RIDAA
Repositorio Institucional
Digital de Acceso Abierto de la
Universidad Nacional de Quilmes

Universidad
Nacional
de Quilmes

López, Cristian

¿Es posible definir una flecha cuántica del tiempo mediante la hipótesis del colapso?

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Argentina.
Atribución - No Comercial - Sin Obra Derivada 2.5
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/ar/

Documento descargado de RIDAA-UNQ Repositorio Institucional Digital de Acceso Abierto de la Universidad Nacional de Quilmes de la Universidad Nacional de Quilmes

Cita recomendada:
López, C. y Fortin, S. (2019). ¿Es posible definir una flecha cuántica del tiempo mediante la hipótesis del colapso? Metatheoria, 9(2), 69-82. Disponible en RIDAA-UNQ Repositorio Institucional Digital de Acceso Abierto de la Universidad Nacional de Quilmes http://ridaa.unq.edu.ar/handle/20.500.11807/2540

Puede encontrar éste y otros documentos en: https://ridaa.unq.edu.ar

Universidad Nacional de Quilmes
Roque Sáenz Peña 352 // Bernal
Buenos Aires // Argentina
t.: (+41 11) 4365 7100
f.: (+54 11) 4365 7101
info@unq.edu.ar

¿Es posible definir una flecha *cuántica* del tiempo mediante la hipótesis del colapso?*

Is It Possible to Establish a *Quantum* Arrow of Time Based on the Collapse Hypothesis?

Cristian López†
Sebastian Fortin‡

Resumen

El problema de la flecha del tiempo, desde la perspectiva de la filosofía de la física, busca establecer si es posible fundamentar nuestras intuiciones de un tiempo asimétrico a partir del carácter asimétrico de las leyes físicas fundamentales, en particular, a partir de la propiedad de invariancia temporal. En mecánica cuántica se ha argumentado que es posible fundamentar una flecha del tiempo apelando a las nociones de 'colapso' o 'reducción' del estado o de la función de onda' al llevar a cabo procesos de medición: la hipótesis del colapso constituiría una ley fundamental de la teoría que es no invariante ante inversión temporal, introduciendo una asimetría objetiva en el mundo físico: los sistemas colapsan, pero no "descolapsan". En este trabajo argumentaremos contra una flecha del tiempo cuántica introducida mediante la noción de colapso.

Palabras clave: flecha del tiempo - hipótesis del colapso - mecánica cuántica - medición

Abstract

The problem of the arrow of time, from a physical point of view, seeks to ground our temporal intuitions on the asymmetrical features of the physical laws, particularly, based on the temporal invariance property. Within quantum mechanics it has been argued that is possible to establish an arrow of time turning to "the collapse hypothesis" or "the reduction of the wave-function", especially when measurement processes are brought about: the collapse hypothesis would be a non-invariant law under the time reversal operation belonging to the quantum theory. This fact would allow establishing an objective asymmetry in the physical world: quantum systems collapse but not discollapse. The aim of this work is to argue that this approach proves to be unsuccessful, pointing out that it seems not possible to ground temporal asymmetry on the collapse hypothesis.

Keywords: arrow of time - collapse hypothesis - quantum mechanics - measurement

* Recibido: 27 de mayo de 2018. Aceptado con revisiones: 13 de agosto de 2018.
† Universidad de Buenos Aires/CONICET. Para contactar al autor, por favor, escribir a: lopez.cristian1987@gmail.com.
‡ CONICET/FCEN, Universidad de Buenos Aires. Para contactar al autor, por favor, escribir a: sfortin@conicet.gov.ar.
Metatheoria 9(2)(2019): 69-82. ISSN 1853-2322. eISSN 1853-2330.
© Editorial de la Universidad Nacional de Tres de Febrero. Publicado en la República Argentina.

1. Introducción

El tiempo parece exhibir la propiedad de *asimetría*: si dos sucesos no son simultáneos, entonces uno es anterior al otro, es decir, existe entre ellos una relación asimétrica y es posible definir entre ellos una direccionalidad. Pero, ¿cuál es la naturaleza de esta asimetría; es acaso una propiedad esencial del mundo físico o una mera apariencia empírica? Las investigaciones en el contexto de la filosofía de la física buscaron encontrar una asimetría material como correlato y fundamento de la asimetría temporal que se nos presenta, permitiendo –al menos en principio– un abordaje del problema de la flecha del tiempo a partir de la estructura nomológica de alguna teoría física. Pero, el formalismo de las teorías físicas actualmente vigentes, ¿permite justificar la asimetría temporal manifiesta?

En general, la estrategia más utilizada consiste en encontrar leyes que sean no invariantes ante el operador de inversión temporal, como reflejo formal de una asimetría temporal recogida por la teoría. El operador de inversión temporal, **T**, lleva a cabo la transformación T: $t \rightarrow -t$ y se aplica sobre las ecuaciones de la teoría, transformando además todas las variables dinámicas definidas en función de t. Si las ecuaciones son invariantes ante el operador de inversión temporal (*i.e.* T-invariantes), entonces sus soluciones conforman un par de soluciones temporalmente espejadas o gemelos temporalmente simétricos (T-simétricos). En cambio, si la ecuación es no invariante ante el operador de inversión temporal (*i.e.* no T-invariante), uno de los gemelos T-simétricos no surge, obteniendo soluciones solamente en un sentido temporal. Esto condujo a que se evaluara, en el contexto de cada teoría física, si sus ecuaciones fundamentales eran o no invariantes ante el operador **T**, como manera de determinar si la teoría recogía (o no) una dirección temporal.

En el presente trabajo abordaremos esta problemática en el contexto de la mecánica cuántica no relativista. En particular, algunos autores (Price 1996, Albert 2000, Penrose 1989, Callender 2000, Ellis 2013) han argumentado que es posible fundamentar una flecha del tiempo en el contexto de la mecánica cuántica no relativista, estableciendo la existencia de una flecha *cuántica* del tiempo: el fenómeno del 'colapso' o la 'reducción' del estado de la función de onda' introducen una asimetría manifiesta en la teoría, ya que los sistemas colapsan, pero no descolapsan. Esta asimetría permitiría fundamentar la asimetría temporal en el mundo cuántico. Nuestro objetivo es argumentar contra esta posición (que en adelante llamaremos "enfoque de asimetría temporal por colapso"); en particular, mostraremos que la hipótesis (o ley) del colapso –de la cual depende esencialmente el argumento de este enfoque– no es una hipótesis o ley asumida en todas las interpretaciones de la mecánica cuántica, y de hecho, señalaremos que tenemos buenos motivos para no asumirla. Luego, llevaremos a cabo otras críticas mostrando que, aun asumiendo la hipótesis del colapso, el enfoque resulta insatisfactorio a la hora de definir una flecha del tiempo en el marco de la mecánica cuántica.

Para alcanzar nuestro objetivo y defender nuestro punto de vista, el trabajo se articulará de la siguiente manera: en la sección 2, presentaremos de manera general el problema de la flecha del tiempo en filosofía de la física, tal como será asumido en este trabajo; en la sección 3, presentaremos el clásico problema de la medición en mecánica cuántica y cómo la hipótesis del colapso es introducida para dar una respuesta a este problema; en la sección 4, expondremos la tesis y argumentos del enfoque de asimetría temporal por colapso; en la sección 5, daremos nuestros argumentos discutiendo este enfoque y por qué creemos que no resulta adecuado a la hora de abordar el problema de la flecha del tiempo en física, particularmente, en el ámbito de la mecánica cuántica. Finalmente, ofreceremos nuestras conclusiones.

2. El problema de la flecha del tiempo en filosofía de la física

Intuitivamente, tenemos la impresión de que el *tiempo pasa*. Pero, ¿qué fundamento tiene tal impresión? ¿Qué significa que el *tiempo pasa*? ¿Hay una diferencia sustancial entre el pasado y el futuro?

De manera evidente, adjudicamos al pasado ciertas propiedades que no adjudicamos al futuro. Por una parte, el pasado se nos muestra fijo e inalterable. No podemos –al menos todavía– viajar al pasado y modificar la fecha de nuestro nacimiento, los errores cometidos o alguna clase de acontecimiento. Los eventos ubicados en el pasado parecen estar existencialmente determinados (Sklar 1974, p. 353). Sin embargo, consideramos al futuro de una manera diferente: naturalmente, no pensamos que los sucesos que acontecerán están existencialmente determinados: ¿cuándo será nuestra muerte? ¿Cuál será el próximo número de la lotería? Desafortunadamente, no lo sabemos. El futuro se presenta como mera posibilidad, indeterminado y abierto.

Por otra parte, la manera en la que accedemos cognoscitivamente al pasado y al futuro también presenta grandes diferencias. Conocemos la fecha de nuestro nacimiento, conocemos que en una fecha determinada un suceso bien definido cambió nuestras vidas, probablemente no sepamos la fecha de un acontecimiento político importante, pero, sin embargo, sabemos que está ahí y que, en principio, podríamos conocerla. Pero, ¿podemos conocer el futuro? No pensamos ni hablamos de esa manera, al menos, no de la misma manera en la que pensamos y hablamos cuando queremos conocer el pasado: intuimos o adivinamos que ciertos sucesos podrían pasar, pero no los conocemos ni podemos afirmar que en algún sentido están allí. En resumen, en nuestro lenguaje, en nuestras pretensiones cognoscitivas y en nuestra manera de concebir la existencia misma, adjudicamos distintas propiedades al pasado y al futuro. Por ello mismo decimos que mantienen entre sí una relación asimétrica. El tiempo, por lo tanto, parecer tener la propiedad de *asimetría*.

Sin embargo, la asimetría adjudicada al tiempo no agota la idea intuitiva de que el *tiempo pasa*. En algún momento del pasado hemos nacido y, en algún momento del futuro, moriremos. Y entre ambos instantes transcurren los acontecimientos de nuestra existencia, la vida *pasa*. Nuestra intuitiva representación del mundo conduce a considerar que el tiempo fluye en una única dirección posible: desde el pasado hacia el futuro, pero nunca en la dirección inversa. Nacemos y luego morimos, pero nunca sucede lo contrario. El tiempo, además de la propiedad de asimetría, parece tener la propiedad de tener una *dirección privilegiada*.

Si, como ha sostenido David Hume, la investigación filosófica no es sino la reflexión sobre nuestras ideas e impresiones cotidianas, podemos preguntar: ¿tiene el tiempo, *realmente*, estas propiedades? ¿Cómo podemos fundamentar esta idea intuitiva que tenemos acerca del tiempo? ¿Existe el flujo del tiempo como una característica *objetiva* de la realidad? ¿Qué características físicas debería de tener el mundo para satisfacer un tiempo objetivamente asimétrico y unidireccional? Huw Price distingue tres posibles consideraciones y puntos de vistas que contribuirían a defender la existencia de un pasaje objetivo del tiempo (Price 2012, pp. 277-278):

1. Considerar que el momento presente –el *ahora*– posee determinadas propiedades ontológicas que permiten considerarlo como un momento objetivamente distinguido y fundamental.
2. Considerar que el tiempo posee una dirección objetiva: existe un hecho objetivo que, ante dos eventos no simultáneos, permite distinguir cuál ocurrió más temprano y cuál más tarde.
3. Considerar al tiempo como un flujo, una naturaleza esencialmente dinámica.

Nuestro trabajo se centrará en considerar el segundo punto de vista y, particularmente, considerarlo a partir de la filosofía de la física. En efecto, la física no promueve el primer punto de vista ya que, en general, sus leyes son invariantes ante la traslación temporal: el tiempo se concibe como homogéneo, todos los instantes son equivalentes, no existe instante distinguido o fundamental. Adjudicar al momento presente un privilegio frente a los restantes instantes se encuentra, así, en disonancia con las leyes físicas. En cuanto al tercer punto de vista, tampoco es fácilmente expresable en términos físicos, ya que en el ámbito de la física la dinámica se define *en función del tiempo*, por lo cual, hablar de la naturaleza dinámica del tiempo parecería carecer de sentido o, al menos, reservar un sentido secundario y derivado. En este contexto, el problema de la flecha del tiempo surge cuando buscamos un *correlato físico* (un "hecho objetivo") a la idea intuitiva de un tiempo con las propiedades de asimetría y unidireccionalidad.

Abordar el problema desde la física y la filosofía de la física nos conduce a prestar atención a las teorías físicas vigentes y atender a qué tipo de relación puede establecerse con la flecha del tiempo. La

estrategia consiste en encontrar alguna característica material del mundo que pueda ser coordinada de una u otra manera con la direccionalidad temporal (Sklar 1974, p. 355). Particularmente, esta estrategia busca reflejar en el formalismo de alguna teoría física vigente la idea de un tiempo asimétrico mediante el análisis de ciertas propiedades formales de las ecuaciones dinámicas de la teoría. En líneas generales, las líneas de investigación han visto en la propiedad de invariancia temporal el concepto clave para hablar de simetrías temporales en el formalismo de las teorías físicas. Otros conceptos presentes en la discusión adquirirían un carácter secundario o derivado respecto del concepto de invariancia temporal, como ser el concepto de reversibilidad (para una discusión al respecto, ver Earman 1967, 1974, Castagnino, Lombardi & Lara 2005).

Llamaremos invariancia temporal (**T**-*invariancia* en adelante) a la propiedad de las leyes físicas de ser invariantes ante la operación de inversión temporal.

> **Definición**: Una ecuación dinámica es **T**-invariante si es invariante bajo la aplicación del operador de inversión temporal **T**, el cual lleva a cabo la operación $t \rightarrow -t$ e invierte todas las variables dinámicas definidas en función de t. Como resultado, si e(t) es una solución a la ecuación dinámica, **T**e(t) es también una solución. (Ver Castagnino, Lombardi & Lara 2009, p. 3)

El concepto de **T**-invariancia, como vemos, es una propiedad de las leyes físicas, que depende de la particular forma matemática de la ecuación dinámica que la expresa. Una gran cantidad de leyes físicas tienen la propiedad de ser **T**-invariantes: las leyes de la mecánica de Newton, las ecuaciones de campo de Einstein, las leyes de la mecánica cuántica no relativista, las ecuaciones de Maxwell, entre otras. Nótese que las soluciones e(t) y **T**e(t) de ecuaciones **T**-invariantes constituyen un par temporalmente simétrico (en adelante, par **T**-simétrico), es decir, soluciones físicamente indistinguibles, aunque temporalmente invertidas.

Como mencionamos párrafos más arriba, el problema de la flecha del tiempo en el contexto de la filosofía de la física considera que el correlato físico de la flecha del tiempo consiste en el hallazgo de una ley fundamental no **T**-invariante, es decir, que no tenga la propiedad de invariancia temporal. Una ley tal generaría, de manera no arbitraria, sólo un conjunto de soluciones posibles en una única dirección del tiempo, y no en ambas. Si bien nada en la ley nos señalaría qué dirección es el futuro o el pasado (pues esto es una cuestión puramente convencional), sí nos señalaría una diferencia sustancial que, convencionalmente, podríamos bautizar como la dirección pasado-a-futuro. El argumento de quienes consideran que el hallazgo de una ley no **T**-invariante es relevante para el problema de la flecha del tiempo es muy simple. Podría esquematizarse de la siguiente manera:

I. Si existen leyes de la física que sean no **T**-invariantes, entonces hay argumentos físicos para establecer la flecha del tiempo.
II. Existe una ley física que es no **T**-invariante.
III. Ergo, hay argumentos físicos para establecer la flecha del tiempo.

Nótese que la premisa fundamental es la segunda, y que la primera es el supuesto necesario sobre el cual funciona el argumento.

Por lo tanto, desde el punto de vista de la filosofía de la física, una importante tradición de físicos y filósofos ha considerado que el concepto de **T**-invariancia es central a la hora de discutir el problema de la flecha del tiempo. A modo de resumen de este apartado, el problema de la flecha del tiempo se reduciría a encontrar leyes en las teorías actualmente vigentes que sean no **T**-invariantes, es decir, que frente a la aplicación del operador de inversión temporal tal como fue definido más arriba, la operación no arroje soluciones **T**-simétricas. Naturalmente, desde un enfoque estrictamente reduccionista, se ha considerado que leyes o ecuaciones dinámicas pertenecientes a teorías fundamentales tienen preeminencia tanto conceptual como empírica frente a teorías consideradas no-fundamentales o incluso fenomenológicas. Dicho esto, resulta comprensible cierto escepticismo reinante en la comunidad a la hora de dar una respuesta positiva a si efectivamente las teorías físicas

vigentes permiten fundamentar una flecha del tiempo, ya que la mayoría de las leyes fundamentales, a primera vista, resultan ser **T**-invariantes (ver Price 1996, Maudlin 2007, Wallace 2012, North 2012). Este resultado ecuménicamente aceptado abre una serie de complejos problemas, como, por ejemplo, el de reconciliar un mundo macroscópico temporalmente asimétrico descripto por leyes fenomenológicas no **T**-invariantes (como el Segundo Principio del a Termodinámica), con un mundo microscópico temporalmente simétrico, descripto por leyes **T**-invariantes. Más allá de las diversas soluciones posibles a este problema subsidiario, la manera más efectiva y obvia de abrirse paso a través de él y ofrecer una solución directa al problema de la flecha del tiempo es encontrando una efectiva ecuación dinámica en aquellas teorías consideradas de nivel fundamental (como la mecánica cuántica no relativista) que sea no **T**-invariante.

En sintonía con esta última línea de razonamiento, algunos autores como Roger Penrose (1989) o George Ellis (2013a, b) han argumentado que la mecánica cuántica no relativista incluye una ley dinámica que no es **T**-invariante, lo cual permitiría definir de manera sustancial una dirección temporal en mecánica cuántica. Otros autores han hecho eco de esta posición, como Huw Price (1996), David Albert (2000) y Craig Callender (2000), señalando la plausibilidad de esta clase de respuesta al problema de la flecha del tiempo. En líneas muy generales, la posición defendida por Penrose y Ellis consiste en ligar el problema de la flecha del tiempo con la dinámica indeterminista y no unitaria que se introduce con la noción de "colapso" o "reducción de la función de onda" (de ahora en más, llamaremos a esta posición "enfoque de asimetría temporal por colapso"). Estas nociones cumplen un papel central a la hora de elucidar un famoso problema inherente a la mecánica cuántica, el llamado *problema de la medición*; por lo que dos problemas relevantes en filosofía de la física entran en interacción bajo el enfoque de asimetría temporal por colapso: el *problema de la flecha del tiempo* y el *problema de la medición*. Antes de abordar con mayor precisión en qué consiste el enfoque que queremos analizar y discutir en este trabajo, debemos primero repasar brevemente en qué consiste el problema de la medición en mecánica cuántica.

3. La hipótesis del colapso y el problema de la medición en mecánica cuántica

Como es bien conocido por quienes han tenido una aproximación a la teoría de la mecánica cuántica, uno de sus principios más sorprendente es el "principio de superposición", el cual establece que si los vectores $|\Psi_1\rangle$ y $|\Psi_2\rangle$ representan estados del sistema cuántico, el vector que se obtiene a partir de una combinación lineal de ambos, por ejemplo, $|\varphi\rangle = \beta_1|\psi_1\rangle + \beta_2|\psi_2\rangle$, también representa un estado legítimo del sistema. Este principio tiene profundas consecuencias respecto de los valores de los observables de un sistema cuántico. Si los vectores $|\Psi_1\rangle$ y $|\Psi_2\rangle$ son los autovectores de un observable $\mathcal{X}$, con autovalores x_1 y x_2 respectivamente, cuando el sistema se encuentra en el estado $|\varphi\rangle$, el observable $\mathcal{X}$ no posee un valor definido y no puede decirse con certeza que el sistema posea el valor x_1 ni el valor x_2 del observable $\mathcal{X}$. Naturalmente, el fenómeno de superposición cuántica no es directamente observable: los aparatos con los cuales medimos las magnitudes del sistema siempre brindan valores definidos de los observables a medir. Pero se trata de una característica formal ineludible de la teoría. Precisamente, el problema de reconciliar el principio de superposición con la observación de valores definidos cuando se mide un observable es lo que se conoce como el *problema de la medición cuántica*.

El problema de la medición es uno de los primeros y más inquietantes problemas que enfrentan las diferentes interpretaciones de la mecánica cuántica, ya que parece establecer una profunda brecha entre las propiedades físicas de los sistemas que nos son accesibles mediante experimentos y aquellas propiedades que el formalismo de la teoría parece sugerir que existen con propio derecho, aunque sean experimentalmente inaccesibles. Poder dar cuenta de esta brecha y sanearla ha sido uno de los objetivos centrales de las diferentes interpretaciones de la mecánica cuántica, generando una enorme

cantidad de discusión y enfoques al respecto. El núcleo del problema ya es enunciado claramente por Niels Bohr: "El procedimiento de medición tiene una influencia esencial sobre las condiciones en las cuales la propia definición de propiedad física descansa" (Bohr 1935, p. 1025). En términos muy generales, el problema de la medición busca dar cuenta de por qué, encontrándose el sistema medido en un estado de superposición respecto de un cierto observable, al cual por ello no puede asignársele un valor definido, al efectuar una medición se obtiene un valor definido de tal observable. La respuesta tradicional, formulada por la interpretación ortodoxa (de Copenhague) apela a la idea de la "reducción" del estado cuántico, también llamada "colapso de la función de onda".

Desde esta perspectiva, el estado de un sistema cuántico puede seguir dos tipos de evoluciones: cuando no es medido, evoluciona según la ecuación de Schrödinger, de manera determinista, unitaria, lineal y reversible (Pessoa 2005, p. 45); pero, cuando se hace una medición sobre el sistema, el estado "colapsa", interrumpiendo la evolución según la ecuación de Schrödinger. Si antes de efectuar la medición el sistema cuántico se encontraba en un estado de superposición respecto de un observable, cuando se lleva a cabo la medición el estado colapsa en alguno de los autoestados ortogonales de dicho observable, ofreciendo valores clásicos. De la misma manera, si existe una distribución de probabilidades sobre la posición de una partícula, cuando se lleva a cabo la medición la posición se define completamente en un punto del espacio. Estas evoluciones son no unitarias e indeterministas.

Si bien el enfoque de asimetría temporal por colapso asume una noción de colapso inducida por una medición, no todas las interpretaciones de la mecánica cuántica que se comprometen con la idea de colapso asumen que ésta esté ligada íntimamente la medición. La interpretación de Ghirardi, Rimini y Weber (1985, 1986) asume la hipótesis del colapso independientemente del proceso de medir: el colapso se produce de manera espontánea, cada cierto tiempo. Sin embargo, en este trabajo no analizaremos y discutiremos esta interpretación ya que no es la asumida por el enfoque que queremos discutir ligado al problema de la flecha del tiempo.

Explicar cómo interpretar los estados cuánticos antes de medir y cómo se produce el colapso generó muchísima discusión en el ámbito de los fundamentos de la mecánica cuántica. El famoso ejemplo del *gato de Schrödinger* (un famoso experimento mental ideado por Schrödinger en 1935) buscó poner en evidencia que una interpretación de indeterminación objetiva de la realidad antes de la medición, que se determina cuando interactuamos con el sistema cuántico, es absurda. Si sólo tenemos conocimiento del estado de un sistema cuántico cuando lo medimos (p.e. cuando medimos su espín o su energía), ¿qué podemos saber del sistema antes de la medición? Clásicamente, pensamos que debería tener magnitudes definidas y una posición determinada. Sin embargo, el formalismo de la mecánica cuántica sugiere, como ya vimos, una posición distribuida de manera probabilista o estados de superposición. Entonces, parece haber una especie de asimetría entre un sistema cuántico *antes* de ser medido y el sistema cuántico *luego* de ser medido. Naturalmente, podemos pensar que la asimetría es simplemente epistémica: la mecánica cuántica no ofrece los suficientes recursos teóricos para dar cuenta de manera completa del estado de un sistema cuántico (tal fue la opinión de Schrödinger, Albert Einstein y David Bohm, entre otros). Pero también podemos pensar que la asimetría es objetiva: la mecánica cuántica suministra una descripción completa de la realidad física. Desde esta interpretación objetiva, el sistema cuántico tiene determinadas propiedades y se comporta de cierta manera *antes* de la medición y de otra *luego* de la medición: el "colapso" es el hecho cuántico fundamental que hace la diferencia y marca los límites de la asimetría.

4. ¿En qué consiste el "enfoque de asimetría temporal por colapso"?

Volviendo al problema de la flecha del tiempo en mecánica cuántica, como dijimos anteriormente, Penrose y Ellis han propuesto que, para determinar una dirección temporal a partir de argumentos mecánico-cuánticos, uno debe basar su respuesta en las soluciones ofrecidas al problema de la medición. Intuitivamente, con la descripción general que hemos dado del problema, podemos vislumbrar en qué sentido se dirige esta propuesta: hemos usado las palabras 'antes' y 'después' o

'luego' para establecer una asimetría presuntamente objetiva del sistema cuántico en cuanto a sus evoluciones: las propiedades del sistema *antes* de medir evolucionan de cierta manera y exhiben ciertas propiedades (formales), pero, con la medición, el sistema colapsa interrumpiendo la evolución según la ecuación de Schrödinger, de modo que después de la medición el estado del sistema asume un valor definido de alguna de sus propiedades. La clave para fundamentar este enfoque radica en que "la teoría es predictiva pero no retrodictiva" (Callender 2000, p. 258).

La tesis del enfoque puede enunciarse, de manera informal, de la siguiente manera:

> **Tesis del Enfoque de Asimetría Temporal por Colapso**: La mecánica cuántica es una teoría que recoge una dirección privilegiada del tiempo porque "el colapso" de la función de onda determina una dinámica irreversible: los estados colapsan pero no "descolapsan".

George Ellis es uno de los autores que con insistencia ha sostenido este enfoque, afirmando que existe una "reducción de la función de onda probabilista y temporalmente irreversible" (Ellis 2013b, p. 243), ilustrada en el siguiente diagrama:

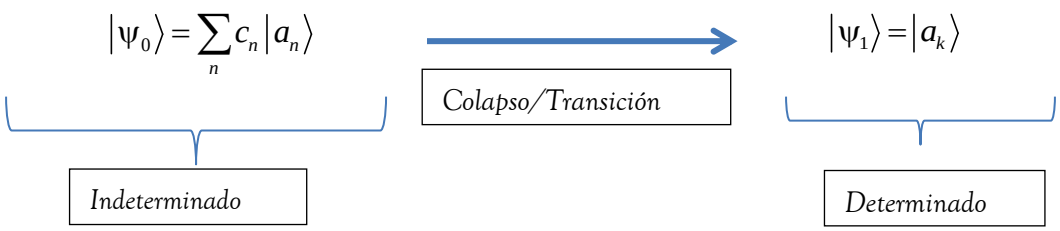

Figura 1

Según Ellis, este proceso, tal como lo muestra la flecha unidireccional en la Figura 1, es temporalmente irreversible y, por lo tanto, manifiesta una flecha del tiempo en el nivel cuántico. El autoestado determinado ocurre *después* que la superposición indeterminada: el colapso es el evento que produce la transición de uno al otro. Sin embargo, el punto central es que nada en el autoestado final determinado puede decirnos algo sobre el estado indeterminado temporalmente anterior. En este sentido la teoría no es retrodictiva: si se intenta aplicar un razonamiento similar, simplemente no se obtendrán resultados correctos.

Huw Price ilustra este enfoque de la siguiente manera:

> En el caso de la mecánica cuántica, entonces, la asimetría temporal involucrada en la evolución de la función de estado como resultado de la medición [...] representa [para quien sostiene que la mecánica cuántica ofrece una descripción completa de la función de estado] una asimetría temporal objetiva del mundo. (Price 1996, p. 207).

Por su parte, Penrose (otro de los autores que ha defendido este enfoque con vehemencia) argumenta que, en términos de la Figura 1, tenemos, primero, una evolución unitaria para el vector de estado $|\psi_0\rangle$; cuando realizamos una medición M se produce un "colapso" y el vector de estado $|\psi_0\rangle$ "salta" a otro vector de estado, $|\psi_1\rangle = |u_k\rangle$, que es alguno de sus posibles autoestados. Ahora bien, existe una probabilidad $|c_k|^2$ de que se produzca el "salto" de $|\psi_0\rangle$ a $|\psi_1\rangle$, y este proceso es temporalmente asimétrico (Penrose 1989, p. 355). Alguien podría pensar que, formalmente, es posible aplicar un operador de inversión temporal y obtener una evolución en sentido temporalmente contrario (hacia el pasado) con su correspondiente probabilidad de "saltar" de $|\psi_1\rangle$ a $|\psi_0\rangle$. Sin embargo, como aclara Penrose, este argumento no funciona porque "estas dos probabilidades son sumamente diferentes y sólo la primera es correctamente asumida por la mecánica cuántica" (1989, p. 356). Luego agrega:

> Cuando queremos calcular la probabilidad de un estado pasado sobre la base de un estado futuro, obtenemos una respuesta equivocada si pretendemos adoptar el procedimiento estándar *R* [el colapso de

> la función de onda por medición]. [...] solamente para calcular las probabilidades de estado futuro a partir de estados pasados, este procedimiento funciona correctamente [...]. Sobre esta base, me parece claro que el procedimiento *R* no puede ser temporalmente simétrico. (Penrose 1989, p. 359).

La idea del enfoque de asimetría por colapso es clara. Ahora bien, ¿es posible definir una dirección temporal en mecánica cuántica a partir de la idea de colapso? Veamos con más detalle la propuesta para ir desglosando sus matices y aristas.

Consideremos un estado en superposición:

$$|\psi_0\rangle = \sum_n c_n |a_n\rangle$$

donde los $|a_n\rangle$ son los autovectores del observable *A*, cada uno con su correspondiente autovalor a_n. Esta ecuación es de carácter probabilista y, según Callender, puede ser considerada como la expresión de una ley de la mecánica cuántica que asigna las probabilidades $|c_n|^2$ de encontrar los valores a_n del observable *A* en una medición, (Callender 2000, p. 257). Pero, ¿qué dice la ecuación? El autor presenta su forma lógica para una medición ideal de la siguiente manera:

(A) (FUT) *P*(observar en t_1 el valor a_n de *A*, con el sistema en $|\psi_0\rangle$ en t_0) = *p*.

Donde *P* indica la función probabilidad, y $t_1 > t_0$. Elliot Sober (1994) ha llamado a este tipo de leyes "temporalmente orientadas" porque –si asumimos que el valor a_n de *A* en t_1 se representa por el estado $|a_n\rangle$– brindan la probabilidad de que ocurra un estado en un tiempo posterior, dada la ocurrencia de un estado en un tiempo anterior. Una ley como (A) es una ley que nos da una probabilidad de transición de un estado al otro en la dirección pasado-a-futuro. Ahora bien, si la ley es **T**-invariante, deberíamos esperar una transición probabilista de la siguiente forma:

(PAS) *P*(observar en t_0 el valor a_n de *A*, con el sistema en $|\psi_1\rangle$ en t_1) = *p*.

Transiciones de este tipo son la que Penrose y Ellis, entre otros (ver también Albert 2000), consideran imposibles desde la mecánica cuántica. No podemos aplicar una ley como (B) a la medición cuántica, ya que da resultados incorrectos. Por lo tanto, según este enfoque, la mecánica cuántica es temporalmente asimétrica, ya que la ley del colapso es una ley fundamental no **T**-invariante.

5. ¿Es posible fundamentar la asimetría temporal mediante la noción de colapso?

En vistas a argumentar contra la efectividad y plausibilidad del enfoque de asimetría temporal por colapso, en este apartado final daremos nuestros argumentos señalando sus debilidades e insuficiencias. Lógicamente, la propuesta del enfoque depende esencialmente de asumir la ley del colapso como una genuina ley de la mecánica cuántica. El argumento del enfoque no funcionaría, naturalmente, si la ley del colapso no fuera considerada una ley de la teoría (por obvias razones). Nuestro primer conjunto de críticas y argumentos irán contra la plausibilidad de asumir la hipótesis del colapso como una ley fundamental de la teoría y, por lo tanto, la viabilidad de determinar una dinámica no lineal e irreversible que fundamente la asimetría temporal. Luego de presentado este conjunto de críticas, avanzaremos en otra dirección: asumiendo la hipótesis del colapso como ley de la mecánica cuántica, mostraremos que aun así resulta insuficiente para determinar una dirección temporal, al menos de manera global y sin disponer de información adicional.

5.1. Contra la idea de colapso como una ley fundamental de la mecánica cuántica

En primer lugar, lo que resulta particularmente insatisfactorio para quien este preocupado de elucidar el problema de la flecha del tiempo es que el enfoque de asimetría temporal por colapso no nos permite dar una respuesta directa a si existe ruptura de la simetría temporal en mecánica cuántica; en

su lugar, nos ofrece una afirmación condicional: *si* la hipótesis del colapso es asumida, *entonces* la teoría resulta no **T**-invariante. Este señalamiento no sería particularmente problemático si la hipótesis a asumir fuera universalmente aceptada o sumamente plausible. Pero, por el contrario, la hipótesis está en el corazón mismo del problema de la medición en mecánica cuántica. Callender hace una advertencia en el mismo sentido:

> Por sí misma, la pérdida de IIT [Invariancia ante inversión temporal. TRI: *time reversal invariance*] de este algoritmo no afirma nada acerca de si el tiempo está orientado o no [...], sabemos que primero tenemos que determinar si el algoritmo es o no una ley fundamental de la naturaleza. Sólo si lo es, estamos justificados a admitir que el tiempo está orientado. (Callender 2000, p. 260)

La naturaleza misma del enfoque (para que no sea trivialmente verdadero) parece exigirnos analizar la plausibilidad del antecedente del condicional antes de determinar si la teoría es **T**-invariante o no, y este análisis implica discutir qué interpretación de la mecánica cuántica consideramos más adecuada: una interpretación que asuma el colapso como ley fundamental de la teoría o una interpretación que no lo haga. Interpretaciones que no asuman la hipótesis del colapso no considerarán a (A) una ley de la mecánica cuántica, por lo cual no considerarán que la teoría sea no **T**-invariante. Más aún, algunas de las interpretaciones de la mecánica cuántica más difundidas y defendidas en la actualidad, como la interpretación de muchos-mundos o las interpretaciones modales, prescinden completamente de la hipótesis del colapso; entonces, bajo estas interpretaciones, el enfoque de asimetría temporal por colapso no tiene sentido y la teoría resultaría, al menos en este respecto, **T**-invariante.

Nuevamente, para quien está preocupado por el problema de la flecha del tiempo en mecánica cuántica la situación es un poco insatisfactoria: el enfoque de asimetría temporal por colapso nos obliga a aceptar el colapso de la función de onda como ley de la mecánica cuántica, comprometiéndonos con una interpretación particular de la teoría, obligándonos a defender tal interpretación, subsumiendo el problema que se quería elucidar bajo un problema mayor y de difícil resolución y consenso, como ser el de qué interpretación resulta más adecuada para dar cuenta del formalismo de la mecánica cuántica. Obviamente, esta es una estrategia que generalmente tenderíamos a evitar. Sin embargo, yendo un paso más allá en la respuesta, si bien el enfoque logra romper la simetría temporal a partir de la postulación de una ley que describe el colapso, *strictu sensu*, no es la estructura matemática de la teoría aquello que permite seleccionar uno de los pares **T**-invariante, sino la aceptación de una interpretación en particular, la cual introduce una dinámica ajena al formalismo original al asumir que la reducción del vector de estado a valores definidos debe ser considerada una ley de la mecánica cuántica.

Aceptar el enfoque de asimetría por colapso es aceptar una interpretación de la mecánica cuántica que incluya, entre sus leyes fundamentales, la hipótesis del colapso; y como señalamos en el párrafo anterior esta es una debilidad del enfoque. El siguiente movimiento natural para desarmar el enfoque consiste en argumentar contra la idea misma de colapso. Y creemos que tenemos buenos motivos para suponer que la hipótesis del colapso no debe ser asumida. De esta manera, la mecánica cuántica resultaría ser una teoría **T**-invariante, ya que la ecuación de Schrödinger (indiscutiblemente una ley de la mecánica cuántica) es **T**-invariante, contradiciendo explícitamente lo afirmado por el enfoque discutido. Algunas de las interpretaciones que asumen el colapso ligado al proceso de medición han sido sumamente criticadas. Giancarlo Ghirardi afirma:

> Los únicos modelos satisfactorios de este tipo [refiriéndose a los que asumen colapso] (los cuales son, esencialmente, variaciones y refinamientos de uno propuesto por Ghirardi, Rimini y Weber (1985, 1986), usualmente llamado 'teoría GRW') son intentos fenomenológicos para solucionar problemas de fundamentos. Hasta el momento, ellos involucran parámetros fenoménicos que, si la teoría es tomada con seriedad, adquieren el estatus de nuevas constantes de la naturaleza. Pero, más aún, el problema de construir una satisfactoria generalización relativista de esos modelos ha encontrado serios problemas matemáticos debidos a la aparición de divergencias intratables (Ghirardi 2011).

Usualmente, la hipótesis del colapso es cuestionada porque se fundamenta en una noción de "medición" que no ha sido analizada cuidadosamente pero que, sin embargo, juega un papel físico

fundamental a la hora de determinar las propiedades de la evolución de un sistema cuántico (Dickson 2007, p. 363), ¿qué tiene de *físicamente* especial el proceso de medir? Visto desde un punto de vista más general, ¿qué sería una medición? Si la mecánica cuántica es una teoría fundamental, debería decirnos ella misma qué es una medición; sin embargo, la hipótesis del colapso cuando está estrechamente relacionada con el proceso de medir introduce una fuerte dependencia contraria: es la medición la que nos dice qué es la mecánica cuántica (Dickson 2007, p. 363). Esta suerte de círculo parece *prima facie* insalvable: o bien la medición resulta un proceso físico misterioso que permanece inexplicado, o bien la elucidación de procesos o fenómenos mecánico-cuánticos no puede depender tan estrechamente del fenómeno de medir. La primera opción no parece adecuada: si la idea de medición es asumida de manera acrítica como un proceso misterioso e inexplicable (al menos en términos de la mecánica cuántica), cabría esperar una razón que esclarezca qué es lo que distingue a una medición de otras interacciones físicas (cuando, intuitivamente, diríamos que no debería por qué haber distinción alguna). La segunda opción sería renunciar a lo que distingue y hace posible la hipótesis del colapso, al menos en términos de mediciones. De cualquier manera, la situación desemboca en un serio problema para quién sostenga la hipótesis del colapso y busque argumentar a favor de una asimetría temporal introducida por la dinámica irreversible que establece esta noción.

Este conjunto de críticas tiende a señalar el carácter *ad hoc* de la introducción de la hipótesis del colapso, hipótesis que es elevada a categoría de ley fundamental de la mecánica cuántica. A su vez, este carácter *ad hoc* es transmitido de manera directa al enfoque de asimetría temporal por colapso: si el enfoque depende esencialmente de la idea de colapso y ésta puede ser puesta en duda como un recurso arbitrario a la hora de dar respuesta a un problema interpretativo concreto de la mecánica cuántica, la situación se hace extensiva al enfoque mismo.

Desde un punto de vista más general, no es sólo este carácter *ad hoc* lo que argumentaría en contra de la plausibilidad de la hipótesis. Algunas de sus consecuencias o extrañezas también contribuyen a abandonar el colapso como ley fundamental de la mecánica cuántica. Por ejemplo, puede resultar extraño y hasta distorsivo de una imagen simple y elegante del mundo físico la existencia de dos tipos muy distintos de evoluciones. David Albert señala al respecto:

> La dinámica [de la teoría] y el postulado del colapso están categóricamente en contradicción [...] el postulado del colapso parece estar en lo cierto acerca de qué sucede cuando medimos, y la dinámica parece estar bizarramente equivocada acerca de qué sucede cuando medimos, y todavía, la dinámica parece estar en lo cierto acerca de qué sucede siempre que no estamos midiendo (Albert 1992, p. 79).

Por su parte, Lombardi, Fortín, Castagnino y Ardenghi (2011), señalan otras extrañezas y problemas que la hipótesis presenta. Por un lado, no ofrece una explicación de las causas que producen el colapso ni tampoco precisa en qué instante se produce. Además, la hipótesis por sí sola no explica por qué el sistema colapsa en una determinada base y no en cualquier otra. Por otro lado, ya que la hipótesis asume que el colapso se produce en el sistema total, se trataría de un fenómeno no-local, ya que la distancia entre el aparato de medición y el sistema físico no es tenida en cuenta.

5.2. Insuficiencias de la noción de colapso para fundamentar una flecha del tiempo

Hasta aquí hemos argumentado contra la plausibilidad de la hipótesis del colapso. Naturalmente, no hemos dicho la última palabra al respecto: la discusión acerca del problema de la medición es sumamente ardua y encierra una serie de bemoles que no hemos podido abordar en este trabajo, ya que caen fuera de su pretensión. Nuestro punto fue más humilde aunque no por ello menos inofensivo para el enfoque de asimetría temporal por colapso que queremos discutir: como hemos señalado, el enfoque depende fundamentalmente de asumir que la hipótesis del colapso es una ley fundamental de la mecánica cuántica. Como mencionamos ulteriormente, este supuesto no es asumido de manera incuestionada y general: muchas interpretaciones niegan la noción misma de colapso y la de una dinámica no lineal e irreversible. Esto, de por sí, debería resultar incómodo para cualquiera que sostenga el enfoque de Ellis o Penrose, ya que compromete la respuesta a un problema con la respuesta a otro problema (quizás mayor); en el fondo, debería defender una interpretación

particular de la mecánica cuántica antes de defender una posición respecto del problema de la flecha del tiempo. Además, piénsese en lo extraño y filosóficamente desalentador que resulte que la mecánica cuántica resulte ser una teoría no **T**-invariante bajo una interpretación pero no bajo otra interpretación, dejando sin respuesta unívoca la pregunta a si la mecánica cuántica es una teoría que permite distinguir una dirección temporal o no. Yendo un paso más allá en la crítica a la idea de colapso, hemos mencionado algunas de las objeciones comúnmente esgrimidas contra esta idea, sentando una buena base argumentativa para sugerir que el enfoque de asimetría por colapso resulta, por lo menos, insatisfactorio, involucrando más problemas que soluciones efectivas.

De cualquiera manera, podemos todavía ir más allá en nuestra crítica suponiendo que la hipótesis del colapso es, en efecto, una ley fundamental de la mecánica cuántica y que, aun así, resulta ineficiente a la hora de determinar una flecha del tiempo. Los argumentos que presentaremos seguirán dos líneas: por un lado, si aceptamos el enfoque de asimetría por colapso, entonces no podemos ofrecer una flecha *global* del tiempo. Por otro lado, la hipótesis del colapso por sí sola es insuficiente para determinar una dirección temporal, ya que requiere información extra acerca de cómo es el aparato de medición.

Comencemos por la primera crítica. Como mencionamos anteriormente, las interpretaciones de la mecánica cuántica que asumen el colapso (exceptuando la interpretación de colapso espontáneo de GRW), adjudican un papel relevante al proceso de medición y, con ello, a la función que cumple el aparato de medición. Dicho esto, resulta evidente que el enfoque de asimetría por colapso sólo cobra sentido cuando tratamos con sistemas abiertos y no aislados, es decir, aquellos casos donde podemos definir un aparato de medición externo al sistema. Inmediatamente, esto conduce a concluir que si hemos establecido una flecha del tiempo mediante el enfoque de asimetría por colapso, ésta, al menos en principio, tendría sólo validez local. Sin embargo, vemos qué es imposible trasladar esta asimetría temporal local introducida mediante la idea de colapso a todo el universo, es decir, hacer de esta flecha *local* del tiempo una flecha *global* del tiempo. Y la razón de esta imposibilidad es muy sencilla: el enfoque no podría definir una flecha del tiempo en sistemas aislados, y el universo como un todo es, por definición, un sistema aislado. De esta manera, el enfoque encuentra un obstáculo que parece insalvable si uno quisiera determinar una flecha global del tiempo o, al menos, tener la posibilidad de hacerlo: conceptualmente, no es posible definir un aparato de medición externo al universo. Por lo tanto, el enfoque resulta estrictamente local e imposibilitado de aplicarse a nivel cosmológico.

Nuestra segunda crítica busca mostrar que, aún aceptada la idea del colapso y su ámbito de aplicación estrictamente local, no es suficiente para definir una flecha del tiempo sin disponer de información adicional, en particular, información referente al aparato de medición. Como se mostró en las secciones anteriores, el colapso se produciría cuando un estado en superposición como $|\psi_0\rangle = \sum_n c_n |a_n\rangle$ se transforma (al ser medido, es decir, al ser colapsado) en un estado con valor definido, $|\psi_1\rangle = |a_k\rangle$. Como también mencionamos, este proceso es no unitario, irreversible y rompe con la evolución que sigue la dinámica dictaminada por la ecuación de Schrödinger, permitiendo distinguir una dirección temporal que va de un estado en superposición a un estado con valores definidos. Hasta aquí las líneas generales de lo argumentado por quienes sostienen el enfoque de asimetría temporal por colapso. Sin embargo, la argumentación esconde cierta información adicional no explicitada, sin la cual el argumento no funcionaría. Sin esta información adicional uno bien puede concluir que, si bien es cierto que se produce una transición de $|\psi_0\rangle = \sum_n c_n |a_n\rangle$ a $|\psi_1\rangle = |a_k\rangle$ mediante el colapso, también se produce la transición inversa, de un estado con valores definidos a un estado de superposición: la teoría también describe este tipo de transiciones. ¿Cuáles son? Aquellas que se producen cuando se hace colapsar al sistema en otra base, digamos *B*. Veamos esto más de cerca: supongamos que $|b_1\rangle$ y $|b_2\rangle$ son los autoestados del observable *B*. Sabemos que el estado $|b_1\rangle + |b_2\rangle$ puede colapsar en alguno de sus autoestados, por ejemplo, $|b_1\rangle$. Ahora bien, también podemos

expresar los autoestados de una base en términos de otra base, por ejemplo, si la relación entre los autovectores de *A* y *B* es

$$|a_1\rangle = \frac{|b_1\rangle + |b_2\rangle}{\sqrt{2}} \text{ y } |a_2\rangle = \frac{|b_1\rangle - |b_2\rangle}{\sqrt{2}}$$

entonces

$$|b_1\rangle = \frac{|a_1\rangle + |a_2\rangle}{\sqrt{2}} \text{ y } |b_2\rangle = \frac{|a_1\rangle - |a_2\rangle}{\sqrt{2}}$$

En función de esto, desde el punto de vista de la base de autovectores de *B* podemos decir que el sistema pasa del estado superposición $\left(|b_1\rangle + |b_2\rangle\right)/\sqrt{2}$ al estado no superpuesto $|b_1\rangle$, es decir el estado colapsa. Sin embargo, el mismo proceso descripto desde la base de autovectores de *A* parece distinto: el sistema pasa del estado no superpuesto $|a_1\rangle$ al estado superpuesto $\left(|a_1\rangle + |a_2\rangle\right)/\sqrt{2}$, por lo tanto el sistema descolapsaría (en términos más precisos, se trata del procedimiento estándar de preparación).

Pero, entonces, ¿por qué se sostiene que "los sistemas colapsan, pero no descolapsan"? Tal afirmación sólo tiene sentido cuando se considera un aparato de medición que mide en una base determinada y los autoestados posibles del sistema son expresados en términos de esa base. Pero esto ya no es equivalente a afirmar que el colapso (en general, sin disponer de información previa) es un proceso temporalmente asimétrico ni que, en general, los sistemas colapsan, pero no descolapsan: para ello es necesario especificar las características del aparato de medición. Ciertamente, la transición $\left(|a_1\rangle + |a_2\rangle\right)/\sqrt{2} \rightarrow |a_1\rangle$ se produce siempre y cuando el aparato de medición que hizo colapsar el sistema mida el observable *A*; obviamente, la transición inversa no tiene lugar bajo el mismo aparato. Sin embargo, si yo cambio el aparato por otro que mida el observable *B*, en lugar de *A*, descolapso el sistema que vuelve a un estado de superposición $\left(|a_1\rangle + |a_2\rangle\right)/\sqrt{2}$. Por lo tanto, la afirmación general de que "los sistemas cuánticos colapsan, pero no descolapsan" carece de sentido si no se específica el aparato de medición, arrastrando consigo al enfoque de asimetría temporal por colapso.

En efecto, si yo quiero determinar cuál es la flecha cuántica del tiempo en términos de colapso, y la única información de la que dispongo es que un estado en superposición $\left(|a_1\rangle + |a_2\rangle\right)/\sqrt{2}$ ingresó a un aparato de medición y se obtuvo, finalmente, $|a_1\rangle$, no tengo los recursos para determinar tal asimetría temporal, ya que legítimamente podría suponer que lo que ingreso en realidad fue el estado $|b_1\rangle$, el cual descolapsó resultando en $\left(|b_1\rangle + |b_2\rangle\right)/\sqrt{2}$. ¿Hubo colapso o "descolapso"? ¿Puedo determinar si existe una dirección temporal en base a la información disponible? No, lo que se necesita es especificar en qué base se produjo la medición, si el aparato midió en la base *A* o en la base *B*. Incluso si tomamos el criterio muy seriamente y al pie de la letra, y no especificamos la información necesaria acerca del aparato de medición, podríamos arribar a una conclusión paradójica: si el aparato mide en la base *A*, entonces determinamos que existe una asimetría material en el mundo cuántico que permite reflejar y fundar una asimetría temporal, estableciendo que el tiempo se dirige del pasado hacia el futuro en la medida en que el sistema en superposición colapsó en uno de sus autoestados; pero si el aparato mide el observable *B*, ¿qué debemos concluir? Que el sistema descolapsó y que el tiempo fue invertido: en la medida en que el sistema se encontraba en un estado con valor definido y colapsó, el tiempo se invirtió de futuro a pasado. Claramente, esto no tiene mucho sentido. Por lo que, sin la información completa acerca del aparato de medición, no es posible establecer una efectiva flecha local y cuántica del tiempo en base al enfoque de asimetría por colapso.

6. Conclusiones

En el presente trabajo hemos discutido un enfoque relevante en la discusión sobre si es posible definir una flecha del tiempo en mecánica cuántica. El enfoque en cuestión, denominado por nosotros "enfoque de asimetría temporal por colapso" busca argumentar que es posible definir una flecha cuántica del tiempo en base a que la hipótesis o ley del colapso es una ley no T-invariante de la teoría, estableciendo una asimetría temporal en base a una dinámica irreversible, no lineal y no unitaria introducida mediante la noción de colapso o reducción de la función de onda. El *dictum* del enfoque como fue presentado es: "los sistemas cuánticos colapsan, pero no descolapsan".

Nuestros argumentos contra este enfoque procedieron en dos etapas: primero, señalamos que el enfoque depende esencialmente de asumir la hipótesis del colapso como ley fundamental de la mecánica cuántica, mostrando que esta asunción debilita al enfoque ya que no es general y unívocamente aceptado que la hipótesis del colapso sea una efectiva ley de la mecánica cuántica; de hecho, el asunto está sujeto a qué interpretación de la teoría sea asumida, ya que varias de ellas prescinden de tal idea. Además, dimos argumentos adicionales que buscaron remarcar que tenemos fuertes motivos para no aceptar la hipótesis del colapso.

En segundo lugar, en aras del argumento, supusimos que la hipótesis del colapso era una ley fundamental de la mecánica cuántica. No obstante, en este punto, señalamos que, tal como el enfoque es presentado por sus autores, resulta insuficiente para determinar una flecha del tiempo. Por un lado, remarcamos una limitación elemental del enfoque: resulta ser estrictamente local e inaplicable a nivel cosmológico –no pudiendo, por lo tanto, fundamentar una flecha global del tiempo. Por otro lado, argumentamos que sin la especificación del aparato de medición el enfoque no permite fundamentar una flecha del tiempo. Como vimos, el *dictum* del enfoque, "los sistemas colapsan, pero no descolapsan", carece de sentido si no se específica en qué base se realiza la medición y cuál es el aparato de medir. Sin esta información y con un ejemplo simple, mostramos como los sistemas descolapsan, contradiciendo el *dictum* central del enfoque.

En conclusión, creemos que hemos ofrecido fuertes y sólidos argumentos contra el enfoque de asimetría por colapso. Lo cual no indica que afirmemos que la mecánica cuántica es una teoría que no permita distinguir una dirección temporal en absoluto. Simplemente, hemos señalado que el camino que busca establecer una asimetría temporal haciendo uso de la noción de colapso enfrenta más problemas que soluciones, por lo cual, sugerimos, es un camino que no debiera ser recorrido. En su lugar, motivamos a filósofos y físicos a buscar otras vías de razonamiento y exploración en vistas a determinar si la mecánica cuántica es una teoría que permita fundamentar de manera objetiva una flecha del tiempo.

Bibliografía

Albert, D. (1992), *Quantum Mechanics and Experience*, Cambridge, MA: Harvard University Press.

Albert, D. Z. (2000), *Time and Chance*, Cambridge, MA: Harvard University Press.

Bohr, N. (1935), "Can Quantum Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?", *Physical Review*, 48: 696-702. (Reimpreso en: Kalckar, J. (ed.), (1996), *Niels Bohr. Collected Works. Vol.* 7, Amsterdam: Elsevier, pp. 292-298.)

Callender, C. (2000), "Is Time 'Handed' in a Quantum World?", *Proceedings of the Aristotelian Society* 100: 247-269.

Castagnino, M., Lombardi, O. y L. Lara (2005), "A Global and Non-Entropic Approach to the Problem of the Arrow of Time", en Reimer, A. (ed.), *Spacetime Physics Research Trends. Horizons in World Physics*, New York: Nova Science, pp. 74-108.

Castagnino, M., Lombardi, O. y L. Lara (2009), "The Global Non-Entropic Arrow of Time: From Global Geometrical Asymmetry to Local Energy Flow", *Synthese* 169: 1-25.

Dickson, M. (2007), "Non-Relativistic Quantum Mechanics", en Butterfield, J. y J. Earman (eds.), *Philosophy of Physics*, Carolina: Elsevier, pp. 275-417.

Earman, J. (1967), "Irreversibility and Temporal Asymmetry", *The Journal of Philosophy* 64(18): 543-549.

Earman, J. (1974), "An Attempt to Add a Little Direction to 'The Problem of the Direction of Time'", *Philosophy of Science* 41: 15-47.

Ellis, G. F. R. (2013a), "Space Time and the Passage of Time", en Petkov, V. (ed.), *Springer Handbook of Spacetime*, Heidelberg: Springer. arXiv:1208.2611.

Ellis, G. F. R. (2013b), "The Arrow of Time and the Nature of Spacetime", *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 44: 242-262.

Ghirardi, G. (1985), "A Model for a Unified Quantum Description of Macroscopic and Microscopic Systems", en Accardi, L. *et al.* (eds.), *Quantum Probability and Applications*, Berlin: Springer.

Ghirardi, G. (1986), "Unified Dynamics for Microscopic and Macroscopic Systems", *Physical Review D* 34: 470-477.

Ghirardi, G. (2011), "Collapse Theories", en Zalta, E. N. (ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, URL = http://plato.stanford.edu/archives/win2011/entries/qm-collapse/

Lombardi, O., Fortin, S., Castagnino M. y J. S. Ardenghi (2011), "Compatibility Between Environment-Induced Decoherence and the Modal-Hamiltonian Interpretation of Quantum Mechanics", *Philosophy of Science* 78: 1024-1036.

Maudlin, T. (2007), *Metaphysics Within Physics,* New York: Oxford University Press.

North, J. (2012), "Time in Thermodynamics", en Callender, C. (ed.), *The Oxford Handbook of Philosophy of Time*, Oxford: Oxford University Press, pp. 312-350.

Penrose, R. (1989), *The Emperor's New Mind*, Oxford: Oxford University Press.

Pessoa, O. (2005), *Conceitos de Física Quantica,* São Paulo: Editora Livraría da Física.

Price, H. (1996), *Time's Arrow and Archimedes' Point: New Directions for the Physics of Time*, New York: Oxford University Press.

Price, H. (2012), "The Flow of Time", en Callender, C. (ed.), *The Oxford Handbook of Philosophy of Time*, Oxford: Oxford University Press, pp. 276-311.

Sklar, L. (1974), *Space, Time and Spacetime*, Berkeley: University of California Press.

Sober, E. (1994), "Temporally Oriented Laws", *Synthese* 94: 171-89.

Wallace, D. (2012), "The Arrow of Time in Physics", preprint, accesible en: http://philsci-archive.pitt.edu/id/eprint/9192.