

Adversus collapsum

Guillermo García Alcaine

Departamento de Física Teórica I, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense

Gabriel Álvarez

Departamento de Física Teórica II, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense

Resumen

Evidencia teórica y experimental reciente respalda la tesis de que en los sistemas cuánticos cerrados no hay separación tajante entre evolución reversible y medición irreversible. En estos sistemas todos los procesos físicos son reversibles en principio y hay una gradación continua desde los fácilmente reversibles hasta aquellos que pueden considerarse irreversibles para todos los efectos prácticos. El colapso tradicional del estado cuántico, postulado como proceso matemático irreversible, no unitario, no causal, no local, e instantáneo resulta difícil de conciliar con la Física, y en particular con la Relatividad.

Abstract

Recent theoretical and experimental evidence supports the claim that in quantum-mechanical closed systems there is not a sharp contradistinction between reversible evolution and irreversible measurement. In these systems, all physical processes are reversible in principle, and there is a continuous range from easily reversible processes to processes that can be considered irreversible for all practical purposes. The traditional irreversible, nonunitary, noncausal, nonlocal, instantaneous state reduction postulate is difficult to reconcile with Physics, and in particular with Relativity.

Introducción

Los diferentes sentidos con los que en Mecánica Cuántica se usan términos como irreversibilidad, medición y colapso provocan numerosos malentendidos. Como veremos, irreversibilidad puede utilizarse en sentido matemático o físico, y en este segundo caso, en sentido estricto o práctico. Medición puede usarse para designar un tipo de procesos que no son evoluciones unitarias, o aquellas evoluciones unitarias en las que intervienen estados de aparatos macroscópicos y que son irreversibles a efectos prácticos. Colapso puede representar un tipo fundamental de proceso (proceso de tipo 1 en la terminología de von Neumann), o simplemente designar un algoritmo eficaz para incorporar nuevos datos al estado cuántico asignable a un sistema físico.

En estas notas trataremos de arrojar alguna luz sobre estos conceptos, presentando reunidas una serie de ideas debidas a muchos autores, a los que la necesaria limitación en las referencias no nos permite hacer justicia.

Medición e irreversibilidad física

Las exposiciones tradicionales de la Mecánica Cuántica distinguen entre evolución continua, reversible y causal, regida por la ecuación de Schrödinger o sus alternativas relativistas, y medición discontinua, irreversible y estocástica, descrita por el postulado de reducción o colapso del estado cuántico (Apéndice E de **Gal 89**). Pero los aparatos de medida son también sistemas físicos, y si el conjunto formado por el sistema observado y el aparato de medida es un sistema cerrado, su evolución también debería ser continua y reversible, sin que se produjera ninguna “medición”. Para tratar de justificar la discontinuidad e irreversibilidad características de la medición se suele entrar en una recurrencia indefinida en la que el primer aparato de medida interactúa con un segundo aparato, que a su vez interactúa con un tercero y así sucesiva-

mente, sin que quede claro cuándo y por qué la evolución del sistema total cada vez más complejo puede convertirse bruscamente en medición.

Por el contrario, recientemente se va imponiendo la tesis de que en los sistemas cerrados no hay una separación tajante entre evolución reversible y medición irreversible. Existe más bien un continuo que se extiende desde los procesos físicos fácilmente reversibles hasta aquellos que pueden considerarse irreversibles para todos los efectos prácticos¹, ya que invertirlos requeriría dispositivos irrealizablemente complicados.

Así, hacer distinguible el camino en experimentos de doble rendija implica la desaparición de las interferencias (**Feyn 65**), pero en ciertas situaciones es posible “borrar” la información sobre el camino y recuperar las interferencias perdidas (**Scu 91**). La alternativa entre completar la medición² o borrarla puede resolverse incluso después de que la llegada de cada partícula haya quedado registrada en una pantalla, en un ejemplo de *elección retardada* (**Eng 99, Kim 99**). Estos resultados experimentales cuestionan la irreversibilidad absoluta del proceso de medición.

En los experimentos de doble rendija hay también evidencia de situaciones intermedias entre evolución pura y medición perfecta: una determinación incompleta de la rendija atravesada viene acompañada por una persistencia parcial de la interferencia, situación conceptualmente muy diferente de la simplificación dicotómica “camino o interferencias” con la que se suele analizar este sistema, y que es un caso particular de la disyuntiva “medición o evolución”. Si para determinar sin ambigüedad la rendija atravesada se utilizan fotones con longitud de onda pequeña, modificarán apreciable e incontroladamente el momento lineal de la partícula y destruirán las interferencias. La perturbación del estado sería despreciable si se emplearan fotones de gran

¹La expresión en inglés “for all practical purposes” y su acrónimo FAPP fueron introducidos en el debate cuántico por J. S. Bell.

²Haciéndola irreversible para todos los efectos prácticos.

longitud de onda, pero en tal caso no quedaría determinada la rendija. Entre los dos extremos hay un continuo de casos intermedios (**Feyn 65**). Esta sería pues otra manifestación de la indeterminación posición-momento de Heisenberg. El análisis de la doble rendija con átomos (**Scu 91**) demuestra sin embargo que se puede hacer distinguible el camino recorrido con intercambios de energía y momento muy pequeños; la desaparición de la interferencia a veces es algo mucho más sutil, consecuencia del enredo (*entanglement*) entre el sistema y el aparato de medida.

Parece por tanto que no existe una distinción cualitativa entre evolución y medición, y que las diferencias son meramente cuantitativas: unos procesos son fácilmente reversibles y otros prácticamente irreversibles, aunque en sistemas finitos cerrados todos los procesos físicos sean reversibles en principio³. En consecuencia, el término medición debería emplearse para designar las evoluciones unitarias que sin embargo son irreversibles para todos los efectos prácticos, y en las que intervienen aparatos de medida complejos y usualmente macroscópicos⁴.

³Los sistemas abiertos sí pueden ser irreversibles en sentido estricto, su entropía de von Neumann puede crecer y sus coherencias disminuir. Los sistemas cerrados pueden ser difíciles de conseguir en la práctica, pero los problemas conceptuales que discutimos se presentan precisamente en ellos. Otras reflexiones recientes sobre los problemas asociados con la medición en sistemas cerrados y abiertos pueden verse en (**Gal 00, San 00**).

⁴La caracterización de lo que constituye un aparato de medida no es trivial. Por ejemplo, un dispositivo de Stern-Gerlach por sí sólo no es un aparato de medida del espín, ya que la interacción entre el momento dipolar magnético de una partícula con espín y el campo magnético inhomogéneo del Stern-Gerlach no es irreversible: es posible en principio reconstruir el estado inicial reuniendo los diversos caminos con un Stern-Gerlach inverso. Las coherencias entre los estados de espín para los diversos caminos en el Stern-Gerlach no se pierden hasta que se determina irreversiblemente (para todos los efectos prácticos) cuál es el camino que sigue la partícula. La medición de una componente de espín exige pues, además del Stern-Gerlach, un detector del camino de salida de la partícula.

En los comienzos de la Mecánica Cuántica se especuló sobre el necesario carácter clásico de los aparatos de medida, creando con ello otra descripción dual, cuántica para los sistemas observados microscópicos y clásica para los aparatos de medida macroscópicos, con la dificultad añadida de tener que establecer una frontera entre ambos. La opinión mayoritaria actual es que todo es cuántico, y el objetivo es explicar la emergencia del mundo clásico a partir del cuántico.

Colapso matemático del estado cuántico

En la formulación axiomática tradicional de la Mecánica Cuántica se postula que el proceso de medición viene descrito mediante una transformación matemática del estado cuántico, llamada colapso o reducción del estado, que es estrictamente irreversible. Este postulado se introduce para evitar que los sistemas cerrados que incluyen al aparato de medida se vean forzados a evolucionar de forma continua, unitaria, y reversible.

La transición del estado anterior al posterior al colapso no puede invertirse, ya que en general existen infinitos estados cuánticos distintos que pueden colapsar a uno dado, y el colapso no guarda recuerdo del estado de partida. En términos matemáticos, el colapso se implementa mediante la actuación de operadores de proyección que no tienen inverso.

Algunas veces se considera el colapso como un cambio del propio sistema. Esta interpretación proviene de atribuir significado físico directo al estado cuántico. Sin embargo el estado cuántico *no* es una propiedad observable (**Gal 89**), sino un instrumento puramente matemático que contiene toda la información disponible sobre el sistema, o más precisamente, el generador de las distribuciones de probabilidad de todos los observables, y en particular de todas las correlaciones⁵.

En cualquier caso, la definición precisa de aparato de medida es mucho menos crucial si hay una transición continua entre evolución y medición, que si hay una distinción tajante entre ambos procesos.

⁵ La interpretación de los cambios del estado cuántico como cambios del propio sistema físico, origen de tantos problemas al utilizar el colapso o reducción del estado, es una extrapolación indebida del caso clásico. Los estados puros clásicos son puntos en el espacio físico que representan directamente propiedades observables (posiciones y momentos), y las trayectorias en dicho espacio físico representan los cambios en las propiedades físicas del sistema. La descripción cuántica es muy diferente: los estados puros están representados por rayos en un espacio de Hilbert proyectivo y carecen de interpretación física inmediata; por tanto tampoco la tienen las trayectorias en el espacio de Hilbert, que describen únicamente la evolución de las distribuciones de probabilidad de los resultados de los posibles experimentos realizables sobre el sistema (**Fusch 00**).

Ni el colapso de von Neumann, ni la evolución unitaria del estado cuántico, describen directamente cambios físicos del sistema.

Hemos comentado ya algunas de las dificultades que plantea el tradicional colapso o reducción del estado cuántico. La siguiente recopilación no exhaustiva las recoge junto con otras adicionales.

El colapso matemático es estrictamente irreversible, mientras que la irreversibilidad física en sistemas finitos cerrados es sólo cuantitativa. Exige un postulado específico adicional, con lo que la teoría resultante es poco económica. Introduce un insatisfactorio carácter dual, con una distinción teórica tajante entre evolución y medición, aunque hay evidencia experimental de casos intermedios. Se postula como instantáneo y simultáneo en todo el espacio, lo que es incompatible con la Relatividad Especial⁶. Incluso prescindiendo de cambios en el sistema de referencia, en cualquier referencial concreto es difícil precisar el instante en el que se produce, sobre todo en los experimentos de elección retardada. Es incompatible con la conservación de energía-momento (**Pear 00**). Es difícil especificar a priori qué características debe tener una interacción para poder producirlo⁷. Finalmente, induce frecuentemente a conclusiones físicas erróneas (**Ball 90b, Eng 99**).

⁶Puesto que la simultaneidad depende del sistema de referencia, esta característica del colapso es incompatible con la equivalencia entre inerciales: si es simultáneo en unos referenciales, no podrá serlo en otros. La instantaneidad tampoco sería compatible con la causalidad relativista si el colapso transmitiera información de cualquier tipo (sobre los resultados que pueden o no pueden obtenerse en mediciones en otros puntos, por ejemplo).

⁷¿Puede producir colapso un dispositivo de observación sencillo? Si no es así, ¿cómo de complicado debe de ser para producirlo? Por ejemplo: ¿es suficiente un grabador de vídeo colocado en el interior de la jaula para producir el colapso del estado del gato de Schrödinger? Si finalmente el gato aparece sin vida, ¿el colapso del estado y la muerte del gato se producen en el momento de abrir la jaula (con el pobre felino en una especie de Limbo hasta ese momento), o en un momento anterior registrado en la cinta horas o días antes? (un forense podría distinguir a posteriori entre ambas posibilidades). Más adelante comprobaremos cómo estas preguntas se resuelven distinguiendo entre el colapso como proceso físico y el colapso como actualización de información.

Mención especial merecen los problemas suscitados por la “consciencia del observador” como posible causa del colapso: ¿La consciencia es una propiedad todo-nada, o hay grados de consciencia? En el segundo caso, ¿cuánta consciencia es necesaria para producir el colapso? ¿Colapsan el estado cuántico los observadores despistados, incompetentes o con “alteraciones de la consciencia”? ¿Tiene la consciencia soporte físico? ¿Está asociada a algún tipo de “hardware” (células nerviosas, red de conexiones entre ellas, conjunto de señales eléctricas y químicas), o de “software” (la autoprogramación del cerebro, quizás), o es algo inmaterial? Si tiene algún tipo de soporte

En conclusión, el colapso matemático irreversible, no unitario, no causal, no local, e instantáneo (Gho 99) parece difícil de conciliar con la Física.

Colapso en sistemas enredados

El colapso en sistemas extensos enredados resulta especialmente problemático. En las discusiones sobre el sistema EPR-Bohm de dos partículas de espín $1/2$ en el estado singlete es usual encontrar afirmaciones del siguiente tipo: “una medición sobre una de las partículas *influye inmediatamente* en el estado de la otra”, o “el resultado obtenido por un observador al medir una componente arbitraria de espín de una las partículas *determina* el valor de la correspondiente componente de espín de la otra partícula, cualquiera que sea su posición”. Estas afirmaciones implican una acción a distancia instantánea que Einstein se negaba justificadamente a aceptar⁸. La última frase entre comillas sugiere además que el valor de la componente de espín de la segunda partícula queda fijado por el resultado de la medida en la primera, con independencia de que dicha componente de espín de la segunda partícula sea medida o no: esto ni siquiera es compatible con el formalismo cuántico, en el que una componente de espín no tiene en general valor definido hasta que se mide (es decir, hasta que la determinación de su valor se

físico, ¿por qué no se le aplica el argumento que condujo a la recurrencia infinita de aparatos de medida? ¿Queda la consciencia fuera de las leyes físicas o bien obedece leyes diferentes de las conocidas hasta el momento? ¿Es un atributo único de los seres humanos? ¿Incluidos los recién nacidos, o sólo a partir de cierta edad? ¿Se adquiere progresivamente, o de golpe? ¿Puede perderse? ¿Es un atributo compartido total o parcialmente por los seres orgánicos en general? ¿O al menos por los organismos superiores? ¿O las inteligencias artificiales suficientemente complejas? ¿No hubo colapso en el Universo hasta la aparición del primer ser consciente? Cualquier interpretación que pretenda utilizar la consciencia de forma consistente debería tener respuestas a éstas y otras preguntas similares.

⁸Einstein prefería suponer que los resultados obtenidos en estas mediciones eran elementos de realidad física presentes en cada sistema individual ya antes de la medición. Puesto que la descripción colectiva cuántica no incluye estos elementos de realidad, la Mecánica Cuántica sería en tal caso una teoría incompleta. Sin embargo, los experimentos sobre desigualdades de Bell parecen rechazar esta posibilidad.

vuelve irreversible para todos los efectos prácticos). Los análisis teóricos sobre los estados de Hardy (**Har 93**) para dos partículas y los de GHZ (**Gre 90**) para tres confirman que el hecho de admitir valores bien definidos para componentes de espín no medidas conduce a contradicciones cruciales con las predicciones cuánticas. En Mecánica Cuántica no tiene sentido incorporar a la descripción del sistema resultados de experimentos no realizados, por ejemplo el valor de una componente de espín que no se ha medido.

También son frecuentes afirmaciones como: “al efectuar A una medición sobre la primera partícula, el estado de la segunda colapsa...”. Si las mediciones efectuadas por los observadores A y B están separadas por un intervalo de género tiempo y la medida de A es anterior a la de B, las objeciones a esta descripción son esencialmente estéticas. Pero si las mediciones de A y B están separadas por un intervalo de género espacio⁹, esta descripción es incompatible con la Relatividad. En efecto: para algunos observadores inerciales la medición de A sería anterior a la de B, para otros al revés, y todavía para otros las dos mediciones serían simultáneas: ¿quién es pues el que colapsa y quién el colapsado? Explicar así las correlaciones experimentalmente observadas supone abandonar la equivalencia entre todos los referenciales inerciales, otorgando carácter privilegiado a los observadores para los cuales la medición de A es anterior a la de B.

Pero es que la influencia de unas partes del sistema total sobre otras tampoco es compatible con la descripción que la propia Mecánica Cuántica hace de los sistemas compuestos. Toda la información accesible mediante manipulaciones efectuadas sólo sobre un subsistema de un sistema compuesto está incluida en el llamado *estado reducido*¹⁰, obtenido tomando trazas sobre el resto

⁹Experimentalmente se ha comprobado que las correlaciones predichas por la Mecánica Cuántica existen también en el caso de mediciones en el estado singlete separadas por intervalos de género espacio.

¹⁰Por ejemplo, en el caso de dos partículas en el estado singlete, el estado de espín reducido para cada una de ellas es la matriz unidad 2×2 , totalmente despolarizada (Apéndice 2 en **Eng 99**). A partir de estos estados reducidos puede predecirse que las probabilidades de encontrar los valores $+1/2$ ó $-1/2$ para una componente cualquiera de espín de una de las partículas son iguales, y esto es todo lo que puede decirse sobre el espín de una sola de las dos partículas. En cambio, el estado total es necesario para calcular las correlaciones entre una componente de espín de una partícula y una de la otra: en el caso del estado singlete, puede predecirse una anticorrelación per-

de las propiedades del sistema total (**Ball 90a**). En particular, mediante mediciones efectuadas por B sobre su partícula es imposible detectar, no ya cuál ha sido el resultado de una presunta medición “previa” de A, sino ni siquiera si dicha medición se ha realizado, se está realizando, o no se realiza nunca. Esta parte del formalismo cuántico ortodoxo es pues imposible de conciliar con cualquier descripción en la que el resultado de B sea *influido* en alguna forma (no digamos ya *determinado*) por la medición de A.

Recapitulando esta sección: suponer que el colapso del estado cuántico conlleva algún tipo de cambio instantáneo con consecuencias físicas, o que los resultados de una medición en un punto influyen, condicionan o determinan los valores de propiedades físicas en puntos separados por intervalos de género espacio, viola la Relatividad, el otro pilar de la Física actual¹¹. Suponer que a través del colapso las mediciones sobre una parte de un sistema compuesto pueden influir sobre otras partes del sistema, espacialmente separadas o no, es incompatible también con la descripción cuántica ortodoxa de los sistemas compuestos: los resultados para cualquier actuación restringida a una parte del sistema total dependen sólo del estado reducido de dicha parte.

Correlaciones y sólo correlaciones

Afortunadamente todos los problemas citados hasta aquí surgen al atribuir al colapso una existencia física, interpretándolo como un cambio instantáneo y detectable del sistema, y desapa-

fecta si las dos componentes corresponden a la misma dirección, y correlaciones bien definidas si las dos direcciones forman entre sí un ángulo dado cualquiera. Éste es uno de los resultados más sorprendentes de la Mecánica Cuántica: que la información sobre el sistema total sea máxima (estado total puro) mientras que la información sobre cada uno de los subsistemas por separado sea mínima (estados reducidos totalmente despolarizados). Este hecho no tiene análogo clásico y desafía nuestra intuición, pero no conduce a ninguna contradicción interna ni con los experimentos.

¹¹“Sólo hay una hipótesis que sea tomada más por descontado que la mecánica cuántica en física de partículas elementales, y es la relatividad”, afirma por ejemplo F. J. Yndurain (**Ynd 00**).

recen cuando se evita su uso o se hace una utilización correcta del mismo¹². Lo que existe entre los resultados de A y B son correlaciones¹³, no relaciones causales, y la distinción entre ambos tipos de relaciones es tan clara en el caso cuántico como en el clásico. Aunque la confusión entre correlación y relación causal pudo ser más o menos disculpable en los orígenes de la Mecánica Cuántica, perpetuarla (¿perpetrarla?) al cabo de 100 años es totalmente inaceptable.

Otra cosa es que las correlaciones cuánticas, a diferencia de las clásicas, no sean reproducibles mediante “elementos de realidad física”, “conjuntos clásicos de instrucciones previas”, o en general mediante variables ocultas locales, como demuestran las desigualdades de Bell. Pero esa es otra historia.

Mecánica Cuántica sin colapso

Las exposiciones modernas de la Mecánica Cuántica (**Ball 90a**, **Per 93**, **Mer 98**) prescinden del colapso como proceso fundamental al estilo de von Neumann, y lo utilizan a lo sumo como algoritmo de actualización de la información accesible del sistema, incorporando nuevos datos y eliminando las posibilidades descartadas (sección IV de **Eng 99** y nota 9 a pié de página en **Gar 00**). Desaparecen con ello muchas de las dificultades asociadas a la medición, en particular su consideración como algo cualitativamente distinto de la evolución temporal unitaria.

¹²El colapso es algo que le ocurre a la descripción matemática del sistema físico, no al sistema mismo (**Fusch 00**).

Las paradojas surgen si se insiste en que el estado del sistema describe propiedades físicas del mismo, en vez de ser un compendio de la información accesible.

¹³Véase por ejemplo en la nota 4 a pié de página en (**Gar 00**) el análisis de los resultados experimentales en el singlete en términos sólo de correlaciones.

Si el objeto observado y el aparato de medida constituyen un sistema cerrado, evolucionarán de forma continua y reversible, implementada por operadores unitarios¹⁴ (**Pres 98**). En particular, si los estados del sistema observado y el aparato de medida eran puros antes de interactuar¹⁵, el estado total conjunto seguirá siendo puro a lo largo de toda la interacción, sin que exista en ningún momento una transición a un estado mezcla.

Al restringirnos a las variables relevantes del aparato de medida (el “puntero”) tomando trazas sobre los restantes grados de libertad, se obtiene un estado reducido mezcla en el que no aparecen superposiciones lineales de autoestados, eliminando lo que durante mucho tiempo se consideró el aspecto más preocupante en el análisis de la medición (Apéndice E de **Gal 89**)¹⁶. Pero aunque las coherencias entre estados no aparezcan en los estados reducidos, permanecen en el estado total¹⁷. El uso de estados reducidos para describir una parte del sistema no debe

¹⁴En esta evolución unitaria se establecen correlaciones entre estados del sistema observado y del aparato de medida (Apéndice E de **Gal 89**). Como consecuencia de la linealidad de la Mecánica Cuántica, el estado total resultante es enredado, salvo que el sistema observado se encuentre en un estado que ya esté correlacionado con uno sólo de los estados del aparato de medida. El enredo está en la base de los análisis modernos del proceso de medición (**Scu 91**).

¹⁵Esta hipótesis puede parecer una simplificación excesiva, sobre todo por lo que se refiere al aparato de medida, pero permite una comparación sencilla de las diversas interpretaciones de la medición. Una discusión más realista en término de estados mezcla conduce a las mismas conclusiones sobre el mantenimiento o pérdida de coherencias, pero es bastante más complicada técnicamente (**Ball 90a**).

¹⁶No se han observado experimentalmente efectos físicos atribuibles a superposiciones lineales de estados macroscópicos, mientras que sí se han observado las consecuencias de las superposiciones lineales para sistemas micro y mesoscópicos. Por ejemplo, las diferentes superposiciones lineales de los estados con componente z de espín positiva y negativa para una partícula de espín $1/2$ dan lugar, según su fase relativa, a estados experimentalmente distinguibles entre sí: $(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle) / \sqrt{2}$ representa componente x de espín positiva, $(|\uparrow\rangle - |\downarrow\rangle) / \sqrt{2}$ componente x negativa, $(|\uparrow\rangle + i|\downarrow\rangle) / \sqrt{2}$ componente y positiva, etc. También se han detectado las consecuencias de la existencia de superposiciones lineales de estados de sistemas más complejos: átomos, moléculas, corrientes eléctricas mesoscópicas en un sentido y su contrario, etc. Por ejemplo: en un experimento reciente de transmisión de fullerenos C_{60} a través de una serie de rendijas (**Arn 99**) se ha detectado la interferencia entre los estados correspondientes a atravesar cada una de ellas.

¹⁷Como ya hemos dicho, las coherencias no son detectables mediante ninguna observación que se limite a una de las partes del sistema total (para estas observaciones el estado total puro es indistinguible de la mezcla incoherente),

pues confundirse con la existencia en algún momento de la medición de una reducción o colapso discontinuo del estado total que lo lleve de estado puro a mezcla con pérdida irreversible de las coherencias. Esta es la diferencia esencial entre las interpretaciones modernas del proceso de medición y las tradicionales. Una versión de estos comentarios más detallada y con fórmulas puede verse en el Apéndice al final de estas notas.

Algunos autores consideran que una vez obtenida para el aparato de medida una matriz densidad sin coherencias en la base del puntero, el problema de la medición está esencialmente resuelto: como ocurre en los sistemas clásicos con información incompleta, sólo son posibles predicciones probabilistas¹⁸. Otros autores opinan sin embargo que falta por entender por qué en una medición concreta se obtiene uno en particular de los resultados posibles y no otro¹⁹, sin que pueda predecirse cuál, en contraste con el carácter determinista de la evolución total del sistema y el aparato²⁰.

pero siguen presentes en dicho estado total y podrían ser detectadas mediante mediciones conjuntas en todo el sistema compuesto.

Por otra parte, si el sistema observado más el aparato de medida son un sistema abierto en interacción con un gran número de grados de libertad del ambiente, su evolución no es unitaria, y las coherencias pueden disminuir al tiempo que la entropía de von Neumann aumenta. Esta decoherencia es un proceso continuo que puede ser muy rápido: aunque conceptualmente es muy diferente del colapso instantáneo tradicional, en la práctica el resultado puede ser el mismo al cabo de tiempos tan cortos como para no ser experimentalmente detectables. La decoherencia no existe para sistemas finitos cerrados, para los que la evolución es unitaria y la entropía de von Neumann se conserva.

¹⁸Aunque el carácter probabilista de la medición cuántica es más fundamental, puesto que no se trata solamente de una ignorancia previa del valor de la propiedad medida (como en el caso clásico), sino de que dicha propiedad no tiene en general ningún valor concreto hasta que se efectúa la medición.

Algunos de los problemas asociados con la interpretación de las probabilidades cuánticas pueden verse en (**Mer 98, Pres 98**). La posibilidad de asignar probabilidades a sucesos individuales puede verse en (**Fuchs 00**).

¹⁹ Nótese que este problema existe también en la interpretación tradicional con colapso al estilo de von Neumann, y en las teorías de sistemas abiertos con decoherencia.

²⁰ Una vía de escape propuesta es que el observador u observadores deban ser incluidos en la descripción cuántica, de manera que sus estados estén perfectamente correlacionados con los del aparato de medida: para cada resultado posible del mismo, el estado correspondiente del observador es aquel en el que “se percibe dicho resultado” (**Pres 98**). Estos análisis acaban conduciendo tarde o temprano a alguna de las modalidades de “múltiples universos” de Everett.

Finalmente, hay que hacer notar que se han propuesto alternativas a la Mecánica Cuántica tradicional en las que existe un verdadero colapso dinámico²¹ debido a la presencia de términos estocásticos en la ecuación de evolución (por ejemplo, las teorías de Ghirardi, Rimini y Weber, y Pearle), e incluso se ha sugerido un origen gravitatorio para estos términos. Hasta ahora no hay evidencia experimental que las apoye o rechace, pero se está buscando activamente (**Gho 99**).

Conclusión

La utilización puramente instrumental de la reducción o colapso del estado para actualizar la información sobre el sistema, evitando arrastrar posibilidades ya descartadas a través de información adicional²², simplifica el cálculo de las predicciones cuánticas. Así, una vez que la interacción con un aparato de medida se ha vuelto irreversible para todos los efectos prácticos, es suficiente con mantener sólo la parte del estado cuántico correspondiente al resultado obtenido, sin seguir arrastrando todo el estado conjunto del sistema y el aparato. El colapso instantáneo del estado cuántico puede utilizarse también como atajo para llegar al resultado final en el proceso continuo de decoherencia en sistemas abiertos. Pero por lo que se refiere a su interpretación como hipotético fenómeno físico, transmisión de algún tipo de información detectable²³, explicación de las correlaciones cuánticas experimentalmente observadas, o postulado teórico fundamental, parece llegado el momento de prescindir de él (**Ball 90b**).

²¹El colapso asociado a la decoherencia en sistemas abiertos o “colapso inducido por el ambiente”, ha sido llamado “falso colapso” por los autores que propugnan un colapso dinámico ligado a modificaciones de la ecuación de evolución.

²²Como en el análisis bayesiano de las probabilidades.

²³A través de algún cambio en las propiedades del sistema.

Apéndice: estado reducido frente a reducción del estado

Un aparato de medida cuántico establece una correspondencia entre sus autoestados $|X_i\rangle$ y los estados $|\phi_i\rangle$ de un sistema sometido a observación. Suponiendo por sencillez que el sistema bajo observación y el aparato de medida se encuentran inicialmente en los estados puros $|\phi_k\rangle$ y $|0\rangle$ respectivamente, al interactuar evolucionarán unitariamente,

$$|\phi_k\rangle \otimes |0\rangle \xrightarrow{U} |\phi_k\rangle \otimes |X_k\rangle.$$

Si suponemos ahora que el sistema observado se encuentra inicialmente en un estado inicial

$$|\phi\rangle = \sum_i c_i |\phi_i\rangle \quad \text{con} \quad \sum_i |c_i|^2 = 1,$$

la linealidad de la evolución cuántica implica que tras la interacción con el aparato de medida el estado final $|F\rangle$ del sistema total es un estado puro enredado (Apéndice E de **Gal 89**)

$$\left(\sum_i c_i |\phi_i\rangle \right) \otimes |0\rangle \xrightarrow{U} |F\rangle = \sum_i c_i |\phi_i\rangle \otimes |X_i\rangle,$$

mientras que los estados reducidos para el sistema observado y el aparato de medida son respectivamente

$$\rho_S = \sum_k \langle X_k | F \rangle \langle F | X_k \rangle = \sum_i |c_i|^2 |\phi_i\rangle \langle \phi_i|,$$

$$\rho_A = \sum_k \langle \phi_k | F \rangle \langle F | \phi_k \rangle = \sum_i |c_i|^2 |X_i\rangle \langle X_i|.$$

Las fases relativas no aparecen en los estados reducidos, que son los que intervienen en cualquier interacción con sólo una de las dos partes. En concreto, en cualquier interacción posterior con sólo el aparato de medida aparecen las mezclas incoherentes de los estados macroscópicos $|X_i\rangle\langle X_i|$, y no sus superposiciones lineales, lo que para muchos era el aspecto más inquietante del estado enredado $|F\rangle$. Sin embargo, el sistema total sigue estando en el estado puro $|F\rangle$, que puede también escribirse como

$$\rho_F = |F\rangle\langle F| = \sum_{i,j} c_i c_j^* |\phi_i\rangle\langle\phi_j| \otimes |X_i\rangle\langle X_j| \otimes |\phi_j\rangle\langle\phi_i|,$$

y que como vemos conserva sus términos no diagonales, llamados coherencias. Por el contrario, en la descripción tradicional de la medición se postula una reducción o colapso del sistema total al estado

$$\rho_C = \sum_i |c_i|^2 |\phi_i\rangle\langle\phi_i| \otimes |X_i\rangle\langle X_i| \otimes |\phi_i\rangle\langle\phi_i|,$$

proceso no unitario en el que las coherencias se pierden de forma irreversible.

Ninguna observación efectuada sólo sobre una de las dos partes del sistema total puede distinguir entre ρ_F y ρ_C (los estados reducidos ρ_S , ρ_A calculados a partir de ρ_F y ρ_C son iguales). Tampoco pueden distinguirlos las mediciones conjuntas de dos observables S y M actuando sobre cada una de las dos partes, si S es diagonal en la base $\{|\phi_i\rangle\}$ y M en la base $\{|X_i\rangle\}$. Pero si uno al menos de los dos observables es no diagonal en la correspondiente base, las correlaciones en los estados ρ_F y ρ_C son en general distintas. En la práctica tal distinción puede ser muy difícil de comprobar experimentalmente (p. 94 de **Gho 99**), pero las diferencias conceptuales entre ambas descripciones de la medición son esenciales.

Para justificar que en cada medición el puntero se encuentre en la posición correspondiente a un estado concreto $|X_i\rangle$ del aparato de medida, Preskill (**Pres 98**) ha propuesto introducir el estado del observador u observadores, de manera que al interactuar con el sistema observado y el aparato de medida se establezca una correlación entre las tres partes similar a la discutida para sistema y aparato al comienzo de este apéndice. El estado total sería ahora

$$|F\rangle = \sum_i c_i |\phi_i\rangle \otimes |X_i\rangle \otimes |\Theta_i\rangle,$$

y para cada estado $|\Theta_i\rangle$ del observador se percibiría un estado concreto $|X_i\rangle$ del aparato. Como ya indicamos en una nota a pie de página, en último término este análisis conduce a alguna de las interpretaciones con múltiples universos de Everett.

REFERENCIAS

- Arn 99** M. Arndt, O. Nairz, J. Vos-Andreae, C. Keller, G. v.d. Zouw and A. Zeilinger, *Nature* **401**, 680 (1999).
- Ball 90a** L. E. Ballentine, *Quantum Mechanics*, Prentice Hall 1990, revisado y ampliado como *Quantum Mechanics: a Modern Development*, World Scientific Pub. 1998.
- Ball 90b** L. E. Ballentine, *Found. Phys.* **20**, 1329 (1990).
- Eng 99** B. G. Englert, M. O. Scully and H. Walther, *Am. J. Phys.* **67** (4), 325 (1999).
- Feyn 65** R. Feynman, *Lectures on Physics*, vol III, Addison Wesley 1965.

- Fuchs 00** C. A. Fuchs and A. Peres, *Physics Today*, March 2000, 70 (2000).
- Gal 89** A. Galindo y P. Pascual, *Mecánica cuántica*, vol I, Eudema 1998.
- Gal 00** A. Galindo, *Revista Española de Física* **14** (1), 1 (2000).
- Gar 00** G. García Alcaine, *Revista Española de Física* **14** (1), 17 (2000).
- Gho 99** P. Ghose, *Testing Quantum Mechanics on New Ground*, Cambridge University Press 1999.
- Gre 90** D. M. Greenberger, M. A. Horne, A. Shimony and A. Zeilinger, *Am. J. Phys* **58**, 1131 (1990).
- Har 93** L. Hardy, *Phys. Rev. Lett.* **71**, 1665 (1993).
- Kim 99** Y. Kim, R. Yu, S. P. Kulik, Y. Shih, and M. O. Scully, *Phys.Rev. Lett.* **84**, 1 (2000).
- Mer 98** N. D. Mermin, *Am. J. Phys.* **66**, 753 (1998).
- Pear 00** P. Pearle, arXiv:quant-ph/0004067, 17 Apr 2000.
- Per 93** A. Peres, *Quantum Theory: Concepts and Methods*, Kluwer Academic 1993, reimpre-
sión con correcciones 1995.
- Pres 98** J. Preskill, *Lecture notes on quantum information and quantum computation*,
www.theory.caltech.edu/people/preskill/ph229

San 00 J. L. Sánchez Gómez, *Revista Española de Física* **14** (1), 10 (2000).

Scu 91 M. O. Scully , B. G. Englert and H. Walther, *Nature* **351**, 111 (1991).

Ynd 00 F. J. Yndurain, *Revista Española de Física* **14** (1), 54 (2000).