicos o insatisfactorios del formalismo estándar. Incluso llegaron a postular algunas modificaciones a éste (como la formulación precursora a la teoría de onda piloto de de Broglie). Uno de los aspectos más debatidos de la teoría, así como se formuló en los 1920, es el llamado postulado del colapso. Este axioma se insertó en la teoría para explicar algunos hallazgos experimentales como el hecho de que posteriormente a una medición, un sistema cuántico siempre arroja el mismo resultado encontrado inicialmente. Esto no podía explicarse sin hacer referencia al colapso de la función de onda (el elemento descriptivo de la teoría).

El postulado del colapso también puede invocarse para remediar la existencia de posibles escenarios absurdos predichos por la teoría, como el famoso experimento pensado del gato de

Schrödinger. Este experimento muestra que, si nos apegamos exclusivamente a la evolución temporal impuesta por la ecuación de Schrödinger, entonces la teoría predice que por ejemplo un gato (o cualquier otro objeto macroscópico) puede estar “simultáneamente en dos configuraciones” radicalmente distintas (v.g. “vivo y muerto a la vez”), por no decir mutuamente excluyentes. Este resultado parece inevitable si no apelamos al postulado del colapso según el cual, en algún momento el estado del sistema macroscópico se transforma en solo una de sus dos posibles configuraciones (vivo o muerto). Con esto se lograría salvar los fenómenos y explicar por qué jamás vemos superposiciones macroscópicas¹, pero exactamente en qué momento, bajo qué circunstancias o por cuál motivo precisamente ocurre este colapso, son cuestiones que las ciencias físicas no han resuelto. Todo esta problemática siempre ha sido muy atractiva para la filosofía de la ciencia (en particular la filosofía de la física), porque ésta se interesa no solamente en salvar los fenómenos y encontrarle un uso práctico a la teoría cuántica, sino también extraer de ella una imagen inteligible y filosóficamente satisfactoria del mundo microscópico (por extensión del mundo macroscópico también), algo que la mecánica cuántica estándar, con su ontología ambigua y sus axiomas *ad hoc* ciertamente no ha logrado.

Algunas propuestas para solucionar el problema (de cuándo, cómo y por qué ocurren los colapsos) van desde la interacción entre objetos micro y macroscópicos, hasta la supuestamente necesaria intervención sobre el sistema en cuestión (el gato) por parte de un observador consciente, que serviría de catalizador para el colapso. Lo que uno puede hallar en la bibliografía común es que el colapso ocurre cuando “se hace una medición sobre el sistema”. Pero este

¹ Este punto de hecho no es nada trivial pues gracias a los avances tecnológicos se han podido crear superposiciones cuánticas de objetos cada vez más “grandes” (Beck, 2012).

recurso parece realmente un mecanismo muy *ad hoc*, que además está formulado de forma ambigua: ¿exactamente qué constituye una “medición”?, ¿se requiere de un grado universitario por ejemplo para poder realizar mediciones que colapsen sistemas cuánticos?, ¿no debería la teoría explicar qué ocurre durante un proceso de medición, más que contener esto como un axioma fundamental en su formalismo? Todo esto hace sonar muy poco verosímil el que una medición sea el detonante del colapso de la función de onda, de allí que toda esta problemática también se conozca como el problema de la medición (Okon, 2014; Giulini, 2011; Maudlin, 1995).

Las Teorías de Colapso Objetivo: GRW

La teoría de GRW surgió en la década de los 80 como una posible solución al problema de la medición. El objetivo explícito de la teoría era deshacerse de las posibles superposiciones macroscópicas que el formalismo estándar permitía, como el escenario del gato de Schrödinger. Además de esto la teoría propuesta por los científicos italianos Ghirardi, Rimini y Weber, también buscaba unificar dentro de un solo marco teórico tanto a la física clásica como a la mecánica cuántica².

Para lograr este objetivo dual pero complementario, la teoría de GRW, de manera muy ingeniosa, postuló una modificación a la dinámica de evolución de los estados cuánticos, pero de tal manera

² Para entender mejor este punto debemos recordar que desde los comienzos de la mecánica cuántica se había buscado una manera de reducir ésta a la mecánica clásica. Como decía el mismo Niels Bohr esto era un “obvio requerimiento de la teoría”, pues el éxito de la mecánica clásica *dentro de su ámbito de aplicación* (i.e. para el mundo “macroscópico”) jamás se puso en tela de juicio (Bokulich, 2008). Entonces la mecánica cuántica debía recuperar, en algún límite apropiado, a la física clásica.

que las predicciones de la teoría reprodujeran básicamente todos los resultados ya bien establecidos del formalismo estándar (Ghirardi, 1990; Ghirardi, 1986). Veamos con cuidado en qué consiste esta nueva dinámica.

En la teoría se postulan dos distintas leyes dinámicas para los estados cuánticos. Primero tenemos a la usual evolución del sistema Ψ por la ecuación de Schrödinger

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \hat{H}\Psi ,$$

que constituye la dinámica problemática del formalismo estándar³. Problemática porque es gracias a ella que surgen las superposiciones de los estados macroscópicos y además porque no conlleva ningún tipo de mecanismo que nos pueda dar cuenta de los colapsos de la función de onda.

La segunda ley dinámica es la modificación novedosa de GRW, que es añadir un término estocástico no-lineal a la ecuación de Schrödinger. Esto obliga a la función de onda a decaer o colapsar *por sí sola* o, mejor dicho, de manera espontánea, sin la necesidad de observadores, mediciones, ni ningún otro elemento que pudiera ser criticado como *ad hoc* o extrínseco al formalismo. De manera precisa, lo que se postula es que toda partícula tiene una cierta probabilidad (por unidad de tiempo) de sufrir un colapso, que cambiará el estado de $\Psi(x)$ a $g(x-x_0)\Psi(x)$, donde $g(x-x_0)$ es una gaussiana centrada en x_0 . El efecto de este colapso es concentrar a la función de onda alrededor del punto x_0 , eliminando así situaciones como gatos vivos y muertos al mismo tiempo o cualquier otro tipo de posible superposición cuántica⁴. Entonces

³ Explícitamente, si el estado inicial del sistema es $\Psi(x,0)$, entonces la ecuación de Schrödinger implica que el estado evolucionará así

$$\square \Psi(x,t) = \exp(-it\hat{H}/\hbar)\Psi(x,0).$$

⁴ Este punto es algo delicado, pues hay quienes critican que en realidad no se han eliminado las superposiciones. La discusión en torno a esto se conoce como el “problema de las colas” y/o el problema de las “colas estructuradas” (McQueen,

dentro de la teoría de GRW conviven simultáneamente dos dinámicas: la evolución de la función de onda normalmente está dada por la ecuación de Schrödinger y de vez en vez ésta sufrirá un colapso espontáneo de manera objetiva. El punto más crucial de la teoría es que si en lugar de tener solamente una partícula con una frecuencia de colapso α , tenemos un conjunto de N partículas (que pudieran conformar un objeto macroscópico) entonces la frecuencia de colapso para la función de onda del sistema completo será $N\alpha$. Lo cual implica que incluso si la frecuencia de colapso individual fuera muy pequeña (como veremos que de hecho se ha postulado que debería ser), aún así para objetos macroscópicos la frecuencia de colapso sería considerablemente mucho más alta (de manera típica un objeto macroscópico puede contener $N = 10^{24}$ partículas). Otro aspecto muy importante de GRW es que se necesitan introducir dos nuevas constantes de la naturaleza en la teoría. Una constante α para fijar la probabilidad de que ocurra un colapso y otra constante γ , que determina el ancho de la función gaussiana⁵ $g(x-x_0)$. Estas dos constantes son muy interesantes desde la perspectiva de la filosofía de la ciencia pues sus valores exactos se han intentado *delimitar* mediante técnicas empíricas. La metodología aquí consiste en encontrar límites superiores e inferiores para las constantes del modelo. Los experimentos utilizados se clasifican como interferométricos y los no interferométricos. La estrategia es crear superposiciones de cuerpos cada vez más grandes y cuantificar su grado de interferencia. Específicamente estos experimentos se basan en interferometría

2015). Ya que estos problemas se encuentran al margen de los desarrollos tecnológicos que de hecho se están considerando para someter a prueba la teoría, no hará entonces falta que reparemos en ellos aquí.

⁵ Cualquier función gaussiana se puede escribir como

$$g(x) = A \exp\left[-\frac{1}{\gamma}(x-x_0)^2\right],$$

donde x_0 , γ y A son constantes reales.

atómica y molecular, así como el entrelazamiento cuántico de diamantes. Los experimentos no interferométricos en cambio utilizan otra predicción de la teoría según la cual el centro de masa debe presentar un movimiento Browniano, las técnicas utilizadas involucran átomos fríos, sistemas optomecánicos, la medición de rayos-X y la excitación de fonones en cristales (Bassi, 2019; Lee, 2011; Kovachy, 2015; Adler y Vinante, 2018). Es necesario enfatizar que los posibles valores de estas supuestas nuevas constantes de la naturaleza se han obtenido por un método eliminativista, es decir, que contemplando el espacio de posibles valores para éstas utilizando resultados empíricos, se descartan o eliminan ciertos conjuntos de valores. Su introducción en la teoría así como el método utilizado para especular sobre su verdadero valor, suscita fácilmente varias preguntas al respecto como: ¿qué tipo de conocimiento nos brindan (teórico, práctico, experimental, tecnológico, combinaciones de éstos, etc.)?, ¿en qué sentido pueden considerarse distintas a las mediciones típicas de otras constantes de la naturaleza?, ¿qué implicaciones tienen estas técnicas para los procesos científicos que involucran al círculo de retroalimentación experimental/tecnológico/teórico?

Un último ingrediente que se le añadió a la teoría varios años después de que se diera a conocer, fue la especificación de cómo construir una densidad o distribución de masa $m(x, t)$ en el espacio-tiempo físico ordinario. Fue concretamente GianCarlo Ghirardi quien reconoció la necesidad de introducir un componente adicional a su teoría, para remediar lo que ahora se reconoce como una carencia ontológica tanto en GRW como en el formalismo estándar (Ghirardi, 1995). Recordemos que la interpretación usual de la función de onda es la siguiente: si el estado de un sistema cuántico es $\Psi(x, t)$, entonces la probabilidad de que al realizar una medición al tiempo t se encuentre al sistema en $x + dx$, está dada por $|\Psi(x, t)|^2$. La función de onda podría entonces interpretarse

como una distribución de probabilidad en el espacio ordinario, lo cual aún estaría sujeto a fuertes críticas por tener que hacer uso de mediciones u observadores conscientes para hacer sentido de su significado, aunque posiblemente no sería tan devastador para la teoría. Sin embargo, no es posible extender esta interpretación para el caso en que se tienen más de una partícula, pues en ese caso $|\Psi(x, t)|^2$ no está definida sobre el espacio físico tridimensional ordinario, sino sobre el espacio de configuraciones del sistema. Por tanto, es imposible ofrecer una ontología espacio-temporal para la función de onda desde el formalismo estándar. Este problema es lo que se intentó resolver al introducir una densidad de masa que sí se postula en el espacio-tiempo físico.

Así GRW con densidad de masa reproduce los resultados estándar (requisito para cualquier formalismo alternativo candidato a sucesor), a la vez que resuelve el problema de la medición y la falta de ontología en la mecánica cuántica estándar. Pero además GRW hace predicciones novedosas, es decir, predice resultados que la teoría estándar no hace. Esto permitiría en principio hacer las pruebas experimentales pertinentes para concluir cuál de las dos teorías es correcta. Aquí también el conocimiento tecnológico es llamado a escena, pero esta vez para poner a prueba la teoría. Sin embargo, como se mencionó en la introducción, estas necesarias nuevas tecnologías aún no han sido desarrolladas, aunque es concebible que tengamos acceso a ellas en unos años. Por ello es importante abordar lo que está ocurriendo en este campo de la física desde la filosofía de la tecnología y la filosofía de la ciencia, pues nos hallamos frente a un potencial cambio paradigmático, que vendrá de las manos de los nuevos desarrollos tecnológicos. El análisis que la filosofía de la tecnología puede brindar a estas cuestiones es de gran valor y serviría para esclarecer subsecuentes posibles discusiones sobre cómo deben de entenderse los resultados experimentales, cómo afinar o mejorar los propósitos de los

experimentos, así como entender mejor la relación entre tecnología, teoría y experimentación. La filosofía de la ciencia también puede enriquecerse mucho de estudiar con cuidado exactamente cómo ha sido el proceso de verificación y experimentación para GRW, que podría ser un caso de estudio de gran envergadura pues debería contemplar varias décadas de problematización filosófica y conceptual por parte de científicos y filósofos de la ciencia, que han culminado en una nueva teoría alternativa que se busca poner a prueba desde años recientes, es decir, todo el fenómeno teórico que ocurre durante el contexto de justificación puede y debe ser abordado por la filosofía de la ciencia en este caso específico de GRW con densidad de masa.

La Gravedad Semiclásica

Junto a GRW resulta muy interesante también el caso de la teoría de Gravedad Semiclásica. Esta teoría es un intento por combinar en un sólo formalismo a la gravedad einsteiniana y a la mecánica cuántica. En la gravedad semiclásica los estados cuánticos evolucionan de acuerdo a la teoría de campos en espacio-tiempos curvos, pero la ecuación de la relatividad general para el tensor de Einstein G_{ab} y el tensor de momentum-energía T_{ab} se modifica así,

$$G_{ab} = 8\pi \langle T_{ab} \rangle_{\psi},$$

donde el tensor de energía-momento clásico T_{ab} es ahora un operador. Partiendo de esta ecuación es posible mostrar que, en el límite de interacciones gravitacionales débiles, la ecuación dinámica para la función de onda es la usual ecuación de Schrödinger, más un nuevo término no lineal

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \hat{H}\Psi + m\Phi(x)\Psi,$$

donde el potencial gravitacional $\Phi(x)$ cumple $\nabla^2 \Phi(x) = 4\pi Gm|\Psi|^2$. Esta nueva ecuación se conoce como la ecuación de

Schrödinger-Newton (Carlip, 2008).

La gravedad semiclásica puede ser abordada desde varios puntos por la filosofía de la tecnología y la filosofía de la ciencia. Primero se tiene algo análogo a GRW pues la teoría también podría muy pronto someterse a pruebas experimentales. La gravedad semiclásica predice comportamientos distintos a la evolución dada por la ecuación de Schrödinger. En particular (de acuerdo con modelos numéricos) se predice que un sistema con masa m superior a una “masa crítica” m_c perdería por lo menos parte de su comportamiento cuántico. En otras palabras, la teoría predice un límite en términos de la masa, después del cual las cosas “dejarían de ser cuánticas”, que dicho sea de paso, va bastante bien para eliminar las superposiciones macroscópicas. La tecnología necesaria para poner a prueba este “límite cuántico” consta de interferómetros moleculares, cuyo reto sería básicamente realizar experimentos de difracción con moléculas más pesadas, relativamente a las capacidades actuales (Carlip, 2008; Adler, 2007; Giulini, 2011). En este aspecto la relación entre teoría, tecnología y experimentación es la misma que para GRW, pues para ambas es necesario crear nueva tecnología que nos permita poner a prueba sus predicciones novedosas. Por tanto, es igualmente importante (por los mismos motivos), comenzar a estudiar dicha relación desde la filosofía de la ciencia y de la tecnología en el caso de gravedad semiclásica.

Otro punto también muy interesante de la gravedad semiclásica es que fue gracias a modelos numérico-computacionales que los científicos formularon el escenario hipotético que permite someter a prueba la teoría (i.e. experimentos que pudieran corroborar el valor para la masa crítica m_c). Apuntando hacia una estrecha relación entre la regulación de la teoría por parte de nueva tecnología emergente: de no ser por las técnicas de modelaje computacional no se habría dado con este resultado teórico. Sobre

este punto es necesario un análisis cuidadoso en términos del papel que han jugado los métodos numéricos. Por un lado, está la cuestión de si estaríamos o no frente al primer caso en que uno de estos métodos ha sido la clave para poner a prueba los fundamentos de una teoría científica. Por otro lado, es necesario profundizar en toda la discusión que existe sobre el tema de los modelos computacionales-numéricos y su uso dentro de las ciencias. Aquí estaríamos hablando de modelos que han informado a la teoría con valores precisos para m_c . Y esto último es tal vez lo más importante que podemos apreciar en el caso de la gravedad semiclásica: no la supuestamente común relación donde la tecnología es un producto secundario de la teoría, sino por el contrario, aquí los métodos tecnológicos serían los agentes que producen nuevo conocimiento teórico.

Así podemos ver un flujo que va del conocimiento tecnológico hacia el conocimiento teórico *modelos computacionales* $\Rightarrow m_c$, volviendo luego al campo de la tecnología (que aún hace falta desarrollar para comprobar los nuevos resultados) y que en principio concluiría con la aceptación o rechazo de la teoría de gravedad semiclásica después de realizar los experimentos relevantes.

Discusión

Recapitulando brevemente la sección anterior, vimos que en el caso de GRW la tecnología ha jugado un doble papel, primero a través de métodos experimentales cuyo objetivo es determinar las nuevas constantes α , γ , para después volverse una herramienta imprescindible en la confirmación de la teoría misma. Concretamente se busca recrear escenarios experimentales que no predice el formalismo estándar pero sí GRW, utilizando tecnología

hecha con este fin. Como mencionamos arriba el objetivo de los experimentos (interferométricos) es lograr la superposición cuántica de cuerpos cada más grandes y/o pesados porque de acuerdo con la teoría existe un límite después del cual ésta se pierde. Una vez lograda la superposición se somete al sistema a un proceso de interferencia, que es un fenómeno bien conocido de la teoría cuántica. En algún momento los patrones de interferencia deberían borrarse y se recuperaría el comportamiento clásico de las partículas. Uno de estos experimentos por ejemplo utiliza como fuente alrededor de 10^5 átomos de ^{87}Rb super enfriados usando trampas magneto-ópticas. La nube de átomos es manipulada posteriormente con la técnica de secuencias espejo para prepararla en una superposición de momento lineal (i.e. con velocidades colineales, pero en dirección opuesta). Después se hacen interferir las dos ramas de la superposición con divisores de haces y se registra el resultado con cámaras CCD. En este caso las dos ramas lograron estar separadas 54 centímetros durante 1 segundo (Kovachy, 2015).

Es de primera importancia estudiar no tanto la naturaleza de estas nuevas tecnologías, sino la relación que guardan con su correspondiente elemento teórico. La naturaleza por ejemplo de un interferómetro puede ser de interés en otro contexto, pero aquí nos limitamos a considerarlo simplemente como tecnología, posiblemente cargada de teoría claro, que ya es el terreno propiamente de su relación con la mecánica cuántica estándar y GRW. Así pues, consideramos al igual que P. Kroes, que la función de una cierta tecnología es la característica más relevante para su estudio, pues es lo que le distingue de un simple artificio sin ninguna función o posible utilidad (Kroes, 2003). En este respecto, llama el interés que las nuevas tecnologías que se están desarrollando tengan como función el poner a prueba teorías científicas. Esto nos levanta algunas dudas como qué ocurriría si la

teoría fuera desmentida en última instancia (i.e. que los resultados experimentales fueran negativos) ¿Querría eso decir que entonces las nuevas tecnologías no “cumplirían con su función”?, ¿cómo podrían cumplir función alguna operando bajo una teoría refutada experimentalmente? Esto sería similar a lo que ocurrió con los famosos experimentos de Michaelson y Morley a finales del siglo XIX, cuyo objetivo era comprobar la existencia del “éter luminífero”. Los resultados fueron negativos para dichos experimentos (i.e. no se pudo constatar la existencia del éter), por lo que esta teoría se vio en serios problemas, desatando así la búsqueda por nuevos esquemas que no involucraran al éter y que culminaron con la teoría de la relatividad especial de Einstein (Griffiths, 1999). La tecnología utilizada por Michaelson y Morley entonces no pudo cumplir con su función de detectar el éter, sino que sirvió para desmentir su existencia; así también podríamos tener que los experimentos para poner a prueba GRW o gravedad semiclásica tuvieran resultados negativos y por tanto que la nueva tecnología empleada fallara en su función de comprobar las predicciones novedosas de las dos teorías.

De cualquier manera, podríamos decir que si el objetivo con el cual fue creada la nueva tecnología era sólo determinar si las teorías son viables o no, entonces sí que hubiera funcionado para esto (suponiendo resultados negativos). Pero aun así parece problemático afirmar la existencia de tecnología diseñada gracias a una teoría falseada (que no es reducible desde otro marco teórico aceptado por la comunidad de científicos) ¿Será posible obtener tecnología perfectamente funcional que opere bajo la suposición de que existen masas negativas o partículas que viajan más rápido que la luz?

En caso de que los resultados fueran positivos, es decir si los experimentos muestran que se cumplen las predicciones novedosas, entonces la nueva tecnología habría cumplido con una función

doble: primero la de recrear el escenario empírico predicho por GRW y segundo la de poner a prueba a la teoría. ¿Se tendría entonces un claro ejemplo de cómo la tecnología sirve para “crear los fenómenos” (con los cuales además se establece así la teoría como empíricamente más sólida)? Me parece que la respuesta es sí, los fenómenos que tendrían lugar durante la experimentación serían tecnológicos en tanto que se ha requerido de tecnología altamente especializada y diseñada exprofeso para generarlos. Pero esto por supuesto no impediría derivar la conclusión de que la teoría sí aplica en dicho escenario experimental: por suposición la teoría habría predicho resultados que de hecho sí se obtuvieron, dándole entonces una realidad empírica irrefutable.

Con respecto de las técnicas experimentales para determinar el valor numérico de las constantes α , γ , ocurre algo semejante pues la tecnología utilizada tiene como función delimitar el espacio de sus posibilidades, partiendo desde el marco de GRW. Así que en este sentido toda la discusión sobre la corroboración de la teoría y la tecnología involucrada aplica igualmente. Lo que es distinto, sin embargo, es que las constantes podrían no formar ningún tipo de conocimiento, si la teoría no pudiera verificarse. Así que puede resultar extraño hablar de cómo los instrumentos tecnológicos nos permiten extraer información empírica sobre estos elementos teóricos que bien pudieran ser completamente descartados por la comunidad de científicos en el futuro, como el calórico y el éter. Mientras la teoría aún no forme parte del canon científico, por así decirlo, es difícil precisar qué tipo de información obtenemos cuando realizamos experimentos para medir el valor de los parámetros que postula.

Pasando ahora a la gravedad semiclásica, aquí también tenemos que las diferentes tecnologías hacen contacto con la teoría en dos sitios. Uno es los métodos computacional-numéricos que predicen el valor de la masa crítica m_c y otro el desarrollo de instrumentos

experimentales nuevos que puedan corroborar empíricamente el valor de dicha masa. Sobre el primero de estos parece interesante cómo la teoría ha sido informada por los artefactos tecnológicos. El problema numérico es resolver la ecuación de Schrödinger - Newton, que es una ecuación diferencial parcial no-lineal; el esquema utilizado para esto en (Carlip, 2008) y (Salzman, 2006) fue el llamado método de Caley (Press, 1992). Lo que se tiene entonces es una instancia de lo que E.F. Keller considera como una extensión o amplificación de un “experimento pensado”, partiendo de la idea de los métodos numérico-computacionales como “experimentos en teoría”, de acuerdo con el matemático Stanislaw Ulam. Efectivamente aquí el método de Caley es usado debido a la alta complejidad que representa la ecuación de Schrödinger-Newton para resolverse analíticamente, en ese sentido su uso caería dentro de la definición (1) de Keller (Keller, 2003).

Sobre el estatus epistémico de la masa crítica m_c se tiene básicamente lo mismo que para las nuevas constantes. Solo es necesario recordar dos cosas: primero que ésta no es una constante de la naturaleza, es más bien un límite como lo puede ser la velocidad terminal o la velocidad de escape de un objeto en un potencial gravitacional, por ejemplo. La segunda diferencia es que los métodos experimentales son distintos, en el caso de GRW son principalmente experimentos de interferometría, mientras que para la masa crítica son técnicas numéricas.

Por último, los experimentos necesarios para poner a prueba las predicciones de la teoría, i.e. para corroborar el valor de m_c , después del cual el sistema colapsaría espontáneamente, involucran fenómenos de difracción molecular y su relación con la teoría de gravedad semiclásica es la misma relación que los dispositivos guardan para GRW. En ambos casos se requiere de nuevos desarrollos que puedan poner a prueba las predicciones novedosas, pues simplemente la tecnología actual no nos lo permite. La

función de los dispositivos de difracción molecular en este caso puede analizarse bajo el mismo esquema que presentamos para GRW y su instrumentación respectiva.

Formulo la tesis de que las diferentes tecnologías y avances experimentales juegan fundamentalmente dos papeles en los dos casos que analizamos: por un lado, pueden nutrir o alimentar a las teorías con nueva información que ayude a reformular o refinar éstas, y por otro lado son los actores decisivos en el contexto de su falsabilidad. Más aún, también es cierto que las teorías han influido en la creación de nuevas tecnologías, ya que éstas se vuelven necesarias para cumplir su segundo rol verificacionista. Podemos ver todo esto claramente en el caso de GRW con densidad de masa, donde la trayectoria por la ruta epistémica comienza con los datos empíricos provistos por los avances tecnológicos, que dotan a la teoría con información sobre las constantes α , γ ; posteriormente (en dirección perpendicular), el conocimiento teórico, en forma de predicciones novedosas, nos exhorta y casi demanda a mejorar, refinar y expandir la esfera del conocimiento tecnológico, con el propósito de verificar a la teoría. El último peldaño en esta progresión consistiría en la realización de los experimentos necesarios para la falsabilidad de GRW.

Con la teoría de gravedad semiclásica se tiene algo análogo. Aquí también la teoría ha sido informada por el conocimiento tecnológico, mediante modelos y análisis numérico-computacionales. Esto a su vez exige la creación de nuevos métodos experimentales con los cuales poner a revisión final los hallazgos de la teoría. También para la gravedad semiclásica se podría argumentar que los parámetros aún no corroborados tal vez no sean conocimiento científico. Sin embargo, debemos notar que los parámetros arrojados por las técnicas numéricas y computacionales no son nuevas constantes de la naturaleza, sino un límite putativo en la masa de los sistemas, después del cual debería

perderse el comportamiento cuántico.

Vale mucho la pena decir algo sobre la dimensión sociológica de todo lo que está ocurriendo en el área de los fundamentos de la física y la mecánica cuántica, así como aquí los hemos presentado. Una primera pregunta que surge naturalmente es ¿por qué no se le presta más atención, tiempo y recursos al objetivo de corroborar nuevas teorías cuánticas? Sería muy interesante realizar un estudio sobre los recursos destinados a este objetivo en comparación con otras áreas de la física. Uno quisiera creer que los científicos tienen mucho interés en algo tan potencialmente monumental como lo sería encontrar modificaciones profundas a la teoría cuántica. Sin embargo, sabemos que algo como esto no parece haber sido el caso, por lo menos desde la época posterior a la segunda guerra mundial. Desde entonces los intereses y recursos en las ciencias físicas parecen haberse concentrado en programas y políticas pragmático-instrumentalistas, abandonando así la cara “teórico-fundamental” de esta ciencia. Evidencia clara de esto es el fuerte rechazo por parte de la comunidad (encabezada y motivada por R. Oppenheimer), que sufrieron los trabajos del célebre físico David Bohm en esta área de la física. Un excelente recuento introductorio de la sinuosa senda que ha sido la historia de los fundamentos de mecánica cuántica, el problema de la medición, las teorías alternativas, así como la estrecha relación entre intereses industrial-militar-políticos y el desarrollo teórico-tecnológico en las ciencias físicas del siglo XX es el libro de Adam Becker “What is Real?” (Becker, 2018).

Conclusiones

Hemos visto cómo el desarrollo tecnológico se relaciona multi-dimensional y no-linealmente con la formulación y falsabilidad de

las teorías científicas. Estudiamos dos ejemplos en los cuales esto se pone de manifiesto: la teoría de GRW con densidad de masa y la teoría de la gravedad semiclásica. En ambos casos la tecnología involucrada juega varios papeles en la creación o adquisición de conocimiento científico. Esto hace ostensible nuestra hipótesis de trabajo, según la cual, el conocimiento tecnológico se entrelaza dinámicamente con las teorías científicas: nutriéndolas de información, de nuevas posibilidades, refinándolas o incluso refutándolas. Después se invierte esta relación de tal manera que las teorías demandan nuevos métodos experimentales y tecnológicos, que deberán ser empleados en el contexto de falsabilidad de las teorías. La dinámica es entonces de carácter complejo, pero a primer orden parece formar un círculo de retroalimentación en el cual la teoría se informa de los desarrollos tecnológicos y de igual forma éstos son construidos a partir de las teorías correspondientes.

Los resultados que arrojen los experimentos de GRW y la gravedad semiclásica, una vez que la tecnología necesaria para ello se vuelva disponible, podrían tener un gran impacto para la física moderna y la filosofía de la física. En caso de que GRW no pudiera ser corroborada experimentalmente, i.e. si los resultados fueran negativos, entonces el área de fundamentos de mecánica cuántica se encontraría con un número menor de posibles teorías alternativas viables, quedando solamente la mecánica de Bohm (dejando de lado la teoría de “Muchos Mundos”, cuya veracidad por el momento no se puede someter a pruebas experimentales). La teoría de la mecánica cuántica de Bohm también arroja predicciones distintas a la cuántica estándar y es igualmente posible que en el futuro podamos ponerlas a prueba experimental. Nos encontramos pues en un momento de mediana efervescencia teórica y tecnológica en esta rama de la física, por lo que es imprescindible seguir de cerca, desde la filosofía de la ciencia y también de la

tecnología, todo lo que ocurra con las nuevas tecnologías y sus correspondientes experimentos, que serían potencialmente un cambio revolucionario en la mecánica cuántica, nuestra teoría científica más fundamental de la materia.

Referencias

- Adler, S. (2007). Comments on proposed gravitational modifications of Schrödinger dynamics and their experimental implications. *J. Phys. A.*, 40, 755–764.
- Adler, S. L., & Vinante, A. (2018). Bulk heating effects as tests for collapse models. *Physical Review A* 97, 052119.
- Albert, D. (1992). *Quantum Mechanics and Experience*. Harvard University Press.
- Albert, D. (2015). *After Physics*. Harvard University Press.
- Bassi, A., et al. (2005). Towards Quantum Superpositions of a Mirror: An Exact Open System Analysis. *Physical Review Letters*, 94(3), 030401.
- Bassi, A., et al. (2013). Models of wave-function collapse, underlying theories, and experimental tests. *Reviews of Modern Physics* 85(2), 471–527.
- Bassi, A. (2019). Current tests of collapse models: How far can we push the limits of quantum mechanics? *Optical Society of America*.
- Beck, M. (2012). *Quantum mechanics. Theory and experiments*. Oxford University Press.
- Becker, A. (2018). *What is Real? The Unfinished Quest for the Meaning of Quantum Physics*. Basic Books.
- Bokulich, A. (2008). *Reexamining the Quantum-Classical Relation: Beyond Reductionism and Pluralism*. Cambridge University Press.
- Carlip, S. (2008). Is quantum gravity necessary? *Classical and*

Quantum Gravity, 25.

Ghirardi, G., *et al.* (1986). Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems. *Physical Review D*, 34, 470.

Ghirardi, G. (1990). Old and New Ideas in the Theory of Quantum Measurement. In A. Miller (Ed.), *Sixty-Two Years of Uncertainty* (pp. 167–192). Plenum Press.

Ghirardi, G., R Grassi, & Venatti, F. (1995). Describing the Macroscopic World: Closing the Circle within the Dynamical Reduction Program. *Foundations of Physics*, 25(1), 5–38.

Giulini, D., & Grossardt, A. (2011). Gravitationally induced inhibitions of dispersion according to the Schroedinger-Newton equation. *Classical and Quantum Gravity*, 28.

Griffiths, D. (1999). *Introduction to Electrodynamics*. Prentice Hall.

Keller, E. (2003). Models, Simulation and “Computer Experiments”. In H. Radder (Ed.), *The Philosophy of Scientific Experimentation*. University of Pittsburgh Press.

Kovachy, T., *et al.* (2015). Matter Wave Lensing to Picokelvin Temperatures. *Physical Review Letters*, 114.

Kroes, P. (2003). Physics, Experiments and the Concept of Nature. In H. Radder (Ed.), *The Philosophy of Scientific Experimentation*. University of Pittsburgh Press.

Lee, K., *et al.* (2011). Entangling Macroscopic Diamonds at Room Temperature. *Science*, 334, 1253.

Maudlin, T. (1995). Three Measurement Problems. *Topoi*, 14.

Maudlin, T. (2010). Can the world be only wavefunction? In S. Saunders, J. Barret, A. Kent, & D. Wallace (Eds.). *Many Worlds. Everett, Quantum Theory and Reality* (pp. 121-144). Oxford University Press.

McQueen, K. (2015). Four Tails Problems for Dynamical Collapse Theories. *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics* 49, 10-18.

- Okon, E. (2014). El problema de la medición en mecánica cuántica. *Revista Mexicana de Física E*, 60, 130–140.
- Press, W., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A., & Vetterling, W. T. (1992). *Numerical Recipes in C*. Cambridge University Press.
- Salzman, P. (2006). A possible experimental test of quantized gravity. *arXiv:gr-qc/0606120*.

