

Hacia una mejor comprensión de la decoherencia desde una perspectiva general¹

Towards a Better Understanding of Decoherence from a General Perspective

Sebastian Fortin²

RESUMEN

El trabajo se propone presentar un enfoque de la decoherencia cuántica más general que el enfoque tradicional de la decoherencia inducida por el entorno (*environment-induced decoherence*) formulado por Zurek y sus colaboradores. Este nuevo enfoque, que viene desarrollándose en diversas publicaciones de nuestro grupo, adopta la perspectiva del sistema cerrado completo, sistema más entorno, y se basa en el análisis de la evolución temporal de los valores medios de los observables de dicho sistema cerrado. Al unificar la decoherencia inducida por el entorno y algunas propuestas alternativos, este nuevo enfoque facilitaría la elucidación del concepto de decoherencia desde una perspectiva general

Palabras clave: decoherencia cuántica, decoherencia inducida por el entorno, sistema cerrado

ABSTRACT

The present paper proposes an approach to quantum decoherence more general than the traditional *environment-induced decoherence* (EID) approach, formulated by Zurek and his collaborators. This new approach, developed in different publications of our group, adopts the closed-system perspective, i.e. considers the whole system (system plus environment), and is based on the temporal evolution of the expectation values of the closed system's observables. By unifying the environment-induced decoherence and some alternative proposals, this new approach would facilitate the elucidation of the concept of decoherence from a general perspective.

Keywords: Quantum Decoherence, Environment-induced Decoherence, Closed System

¹ Fecha de recibido: 11 de marzo de 2012. Fecha de aceptación: 20 de abril de 2012.

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Conicet) - Universidad de Buenos Aires. Correo electrónico: sfortin@gmx.net.

INTRODUCCIÓN

Todas las interpretaciones de la mecánica cuántica aluden sistemáticamente al proceso de medición sobre un sistema cuántico; este hecho no resulta sorprendente puesto que la medición constituye el nexo indispensable entre la teoría y el plano empírico. Sin embargo, la medición en mecánica cuántica representa tal vez el mayor escollo interpretativo de la teoría: ¿cómo es posible explicar, en una medición cuántica, el valor definido de los observables del aparato macroscópico, cuando desde el punto de vista cuántico el sistema se encuentra en una superposición de estados? El problema es particularmente grave porque no es posible negar que, aun cuando una partícula cuántica se encuentra en un estado de superposición, al efectuar una medición sobre ella observamos la aguja del dispositivo de medición en una posición definida.

Actualmente, en el ámbito de la física el problema de la medición se aborda sobre la base de la teoría de la decoherencia inducida por el entorno (*environment-induced decoherence*, EID). Este programa teórico, desarrollado por un grupo de investigadores liderado por Wojciech H. Zurek (1981; 1982; 1991; 1994; 2003), se basa en el estudio de los efectos de la interacción entre un sistema cuántico, considerado como un sistema abierto, y su entorno. De acuerdo con esta teoría, la interacción sistema-entorno conduce al proceso de decoherencia que selecciona una base privilegiada (*pointer basis*) del espacio de Hilbert del sistema, la cual, a su vez, identifica las propiedades (en términos físicos, los observables) del sistema que adquieren valores definidos.

A pesar su éxito, el enfoque de la decoherencia inducida por el entorno presenta la limitación de no poder aplicarse a sistemas cerrados. Principalmente por este motivo, diversos grupos han desarrollado formalismos alternativos para explicar el fenómeno de la decoherencia. A fin de citar algunos ejemplos, se pueden mencionar los aportes de Diosi (1987), Milburn (1991), Penrose (1995), Casati & Chirikov (1995) y Adler (2004). Algunos de estos métodos son claramente «no disipativos»; por ejemplo, los trabajos de Bonifacio, Olivares, Tombesi y Vitali (2000), Ford y O'Connell (2001), Frasca (2003), Sicardi, Abal, Siri, Romanelli & Donangelo (2003), Gambini & Pullin (2007) y Kiefer & Polarski (2009) no están basados en la disipación de energía desde el sistema hacia el entorno. Entre ellos, se ha desarrollado el enfoque llamado decoherencia autoinducida (*self-induced decoherence*, SID), de acuerdo con el cual un sistema cuántico cerrado con espectro continuo de energía puede experimentar una decoherencia por interferencia destructiva y alcanzar un estado final donde puede obtenerse el límite clásico (Castagnino & Lombardi 2003; 2004; 2005a; 2005b).

La proliferación de formalismos para la decoherencia es beneficiosa si consideramos que con ella se amplía el conjunto de modelos en los que se puede estudiar el fenómeno. Sin embargo, desde el punto de vista teórico, dicha proliferación dificulta la tarea de elucidar el concepto de decoherencia. Esto se debe a que cada enfoque ofrece explicaciones y mecanismos propios, muchas veces incompatibles entre sí. El propósito del presente trabajo es el de dar los primeros pasos hacia la unificación de los distintos enfoques, mediante un esquema muy general que permita dar cuenta del fenómeno de la decoherencia. Con este propósito, en la sección 2 se recuerda el problema de medición en cuántica y el papel que se ha asignado a la decoherencia en la búsqueda de su solución. En la sección 3 se resumen las características principales del enfoque ortodoxo de la decoherencia y se comentan brevemente las características principales de los enfoques alternativos. En la sección 4 se presenta el nuevo esquema de la decoherencia y se estudia su generalidad. En la sección 5 se muestra cómo tanto el enfoque EID como el enfoque SID son casos particulares del esquema general. Finalmente, en la sección 6 se presentan las conclusiones y las perspectivas del artículo.

MEDICIÓN Y DECOHERENCIA

Históricamente, la primera respuesta al problema de la medición se basó en la llamada «hipótesis del colapso», formulada por Werner Heisenberg (1927) en términos de «reducción del paquete de onda», y posteriormente introducida en el formalismo de la teoría como el postulado de proyección por von Neumann (1932). De acuerdo con esta hipótesis, los sistemas cuánticos desarrollan dos tipos de evolución: una evolución dada por la ecuación de Schrödinger (determinista y unitaria) cuando no son observados, y una transición indeterminista y no-unitaria (el «colapso» de la función de onda) al ser medidos. Dicha transición conduce al sistema de su estado de superposición a otro estado en el cual sistema y aparato de medición adquieren propiedades definidas.

Desde el punto de vista de la teoría de la decoherencia, el problema de la medición se ha reformulado, ampliando sus alcances. Según Schlosshauer (2004; 2007), las dificultades conceptuales actuales de la medición cuántica se pueden concentrar en torno a dos núcleos:

- El problema de la lectura definida (*definite outcome*), que consiste en explicar por qué percibimos una lectura definida en un dispositivo de medición cuando su estado es una superposición de lecturas posibles.

- El problema de la base privilegiada (*preferred basis*): dado que existe una ambigüedad teórica en la definición del observable medido debido a la posibilidad matemática de un cambio de base en la expresión del estado del sistema, ¿qué fenómeno físico selecciona tal observable?

En la actualidad la discusión acerca de la capacidad de la teoría de la decoherencia para resolver el problema tradicional de la medición, esto es, el problema de la lectura definida, continúa. Si bien programa despierta amplia adhesión entre los físicos, diversas voces se han alzado para alertar contra la confianza excesiva en el papel de la decoherencia para suministrar una respuesta al primer problema (Bub 1997; Joos 2000; Adler 2003). Por el contrario, el problema de la base privilegiada ha sido mucho menos discutido bajo el supuesto de que su solución es uno de los méritos más evidentes de la teoría de la decoherencia. En efecto, incluso muchos de quienes impugnan la capacidad de la teoría para resolver el problema de la lectura definida, admiten que la decoherencia es el proceso físico que selecciona unívocamente el observable a medir. No obstante, también respecto de este problema la capacidad del enfoque de la decoherencia para suministrar una respuesta ha sido cuestionado (Lombardi & Vanni 2010).

En el presente trabajo no nos detendremos en el análisis de estas controversias, sino que concentraremos nuestra atención en el formalismo de la teoría de la decoherencia, a fin de brindar un enfoque más general que permita dar cuenta del fenómeno no sólo en el caso de sistemas en interacción con su entorno.

EL ENFOQUE ORTODOXO DE LA DECOHERENCIA Y LOS FORMALISMOS ALTERNATIVOS

Como señalan algunos autores (Leggett 1987; Bub 1997), la teoría de la decoherencia se ha convertido en la «nueva ortodoxia» en la comprensión de la mecánica cuántica. Las raíces del programa de la decoherencia se encuentran en los estudios de sistemas abiertos durante la década de los 70 (*cf.* Zeh 1970). Sobre la base de estos trabajos, Zurek y sus colaboradores (Paz & Zurek 2002; Zurek 2003) desarrollaron la idea de que los sistemas macroscópicos, tales como los aparatos de medición, nunca están aislados sino que interactúan significativamente con su entorno. Según Zurek (1981; 1982; 1991), es esta interacción el proceso que selecciona un pequeño subconjunto de estados en el espacio de Hilbert, precisamente los estados que se manifestarán de un modo clásico, como las posiciones definidas del puntero en el dispositivo de medición. Por otra parte, en el campo de la filosofía de la física, la decoherencia ha sido considerada como un elemento relevante para resolver el problema de la

medición (Elby 1994; Healey 1995) y para explicar la emergencia del mundo clásico macroscópico (Bacciagaluppi & Hemmo 1994; 1996).

LA DECOHERENCIA INDUCIDA POR EL ENTORNO

En su versión ortodoxa, la decoherencia inducida por el entorno es un enfoque que se aplica a sistemas abiertos ya que, como su nombre lo indica, considera al sistema bajo estudio S embebido en un entorno E que induce la decoherencia. El sistema S es un sistema abierto que tiene asociado un espacio de Hilbert H_S y el entorno E es un sistema abierto que tiene asociado un espacio de Hilbert H_E . Los correspondientes espacios de von Neumann-Liouville de cada uno son $L_S \equiv H_S \otimes H_S$ y $L_E \equiv H_E \otimes H_E$. Según el enfoque EID, la descripción del proceso de decoherencia se basa en el estudio de la evolución del estado reducido $\hat{\rho}_S(t) \in L_S$ del sistema S , representado en una cierta base que se adopta como «privilegiada». Ya sea calculando explícitamente $\hat{\rho}_S(t)$ o analizando caso por caso la ecuación maestra según la cual $\hat{\rho}_S(t)$ evoluciona, es posible determinar si bajo ciertas condiciones el estado reducido se vuelve diagonal o no en tal base. Puesto que los términos no diagonales del estado están asociados a fenómenos que no tienen análogo clásico, cuando el estado reducido se vuelve diagonal en la base privilegiada se dice que dicho estado representa los aspectos clásicos del sistema: los estados de la base privilegiada, en la cual $\hat{\rho}_S(t)$ se diagonaliza, son los candidatos a estados clásicos.

En el marco del enfoque EID se demuestra que, en muchos modelos de sistemas físicos donde la cantidad de grados de libertad del entorno es enorme, el estado reducido evoluciona de modo tal que sus términos no diagonales tienden a hacerse cero en un tiempo de decoherencia t_D extremadamente corto:

$$\hat{\rho}_S(t) \xrightarrow{t \gg t_D} \hat{\rho}_S^d \text{ (diagonal)} \quad (1)$$

De acuerdo con el enfoque ortodoxo, se dice que, luego de un tiempo de decoherencia t_D , el estado $\hat{\rho}_S(t)$ evolucionó hasta detenerse en el estado $\hat{\rho}_S^d$, diagonal en una cierta base que se convierte, así, en la base privilegiada. Desde esta perspectiva, la diagonalización del estado reducido del sistema S pone de manifiesto un proceso de decoherencia inducido por la gran cantidad de grados de libertad del entorno E . Esto equivale a pensar que $\hat{\rho}_S(t)$ representa el estado de un subsistema del sistema total, y que tal subsistema se convirtió en un sistema clásico. En general, dicho subsistema se concibe como una entidad

bien definida, ya que en muchos casos se considera que representa una partícula. Entonces, puesto que el estado de la partícula se tornó diagonal, se suele decir que la partícula se convirtió en una partícula clásica.

A pesar de sus múltiples éxitos, el enfoque *EID* presenta ciertos problemas conceptuales que han sido escasamente discutidos en la bibliografía sobre el tema:

- *El problema de los sistemas cerrados*: Según Zurek, la explicación del carácter clásico de los sistemas cerrados no puede siquiera ser planteada en el contexto de *EID*. El propio autor admite que, como objeción a su programa, podría esgrimirse que “*el Universo como un todo es siempre una entidad única sin entorno «exterior» y, por tanto, cualquier resolución que involucre su división en sistemas es inacceptable*” (Zurek 1994, 181). Esta objeción, señalada por muy pocos autores (*cf.* Pessoa Jr. 1998), condujo al desarrollo de enfoques no disipativos como los que consideraremos a más adelante.
- *El problema de la definición de los sistemas*: El enfoque *EID* no brinda un criterio general para decidir dónde ubicar el «corte» entre sistema y entorno. La ausencia de tal criterio es una dificultad particularmente seria para un enfoque que insiste en el papel esencial que cumple la interacción del sistema con el entorno en la emergencia de la clasicidad. El propio Zurek reconoce este problema:

En particular, un tema que a menudo se da dado por sentado se cierne amenazante para los fundamentos del programa de decoherencia en su conjunto. Es la cuestión de cuáles son los «sistemas» que juegan un papel tan crucial en todas las discusiones acerca de la emergencia de la clasicidad. Esta cuestión ha sido planteada antes, pero los progresos realizados hasta la fecha han sido lentos, en el mejor de los casos (Zurek 1998, 122).

OTROS ENFOQUES DE LA DECOHERENCIA

Actualmente el formalismo de *EID* ha sido aplicado a un amplio espectro de modelos, sus resultados han tenido muchas confirmaciones experimentales, y recientemente su estudio ha cobrado especial relevancia en el ámbito de la computación cuántica. No obstante, algunos autores desarrollaron enfoques distintos del ortodoxo, los cuales permiten el tratamiento de modelos que representan sistemas que carecen de un entorno entendido al modo tradicional. Algunos ejemplos de este tipo de trabajos son los siguientes:

- En los sistemas como el de Casati y Prosen (2005), la decoherencia se manifiesta en la observación de la desaparición del patrón de interferencia que

se obtiene en una pantalla a la salida de una doble rendija ubicada en una cavidad con una geometría particular. Más allá de los detalles del modelo, éste es un caso en el que no es posible atribuir la desaparición de la interferencia a un entorno externo al sistema.

- El caso de los sistemas estudiados por Castagnino y Lombardi (2003; 2004; 2005a; 2005b) es un caso particular de decoherencia que se produce en la base de la energía (tal es el caso de los modelos de espines también estudiados desde el enfoque *EID*). En este formalismo la pérdida de coherencia es el resultado de una interferencia destructiva en el seno del propio sistema cerrado y, por tanto, no puede en modo alguno atribuirse a la presencia de un entorno externo al sistema.
- En los sistemas estudiados por Gambini y Pulín (2007) se analiza la influencia de un término extra en la ecuación diferencial que rige la evolución temporal del estado del sistema cerrado. Tal término, proveniente de consideraciones basadas en gravedad cuántica, puede interpretarse como una indeterminación en el tiempo físico o un grano grueso temporal. En este formalismo tampoco es posible identificar un entorno que cause la pérdida de coherencia.

Debido a sus características, estos casos de decoherencia quedan fuera del alcance de *EID*, que pretende, como su nombre lo indica, estudiar la decoherencia inducida por el entorno. Por otro lado, cada formalismo ofrece una descripción del fenómeno adecuada a sus propios modelos paradigmáticos, pero ninguno de ellos ofrece un punto de vista general. Por lo tanto, para comprender en profundidad el fenómeno de la decoherencia puede resultar conveniente elaborar un esquema unificador que permita subsumir los diferentes formalismos bajo una visión integradora.

UN ESQUEMA GENERAL PARA LA DECOHERENCIA

Dado un sistema cuántico, el fenómeno de la decoherencia se puede explicar en el marco de un esquema que consiste en aplicar los tres pasos que se detallan a continuación (*cf.* Castagnino et ál., 2008):

- **Primer paso:** Dado el sistema cuántico bajo estudio, se eligen los observables que resultan de interés para el problema que se desea tratar. Estos observables *relevantes* \hat{O}_R conforman el espacio \mathcal{O}_R de observables relevantes del sistema, de modo que $\hat{O}_R \in \mathcal{O}_R$.

- **Segundo paso:** Se obtiene el valor esperado de todos los observables relevantes, $\langle \hat{O}_R \rangle_{\hat{\rho}(t)}$, $\forall \hat{O}_R \in \mathbf{O}_R$, donde $\hat{\rho}(t)$ es el estado del sistema. Este paso se puede efectuar de dos modos distintos pero equivalentes:
 - $\langle \hat{O}_R \rangle_{\hat{\rho}(t)}$ se calcula como el valor esperado de \hat{O}_R en el estado $\hat{\rho}(t)$ del sistema completo, que evoluciona de forma unitaria.
 - Se define un estado de grano grueso $\hat{\rho}_G(t)$ tal que $\langle \hat{O}_R \rangle_{\hat{\rho}(t)} = \langle \hat{O}_R \rangle_{\hat{\rho}_G(t)}$ para todo $\hat{O}_R \in \mathbf{O}_R$, y se calcula su evolución no unitaria, gobernada por una ecuación maestra.
- **Tercer paso:** Se demuestra que $\langle \hat{O}_R \rangle_{\hat{\rho}(t)}$ alcanza un valor final $\langle \hat{O}_R \rangle_{\hat{\rho}_*}$ en un tiempo de decoherencia t_D extremadamente corto:

$$\langle \hat{O}_R \rangle_{\hat{\rho}(t)} \xrightarrow{t \gg t_D} \langle \hat{O}_R \rangle_{\hat{\rho}_*} \quad (2)$$

El estado final $\hat{\rho}_*$ queda representado por un operador que cumple los requisitos usuales, entre ellos, ser autoadjunto; por lo tanto, resulta obvio que se puede escribir en forma diagonal en su propia base de autovectores. Esta base será, precisamente, la base privilegiada. Sin embargo, vale la pena insistir que la ecuación (2) no implica que el estado $\hat{\rho}(t)$ del sistema cerrado tiende al estado final $\hat{\rho}_*$: puesto que $\hat{\rho}(t)$ evoluciona *unitariamente* de acuerdo con la ecuación de Schrödinger (en la versión de von Neumann), no puede alcanzar un estado temporalmente independiente después de un cierto intervalo. Por lo tanto, aunque los términos fuera de la diagonal de $\hat{\rho}(t)$ nunca desaparecen definitivamente a través de la evolución unitaria, el sistema decohere desde *un punto de vista observacional*, es decir, desde el punto de vista dado por los observables relevantes del sistema, $\hat{O}_R \in \mathbf{O}_R$.

Desde este enfoque general, resulta claro que la decoherencia es un proceso descrito desde una perspectiva observacional, un proceso que conduce al límite clásico sólo en tal sentido. En otras palabras, el fenómeno de interferencia queda suprimido porque los términos fuera de la diagonal de $\hat{\rho}(t)$ desaparecen desde el punto de vista de los observables relevantes. El proceso de selección de los estados candidatos a la clasicidad excluye la superposición y sólo retiene los estados definidos por la correspondiente base privilegiada.

CASOS PARTICULARES DEL ESQUEMA GENERAL DE LA DECOHERENCIA

En esta sección mostraremos en casos concretos el poder unificador del esquema general. Tal como quedó de manifiesto en la sección anterior, la clave para obtener la pérdida de unitariedad en la evolución temporal del sistema es la selección de ciertos observables relevantes. Cuando formulamos de este modo al fenómeno de la decoherencia, notamos que hay muchas maneras de elegir dichos observables relevantes. Cada elección da lugar a un enfoque particular de la decoherencia. A continuación mostraremos cómo la adecuada elección de estos observables de interés da lugar a los enfoques *EID* y *SID*.

DECOHERENCIA INDUCIDA POR EL ENTORNO

Como ya fue señalado, *EID* es un enfoque concebido para su aplicación a sistemas abiertos ya que considera el sistema bajo estudio S en interacción con un entorno E que induce la decoherencia. El sistema cerrado compuesto $S \square E$ es el universo U . Queda claro, entonces, que la distinción entre los subsistemas S y E implica la introducción de un corte o partición que, como se mostrará más adelante, equivale a la elección de los observables relevantes del sistema U .

Si bien los tres pasos del esquema general no se encuentran explícitos en el formalismo original de *EID*, este enfoque se puede enmarcar en el esquema general tomando como punto de partida el sistema cerrado U como un todo.

El universo U es un sistema cerrado, con un espacio de Hilbert $\mathbf{H} \equiv \mathbf{H}_S \otimes \mathbf{H}_E$ asociado que es el producto de los espacios de Hilbert correspondientes al sistema propio S (\mathbf{H}_S) y al entorno E (\mathbf{H}_E). El espacio de von Neumann-Liouville de U es $\mathbf{L} \equiv \mathbf{H} \otimes \mathbf{H} = \mathbf{L}_S \otimes \mathbf{L}_E$, donde $\mathbf{L}_S \equiv \mathbf{H}_S \otimes \mathbf{H}_S$ y $\mathbf{L}_E \equiv \mathbf{H}_E \otimes \mathbf{H}_E$.

- Primer paso: Un observable genérico \hat{O} de U pertenece a \mathbf{L} y tiene componentes $O_{i\alpha j\beta}$, donde i, j, \dots son los índices correspondientes a \mathbf{H}_S , y α, β, \dots son los índices correspondientes a \mathbf{H}_E . En el caso considerado, los observables relevantes son los del sistema S . Por lo tanto, la parte del observable \hat{O} que actúa sobre el subespacio \mathbf{H}_E , que es la que se pretende ignorar, debe ser la identidad, $\hat{I}_E \in \mathbf{L}_E$, mientras que la parte que actúa sobre \mathbf{H}_S no tiene más restricciones que el requisito de que $\hat{O}_S \in \mathbf{L}_S$ sea autoadjunto. En consecuencia, los observables relevantes \hat{O}_R adoptan la siguiente forma:

$$\hat{O}_R = \hat{O}_S \otimes \hat{I}_E \in \mathbf{O}_R, \text{ con componentes } O_{Ri\alpha j\beta} = O_{Sij} \delta_{\alpha\beta} \quad (3)$$

donde O_{Sij} son las componentes de \hat{O}_S , y $\mathcal{O}_R \subseteq \mathcal{L}$ es el subespacio de todos los posibles observables relevantes, o sea, en este caso sólo los que representan las propiedades del sistema S .

- **Segundo paso:** Dado un estado $\hat{\rho}$ del sistema completo U , con componentes $\rho_{i\alpha j\beta}$, el valor esperado de cualquier observable relevante $\hat{O}_R \in \mathcal{O}_R$ se obtiene:

$$\langle \hat{O}_R \rangle_{\hat{\rho}} = Tr(\hat{\rho} \hat{O}_R) = \sum_{ij} O_{Sij} \sum_{\alpha} \rho_{i\alpha j\alpha}^* \quad (4)$$

- Se define entonces el estado reducido de S , $\hat{\rho}_S$, que se obtiene efectuando la *traza parcial* sobre los grados de libertad del entorno:

$$\hat{\rho}_S = Tr_E(\hat{\rho}) \in \mathcal{L}_S, \text{ con componentes } \rho_{Sij} = \sum_{\alpha} \rho_{i\alpha j\alpha}^* \quad (5)$$

Con esta definición, el valor esperado $\langle \hat{O}_R \rangle_{\hat{\rho}}$ se puede expresar del siguiente modo:

$$\langle \hat{O}_R \rangle_{\hat{\rho}} = Tr(\hat{\rho} \hat{O}_R) = Tr(\hat{\rho}_S \hat{O}_S) = \langle \hat{O}_S \rangle_{\hat{\rho}_S} \quad (6)$$

- **Tercer paso:** En el contexto del enfoque EID, la evolución del estado reducido $\hat{\rho}_S(t)$ está regida por una ecuación maestra. Como ya fue señalado, en muchos modelos de sistemas físicos se demuestra que $\hat{\rho}_S(t)$ converge, en un tiempo de decoherencia t_D extremadamente corto, a un estado estable $\hat{\rho}_S^d$ (v. ecuación (1)), y la base en la que $\hat{\rho}_S^d$ es diagonal es la base privilegiada. Sin embargo, si se toma en cuenta la definición de estado reducido en términos de traza parcial (ecuación (5)), el valor esperado de cualquier observable \hat{O}_S en el estado reducido $\hat{\rho}_S(t)$ del subsistema S puede obtenerse como valor esperado del observable $\hat{O}_R = \hat{O}_S \otimes \hat{I}_E$ en el estado $\hat{\rho}(t)$ del sistema cerrado completo U (v. ecuación (6)). Por lo tanto, la convergencia de $\hat{\rho}_S(t)$ al estado estable $\hat{\rho}_S^d$ tiene como consecuencia que

$$\langle \hat{O}_S \rangle_{\hat{\rho}_S(t)} = \langle \hat{O}_R \rangle_{\hat{\rho}(t)} \xrightarrow{t \square t_D} \langle \hat{O}_S \rangle_{\hat{\rho}_S^d} = \langle \hat{O}_R \rangle_{\hat{\rho}} \quad (7)$$

donde $\hat{\rho}_* \in \mathbf{L}$ es un operador cuya proyección sobre el subespacio \mathbf{O}_R es justamente $\hat{\rho}_S^d$. Por lo tanto, para todo observable $\hat{O}_R \in \mathbf{O}_R$ se cumple

$$\langle \hat{O}_R \rangle_{\hat{\rho}(t)} \xrightarrow{t \gg t_D} \langle \hat{O}_R \rangle_{\hat{\rho}_*} \quad (8)$$

Si la recién obtenida ecuación (8) se compara con la ecuación (2) de la sección anterior, puede observarse de inmediato la analogía entre ambas. Esto demuestra que el enfoque EID puede también formularse en términos del sistema cerrado U y, desde esta perspectiva, la decoherencia del sistema abierto puede explicarse a través de los tres pasos del nuevo enfoque general propuesto en la sección anterior. En otras palabras, la decoherencia inducida por el entorno queda subsumida como un caso particular de la decoherencia descrita desde la perspectiva del sistema cerrado.

De este modo, cabe concluir que la partición del sistema cerrado U en un sistema S y su entorno E equivale a la elección de un subespacio de observables relevantes de U . Como el mismo sistema U puede descomponerse de muchas formas distintas y no hay nada esencial en la descomposición $U = S \cup E$, en principio no es necesario establecer un criterio inequívoco para ubicar el «corte» entre sistema y entorno. La división entre sistema y entorno parece ser, desde el punto de vista teórico, un elemento adicional, independiente de la teoría, introducido por algún observador particular, que expresa su interés por alguna parte de la totalidad y su desinterés por el resto. A modo de ejemplo puede pensarse en un oscilador armónico cuántico A que interactúa con muchos otros osciladores cuánticos (sin que éstos interactúen entre sí) formando un sistema U . Una visión, si se quiere pragmática o ingenieril, sugiere que en este caso el oscilador A es el sistema y el resto de los osciladores constituye el entorno. Sin embargo, esta división, muy intuitiva por cierto, no tiene fundamento teórico alguno y está basada en la experiencia o en la costumbre de tratar sistemas de esta manera. Dicho de otro modo, en general la física aplicada fija su interés en ciertos observables y no en otros, y las aplicaciones prácticas usuales determinan cuál es el objeto de interés para un fin dado. Lo cual no impide que en otro tipo de aplicaciones sea conveniente dividir a U de otro modo o no dividirlo de modo alguno.

En definitiva, el *problema de la definición de los sistemas* no se resuelve, sino que se disuelve una vez que se admite que no existe partición privilegiada del sistema cerrado completo, sino que éste puede dividirse en sistema y entorno de múltiples maneras, todas igualmente válidas desde un punto de vista teórico. En otras palabras, la decoherencia es un fenómeno relativo a la

partición considerada y, por tanto, no es necesario un criterio inequívoco para identificar al sistema S y su entorno E .

DECOHERENCIA AUTOINDUCIDA

El enfoque de la decoherencia autoinducida (SID) es una perspectiva alternativa aplicable a sistemas cerrados, es decir, sistemas sin entorno. Para abreviar, se presentará la teoría en el caso más sencillo (*cf.* Castagnino & Lombardi 2003; 2004; 2005a; 2005b).

SID es el enfoque que inspiró el esquema general de la decoherencia que aquí se presenta. Por esta razón, los tres pasos del esquema general aparecen de forma explícita en el formalismo.

- **Primer paso:** Se considera un sistema cuántico con un hamiltoniano \hat{H} con espectro continuo: $\hat{H}|\omega\rangle = \omega|\omega\rangle$, $\omega \in [0, \infty)$. Entonces, cualquier observable se puede escribir como:

$$\hat{O} = \int_0^\infty \int_0^\infty O(\omega, \omega') |\omega\rangle \langle \omega'| d\omega d\omega' \quad (9)$$

donde las coordenadas $O(\omega, \omega')$ de \hat{O} quedan representadas por cualquier núcleo o distribución. La restricción en el espacio de observables se introduce al considerar como relevantes sólo los llamados «observables de van Hove», cuyas componentes están dadas por:

$$O_R(\omega, \omega') = O_R(\omega) \delta(\omega - \omega') + \tilde{O}_R(\omega, \omega') \quad (10)$$

donde $\tilde{O}_R(\omega, \omega')$ es una función regular. Por lo tanto, en este caso los observables relevantes tienen la siguiente forma:

$$\hat{O}_R = \int_0^\infty O_R(\omega) |\omega\rangle \langle \omega| d\omega + \int_0^\infty \int_0^\infty \tilde{O}_R(\omega, \omega') |\omega\rangle \langle \omega'| d\omega d\omega' \quad (11)$$

Esta restricción en los observables no disminuye la generalidad del enfoque SID, ya que los observables que no pertenecen al espacio de van Hove \mathcal{O}_{VH} no son experimentalmente accesibles y, por esta razón, en la práctica son siempre aproximados con la precisión deseada por observables regulares para los cuales el enfoque funciona satisfactoriamente (para un argumento

completo, cf. Castagnino & Lombardi 2004). En forma análoga es posible expresar el estado $\hat{\rho}$ del sistema a partir de los núcleos $\rho(\omega)$ y $\tilde{\rho}(\omega, \omega')$.

- **Segundo paso:** El valor esperado de un observable $\hat{O}_R \in \mathcal{O}_{VH}$ en el estado $\hat{\rho}$ se puede calcular como la acción del funcional $\hat{\rho}$ sobre el operador O_R :

$$\langle \hat{O}_R \rangle_{\hat{\rho}} = \int_0^\infty \rho^*(\omega) O_R(\omega) d\omega + \int_0^\infty \int_0^\infty \tilde{\rho}^*(\omega, \omega') \tilde{O}_R(\omega, \omega') d\omega d\omega' \quad (12)$$

donde $\rho(\omega)$ y $O_R(\omega)$ son funciones tales que la primera integral está bien definida. La evolución temporal de este valor esperado está dada por:

$$\langle \hat{O}_R \rangle_{\hat{\rho}(t)} = \int_0^\infty \rho^*(\omega) O_R(\omega) d\omega + \int_0^\infty \int_0^\infty \tilde{\rho}^*(\omega, \omega') \tilde{O}_R(\omega, \omega') e^{i\frac{\omega-\omega'}{\hbar} t} d\omega d\omega' \quad (13)$$

- **Tercer paso:** Como se requiere que la función $\tilde{\rho}^*(\omega, \omega') \tilde{O}_R(\omega, \omega')$ sea regular (en verdad, simplemente L_1 en la variable $\nu = \omega - \omega'$), se puede aplicar el teorema de Riemann-Lebesgue a la ecuación (13). El teorema de Riemann-Lebesgue expresa matemáticamente la interferencia destructiva al afirmar que

$$si f(\nu) \in L_1 \Rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^\infty f(\nu) e^{i\nu t} d\nu = 0 \quad (14)$$

Como consecuencia, al aplicar el límite a la ecuación (13), su segundo término desaparece para $t \rightarrow \infty$:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \langle \hat{O}_R \rangle_{\hat{\rho}(t)} = \int_0^\infty \rho^*(\omega) O_R(\omega) d\omega \quad (15)$$

Esto significa que, para $t \rightarrow \infty$, el valor esperado de cualquier observable $\hat{O}_R \in \mathcal{O}_{VH}$ en el estado $\hat{\rho}(t)$ se puede calcular como si el sistema se encontrara en un estado estable $\hat{\rho}_*$:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \langle \hat{O}_R \rangle_{\hat{\rho}(t)} = \langle \hat{O}_R \rangle_{\hat{\rho}_*} \quad (16)$$

donde \hat{P}^* es un operador con componentes $\rho(\omega)$, es decir, diagonal en la base de la energía $\{|\omega\rangle\langle\omega|\}$. A su vez, si el decaimiento del valor esperado $\langle\hat{O}_R\rangle_{\hat{\rho}(t)}$ es suficientemente rápido como para producirse en un tiempo de decoherencia t_D extremadamente corto, la ecuación (16) puede escribirse como

$$\langle\hat{O}_R\rangle_{\hat{\rho}(t)} \xrightarrow{t \gg t_D} \langle\hat{O}_R\rangle_{\hat{\rho}^*} \quad (17)$$

Si la recién obtenida ecuación (17) se compara con la ecuación (2) de la sección anterior, puede observarse de inmediato la analogía entre ambas, así como respecto de la ecuación (8) correspondiente al caso del enfoque *EID*. De este modo, a través de los tres pasos, *SID* cancela la interferencia y selecciona los estados privilegiados que, eventualmente, pueden ser observados al final del proceso. Si bien el enfoque fue concebido originalmente para sistemas cerrados con un espectro continuo de energía, también puede aplicarse a sistemas cerrados con espectro discreto de energía bajo ciertas condiciones definidas (*cf.* Castagnino & Fortin 2011).

La aplicación del enfoque general de la decoherencia al caso de *SID* resuelve el problema de los sistemas cerrados que afecta al enfoque *EID*. En efecto, la decoherencia puede producirse en sistemas cerrados, incluso bajo una selección de los observables relevantes tan genérica como la que propone el enfoque *SID*, que sólo descarta observables que no son experimentalmente accesibles.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

En el presente trabajo se presenta un esquema teórico general para dar cuenta del fenómeno de la decoherencia en sistemas abiertos y cerrados, sobre la base de los observables que se consideran relevantes en cada caso particular. Dicho esquema puede esgrimir dos argumentos en su favor:

- Por una parte, resuelve o disuelve los principales problemas conceptuales a los que actualmente aún se enfrenta el enfoque ortodoxo de la decoherencia inducida por el entorno. En particular, pone de manifiesto que la decoherencia puede ocurrir en sistemas cerrados y que, en la medida en que es un fenómeno relativo a la partición elegida en el sistema cerrado, no requiere un criterio unívoco para seleccionar el sistema y su entorno.
- Por otra parte, brinda una primera aproximación a la unificación de los distintos formalismos para describir la decoherencia bajo un único sistema

conceptual. Tal unificación es un paso necesario si se desea elucidar el concepto de decoherencia, abarcando los diversos aspectos desarrollados por distintos autores utilizando formalismos y conceptos propios. En este sentido, el esquema general aquí presentado logra subsumir como casos particulares dos enfoques claramente distintos: la decoherencia inducida por el entorno y la decoherencia autoinducida. En ambos casos el esquema puede explicar la aparición de características clásicas en sistemas cuánticos mediante la elección de ciertos observables relevantes que resultan de interés en cada enfoque.

Sobre la base de estos resultados, considerados de importancia para la comprensión conceptual del fenómeno de la decoherencia, el trabajo futuro debería dirigirse a identificar los observables relevantes que dan lugar a los restantes formalismos, a fin de dar forma a un concepto completamente general de decoherencia.

TRABAJOS CITADOS

- Adler, S. “Why decoherence has not solved the measurement problem: a response to P. W. Anderson”. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 34 (2003): 135-142.
- . *Quantum Theory as an Emergent Phenomenon*. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- Bacciagaluppi, G & Hemmo, M.. “Making sense of approximate decoherence”. *Proceedings of the Philosophy of Science Association*, 1 (1994): 345-354.
- . “Modal interpretations, decoherence and measurements”. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 27 (1996): 239-277.
- Bonifacio, R., Olivares, S., Tombesi, P. & Vitali, D. “Model-independent approach to nondissipative decoherence”. *Physical Review A*, 61 (2000): 053802.
- Bub, J. *Interpreting the Quantum World*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- Casati, G. & Chirikov, B. “Quantum chaos: unexpected complexity”. *Physica D*, 86 (1995): 220-237.
- Casati, G. & Prosen, T. “Quantum chaos and the double-slit experiment”. *Physical Review A*, 72 (2005): 032111.
- Castagnino, M. & Fortin, S. “Predicting decoherence in discrete models”. *International Journal of Theoretical Physics*, 50 (2011): 2259-2267.

- Castagnino, M., Fortin, S., Laura, R. & Lombardi, O. “A general theoretical framework for decoherence in open and closed systems”. *Classical and Quantum Gravity*, 25 (2008): 154002.
- Castagnino M. & Lombardi, O. “The self-induced approach to decoherence in cosmology”. *International Journal of Theoretical Physics*, 42 (2003): 1281-1299.
- . “Self-induced decoherence: a new approach”. *Studies In History and Philosophy of Science Part B: Studies In History and Philosophy of Modern Physics*, 35 (2004): 73-107.
- . “Self-induced decoherence and the classical limit of quantum mechanics”. *Philosophy of Science*, 72 (2005a): 764-776.
- . “Decoherence time in self-induced decoherence”. *Physical Review A*, 72 (2005b): 764-776.
- Diosi, L. “A universal master equation for the gravitational violation of quantum mechanics”. *Physics Letters A*, 120 (1987): 377-381.
- Elby, A. “The «decoherence» approach to the measurement problem in quantum mechanics”. *Proceedings of the 1994 Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, Vol. 1. East Lansing: Philosophy of Science Association, 1994.
- Ford, G. W. & O’Connell, R. F. “Decoherence without dissipation”. *Physics Letters A*, 286 (2001): 87-90.
- Frasca, M. “General theorems on decoherence in the thermodynamic limit”. *Physics Letters A*, 308 (2003): 135-139.
- Gambini, R. & Pulin, J. “Relational physics with real rods and clocks and the measurement problem of quantum mechanics”. *Foundations of Physics*, 37 (2007): 1074-1092.
- Healey, R. “Dissipating the quantum measurement problem”. *Topoi*, 14 (1995): 55-65.
- Heisenberg, W. “Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischer Kinematik und Mechanik”. *Zeitschrift für Physik*, 43 (1927): 172-198. Versión inglesa: “The physical content of quantum kinematics and mechanics”. *Quantum Theory and Measurement*. Eds. J. A. Wheeler & W. H. Zurek. Princeton: Princeton University Press, 1983.
- Joos, E. “Elements of environmental decoherence”. *Decoherence: Theoretical, Experimental, and Conceptual Problems*. Eds. P. Blanchard, D. Giulini, E.

- Joos, C. Kiefer & I.-O. Stamatescu. Heidelberg-Berlin: Springer, 2000. Lecture Notes in Physics 538.
- Kiefer, C. & Polarski, D. “Why do cosmological perturbations look classical to us?”. *Advanced Science Letters*, 2 (2009): 164-173.
- Leggett, A. J. “Reflections on the quantum measurement paradox”. *Quantum Implications*. Eds. B. J. Hiley & F. D. Peat. Londres: Routledge and Kegan Paul, 1987.
- Lombardi, O. & Vanni, L. “Medición cuántica y decoherencia: ¿qué medimos cuando medimos?”. *Scientiae Studia*, 8 (2010): 273-291.
- Milburn, G. J. “Intrinsic decoherence in quantum mechanics”. *Physical Review A*, 44 (1991): 5401-5406.
- Paz, J. P. & Zurek, W. H. “Environment-induced decoherence and the transition from quantum to classical”. *Fundamentals of Quantum Information: Quantum Computation, Communication, Decoherence and All That*. Ed. D. Heiss. Heidelberg-Berlin: Springer, 2002.
- Penrose, R. *Shadows of the Mind*. Oxford: Oxford University Press, 1995.
- Pessoa Jr., O. “Can the decoherence approach help to solve the measurement problem?”, *Synthese*, 113 (1998): 323-346.
- Schlosshauer, M. “Decoherence, the measurement problem, and interpretations of quantum mechanics”, *Reviews of Modern Physics*, 76 (2004): 1267-1305.
- . *Decoherence and the Quantum-to-Classical Transition*. Berlin-Heidelberg: Springer, 2007.
- Sicardi, A. C., Abal, G., Siri, R., Romanelli, A. & Donangelo, R. “Intrinsic decoherence and irreversibility in a quasiperiodic kicked rotor”, arXiv:quant-ph/0308162, 2003.
- Von Neumann, J. *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Trad. R. T. Beyer. Princeton: Princeton University Press, [1932] 1996.
- Zeh, D. “On the interpretation of measurement in quantum theory”, *Foundations of Physics*, 1 (1970): 69-76.
- Zurek, W. H. “Pointer basis of quantum apparatus: into what mixture does the wave packet collapse?”, *Physical Review D*, 24 (1981): 1516-1525.
- . “Environment-induced superselection rules”, *Physical Review D*, 26 (1982): 1862-1880.

- “Decoherence and the transition from quantum to classical”, *Physics Today*, 44 (1991): 36-44.
- “Preferred sets of states, predictability, classicality and environment-induced decoherence”. *Physical Origins of Time Asymmetry*. Eds. J. J. Halliwell, J. Pérez-Mercader & W. H. Zurek, Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- “Decoherence, einselection, and the quantum origins of the classical”. *Reviews of Modern Physics*, 75 (2003): 715-776.