

# MÁS ALLÁ DE LOS DATOS DESNUDOS: ELEMENTOS PARA LA INTERPRETACIÓN DE LA MECÁNICA CUÁNTICA\*

*Edgar Eslava*

Sociedad Colombiana de Filosofía

## *RESUMEN*

En un intento de probar los límites de la interpretación más aceptada de la mecánica cuántica, de acuerdo con la cual los sistemas microscópicos se encuentran siempre en una superposición de estados, el premio Nobel de física A. Leggett ha propuesto la tesis del macrorealismo, según la cual las superposiciones mecánico-cuánticas de estados microscópicamente diferentes nunca tienen lugar. Leggett ha mostrado también los elementos básicos de algunas pruebas experimentales que podrían decidir definitivamente entre la mecánica cuántica y el macrorealismo. En este texto presento los elementos fundamentales de la interpretación estándar de la mecánica cuántica y del macrorealismo, a fin de poner en evidencia que los resultados experimentales están más abiertos a interpretación de lo que Leggett está dispuesto a aceptar. Dentro de las interpretaciones alternativas se destaca la posibilidad de comprender los resultados como ejemplos de violaciones al principio de inducción en que descansa el macrorealismo, abriendo así la puerta para resolver la tensión entre la MC y el macrorealismo en términos de causalidad inversa, de acuerdo con la cual no es necesario apelar a ningún papel especial desempeñado ni por los observadores ni por los aparatos de medición a fin de explicar las diferencias entre los sistemas mecánico-cuánticos y los macroscópicos, una diferencia que puede ahora ser definida parcialmente en términos de su direccionalidad causal y temporal.

**Palabras clave:** Mecánica cuántica, interpretación, Leggett, macrorealismo, inducción, causalidad.

## *ABSTRACT*

In an attempt to test the limits of the current interpretation of quantum mechanics, according to which microscopic systems are always in a superposition of states, A. Leggett has proposed the thesis of macrorealism, according to which quantum mechanical superpositions of macroscopically distinct states never occur. Leggett has also shown the basic features of some experimental tests that would decide definitively between quantum mechanics and macrorealism. In this paper I present some basic elements of the standard

---

\***Recibido** Enero de 2007; **aprobado** Marzo de 2007.

interpretation of quantum mechanics and of macrorealism, in order to make evident that the experimental results may well be more open to interpretation than Leggett himself would accept. Among such interpretations I highlight the possibility of understanding the results as examples of violations of the principle of induction in which macrorealism rests, opening the door for solving the tension between QM and macrorealism in terms of the backwards causatio, according to which there is no need for appealing to any special role played by either observers or measurement apparatuses in order to explain what differentiates quantum systems from macroscopic ones, a difference that could now be defined partly in terms of their causal and temporal directionality.

**Key words:** Quantum mechanics, interpretation, Leggett, macrorealism, induction, causation.

### 1. Mecánica cuántica, medición e interpretación

70 Una de las características centrales de la interpretación estándar de la mecánica cuántica es que en ella se representa la función de estado de un sistema como función del tiempo, de dos formas diferentes. De una parte, se considera que si los sistemas cuánticos se dejan a su suerte, sin ser perturbados por la presencia de observadores o de aparatos de medición, su evolución será determinista, es decir, semejante a la de cualquier sistema macroscópico clásico. De otra parte, debido al fenómeno conocido como colapso de la función de onda, los sistemas cuánticos tienen una evolución de tipo indeterminista, no clásica, cuando sobre ellos se llevan a cabo mediciones. Esta doble condición de la evolución temporal de los sistemas cuánticos lleva implícito el problema, usualmente referido como el problema de la medición en mecánica cuántica (PMC), de hacer necesarias dos perspectivas de explicación incompatibles entre sí, una determinista y otra indeterminista, con la consecuencia adicional de hacer virtualmente imposible comprender cómo abordar la discontinuidad, o de definir exactamente en dónde ella tiene lugar. Dicho de otra forma, el problema es el de definir precisamente qué cuenta como un acto de medición en mecánica cuántica, y cuáles son las consecuencias reales de llevar a cabo una de estas acciones sobre un sistema.

El problema de la medición es particularmente molesto porque mina el proyecto de consolidar la mecánica cuántica como una teoría completa, universalmente aplicable a los sistemas físicos. Si la mecánica cuántica implica que las interacciones entre los sistemas físicos y los aparatos de medición no puede ser descrita en términos mecánico-cuánticos, será muy difícil comprender cómo esa teoría puede considerarse completa.

Dentro del marco de la interpretación estándar de la mecánica cuántica, la solución al conflicto surge a partir de una situación usualmente denominada

*decoherencia*, el proceso de eliminación de la interferencia de los estados cuánticos, que ofrece una explicación al colapso de la función de onda en términos de la irreversibilidad de la interacción del sistema con el ambiente. La “decoherencia inducida por el ambiente,” o simplemente “decoherencia,” es el nombre asignado a la formación de correlaciones entre un sistema cuántico y el medio en que se encuentra. Este tipo de correlaciones tiene lugar únicamente en sistemas mecánico-cuánticos pues, dado que los sistemas macroscópicos son abiertos, es decir, nunca se encuentran aislados del ambiente, no hay razón para suponer que estos seguirán un patrón evolutivo como el descrito por la ecuación de Schrödinger, aplicable únicamente a sistemas cerrados tales como los sistemas mecánico-cuánticos. Así comprendidos,

Los sistemas usualmente tenidos como clásicos sufren (o se benefician) de la pérdida natural de coherencia cuántica, la cual se “filtra” [*“leak out”*] al ambiente. La “decoherencia” resultante no puede ser ignorada cuando uno aborda el problema de la reducción de los paquetes de onda [como en el caso de los sistemas cuánticos]: ella impone, de hecho, el embargo requerido sobre los resultados potenciales permitiendo al observador conservar registros de las alternativas y ser testigo de tan sólo una de las ramas [opciones]. (Zurek 1991)

71

La decoherencia da cuenta entonces de lo clásico de los objetos cotidianos en términos de disipación ambiental. Las correlaciones que caracterizan a los sistemas mecánico-cuánticos se pierden, “escapan,” cuando uno se aproxima a ellos desde la perspectiva de los observadores y de los aparatos de medición todos ellos macroscópicos<sup>1</sup>. Derivada directamente de la aplicación del formalismo estándar de la mecánica cuántica a situaciones reales, y debido a que se la considera como una forma efectiva de dar cuenta del colapso de la función de onda en la frontera que separa a los sistemas clásicos de los cuánticos, la decoherencia parece ser una muy buena alternativa de resolución del problema de la medición cuántica.

Pero no todo el mundo está de acuerdo en que la decoherencia es la solución final al PMC. A. Leggett<sup>2</sup> por ejemplo, ha declarado que la decoherencia nos lleva a la incómoda situación de requerir dos patrones

---

<sup>1</sup> Aunque la decoherencia es explicada en términos de disipación, no debe ser identificada con la disipación ambiental. Se dice que la decoherencia precede a la disipación porque actúa en una escala de tiempo mucho más rápida, y, contrario a la disipación ambiental, la decoherencia requiere la noción de un “ambiente normalizado” (Zeh, 2001) que permite definir ciertas propiedades usadas para establecer la diferencia entre hechos clásicos observados y superposiciones cuánticas no observadas. Descripciones detalladas del fenómeno de la decoherencia pueden encontrarse en Zurek (1981, 1982, 1991), Zeh (1970, 1981, 2001), Joos, (1984, 1986, 1987), y en Joos y Zeh (1985).

<sup>2</sup> Leggett (2002).

diferentes de medida, dos tipos de explicaciones incompatibles, para los niveles clásicos y cuánticos. A manera de ejemplo, Leggett compara algunas respuestas usuales a la pregunta acerca de la posible evolución de un electrón en un experimento de doble rejilla y en el caso del gato de Schrödinger. En el nivel microscópico, es decir, en el caso de un electrón que atraviesa una rejilla doble de difracción,

La mayoría de ustedes quisieran dar una interpretación del formalismo cuántico tal que, independientemente de las caracterizaciones positivas que deseen agregarle, al final tenga la característica negativa de no permitir a cada electrón el escoger entre una u otra [ruta] alternativa. La evidencia que los fuerza a aferrarse a esta interpretación es el muy bien verificado fenómeno de la interferencia entre los dos caminos. Ahora bien, cuando vamos del nivel del electrón al nivel del gato, ¿qué ha cambiado? Ciertamente el formalismo de la mecánica cuántica misma no ha cambiado un ápice (al menos si asumimos que la MC es toda la verdad acerca del mundo...). Todo lo que los argumentos estándar de la “decoherencia” nos dicen es que, al menos en una situación experimental típica y no diseñada especialmente, para el momento en que hemos llegado al nivel del gato la posibilidad de observar interferencias entre (por ejemplo) los estados de muerte y vida del gato, es esencialmente cero. Pero, y ¿qué? Permite el desvanecimiento de la evidencia una completa reinterpretación del significado del formalismo? Yo no lo creo. (Leggett 2002)

72

Para Leggett, entonces, la decoherencia no resuelve en realidad el PMC; ella simplemente nos informa que la observación hace que algunos objetos parezcan clásicos, sin ofrecer un mecanismo que explique porqué el colapso tiene lugar, la única solución real al PMC. Es justamente para probar los límites de la interpretación estándar de la mecánica cuántica, decoherencia incluida, que Leggett ha propuesto confrontarla experimentalmente con la tesis del macrorealismo, tesis que afirma que, de acuerdo con la experiencia del sentido común, las superposiciones mecánico cuánticas de estados macroscópicos distintos nunca tienen lugar.

## **2. Experimentos en macrorealismo**

¿Qué podemos hacer entonces para resolver el problema de determinar los límites de la mecánica cuántica? La propuesta de Leggett es ofrecer un conjunto alternativo de principios que entren en contradicción con los de la mecánica cuántica, y tratar de diseñar experimentos capaces de resolver el conflicto haciendo insostenible alguna de las posturas rivales. En lenguaje de filosofía de la ciencia, antes que simplemente verificar uno u otro conjunto de principios, el experimento crucial propuesto falsificará ya sea a la mecánica cuántica o a su contendor, no dejando espacio para debates posteriores. Más adelante estudiaremos de cerca los principios alternativos del macrorealismo propuesto por Leggett. Por ahora, mientras procedemos a mostrar algunos de los experimentos sugeridos, será suficiente afirmar

que los principios fundacionales del macrorealismo contradicen a los de la mecánica cuántica al no permitir la superposición de estados, típica de los sistemas cuánticos.

La idea de los experimentos propuestos es, en palabras de Leggett, “obtener información experimental acerca de la paradoja de la medición cuántica por medio de una extensión de las predicciones de la mecánica cuántica del nivel atómico al del mundo cotidiano,”<sup>3</sup> probando la existencia de interferencia cuántica en sistemas dinámicos macroscópicos (QIMDS, pos sus iniciales en inglés). La tarea es entonces estudiar sistemas “del mundo cotidiano,” es decir, que puedan ser considerados naturalmente como sistemas clásicos, a fin de determinar si ciertas variables dinámicas exhiben superposiciones del mismo tipo que aquellas que caracterizan a los sistemas cuánticos.

Entre los experimentos actuales diseñados para determinar la existencia QIMDS se encuentran la determinación de la difracción de moléculas complejas en espacios libres, del momento magnético de algunas biomoléculas, del *spín* de sistemas óptico-cuánticos, y de la energía potencial de flujos superconductores. Especificidades aparte, lo que estos experimentos tienen en común es que todos ellos comparten el espíritu de los experimentos clásicos de Einstein-Podolsky-Rosen, es decir, todos ellos estudian el comportamiento de pares de variables dinámicas a fin de determinar (en términos de superposición) las correlaciones entre dichas variables.

El experimento favorito de Leggett’s es el último de la anterior lista, la determinación de la energía potencial de un flujo superconductor. En este tipo de experimentos, una máquina superconductora (Superconducting Quantum Interference Device, SQUID), por ejemplo un anillo superconductor al que se le adiciona un conector que permita la combinación de canales, se usa para estudiar la energía potencial de un flujo eléctrico atrapado en el anillo en términos de un flujo eléctrico aplicado externamente. Los experimentos actuales con SQUIDs resultan ser particularmente interesantes porque hacen posible intentar detectar superposiciones cuánticas de estados en que, por ejemplo, dos corrientes de electrones giran en sentidos opuestos, facilitando los procesos de medición y toma de datos, permitiendo establecer el número de partículas que interactúan (lo que a su vez permite establecer límites claros de escala entre los niveles cuántico y clásico) y porque

Bajo ciertas suposiciones de carácter más bien general y plausible, es suficiente tener un conocimiento completo de las ecuaciones clásicas del movimiento del flujo para obtener una predicción, libre de parámetros, del comportamiento del régimen cuántico. Si esta conclusión es correcta, es significativa no sólo porque ella permite al experimentador medir, en experimentos puramente clásicos, todos los parámetros relevantes para un

---

<sup>3</sup> Leggett (2002).

experimento proyectado en el régimen “cuántico profundo,” sino también porque si esto se hace y uno obtuviese luego resultados muy diferentes de las predicciones cuánticas, sería imposible (o al menos muy poco menos plausible) atribuirlos a los efectos desconocidos de la disipación y/o de la decoherencia. (Leggett 2002)

Los experimentos mismos son muy interesantes, pero su análisis detallado está mucho más allá de los límites del presente texto, y algunos ya son temas comunes de discusión en la literatura especializada.<sup>4</sup> Más relevante para nuestra discusión es el significado de las “suposiciones de carácter más bien general y plausible” que están a la base de las posibles interpretaciones de los resultados experimentales. Tales suposiciones son el núcleo de la teoría que Leggett ha bautizado con el nombre de macrorealismo.

Originalmente (Leggett 1985), Leggett definió el macrorealismo, en ese entonces llamado principio de macro-objetividad, como una “afirmación negativa genérica” que declara que nunca es el caso que estados microscópicamente diferentes se encuentren en el tipo de superposiciones que caracterizan a los estados mecánico-cuánticos. Un estudio a posterior de los resultados experimentales forzó a Leggett a complementar su afirmación básica con dos principios adicionales: la medibilidad no invasiva y la inducción. Como resultado, en su estado actual, la tesis del macrorealismo es la combinación de estos tres postulados:

74

P1. *Macrorealismo* (Macro-Objetividad): si un objeto macroscópico tiene a su disposición dos (o más) estados microscópicamente diferentes, en un momento cualquiera se encontrará en uno de esos estados en particular, sin importar si los estados han o no sido medidos en ese momento.

P2. *Medibilidad no invasiva* (NIM, Non-Invasive Measurability): es posible, en principio, determinar el estado en que se encuentra un sistema en un momento determinado, sin perturbar de forma alguna el estado del sistema o sus condiciones dinámicas subsecuentes.

P3. *Inducción* (IND): las propiedades estadísticas de un sistema están determinadas únicamente por las condiciones iniciales del sistema (y en particular no por sus condiciones finales).

El principio P1 es otra forma de presentar el hecho de sentido común que los estados de los sistemas macroscópicos nunca se encuentran en superposición. P2 afirma que no existe límite a la posibilidad de prevenir que los aparatos de medición interfieran con la dinámica de los sistemas

---

<sup>4</sup> Para ver estudios detallados de este tipo de experimentos véanse por ejemplo Granata et al. (2002), Cosmelli et al. (1999) and Gal’perin et al. (2001). Experimentos recientes con SQUIDS de interferencia electrónica pueden encontrarse en Friedman et al. (2000) y en van der Wal et al. (2000).

macroscópicos bajo su lupa. P3, a su vez, es también la afirmación de una noción del sentido común: que las causas siempre preceden a sus efectos. Combinados, sostiene Leggett, los principios P1-P3 son lo suficientemente fuertes dar sólido soporte teórico a los resultados de los diferentes montajes experimentales propuestos para estudiar el macrorealismo. El poder de los principios del macrorealismo radica en sus posibilidades de falsación. En sistemas macroscópicos, en donde la interacción con los aparatos de medición es despreciable (P2) y en donde las paradojas causales tales como las que plagan al mundo cuántico, debidas a la “fantasmagóricas acciones-a-distancia” que tanto incomodaban a Einstein, son eliminadas (P3), de existir alguna evidencia de superposición entre estados macroscópicos entonces P1 habrá sido falsificado, haciendo superflua cualquier interpretación posterior. En palabras del propio Leggett:

Suponga que –como imagino que la mayoría de los físicos apostarían– los experimentos resultan acordes con las predicciones de la MC, y más aún, estas últimas son tales que violan [los principios de] el macrorealismo. Qué podríamos inferir exactamente de esto que no supiéramos ya? Mi propia reacción sería simplemente que mientras que siempre hemos sabido que la MC, si creemos en ella, afirma que nuestras nociones de sentido común acerca del mundo macroscópico deben estar erradas, ahora hemos demostrado directamente que ellas lo son. Podemos ser más específicos que eso? La literatura de los últimos años ha incluido una cantidad considerable de discusiones acerca de si, de encontrarse resultados [acordes con] la MC, tendríamos que rechazar el postulado de la [macro-objetividad] o pudiéramos lograr en su lugar tan sólo rechazar el [postulado de la medibilidad no invasiva]. Nadie que yo sepa ha sugerido seriamente que abandonemos el [postulado de la inducción]. [...] El punto importante es ciertamente que el “sentido común macroscópico” ha sido visto fallar dramáticamente. (Leggett 1998)

Las cosas son así de simples, afirma Leggett.

### **3. Interpretaciones, más allá de los datos desnudos**

Como acabamos de ver, para Leggett un resultado experimental favorable a la mecánica cuántica implicará la necesidad de deshacerse de P1 como principio explicativo, o, en otras palabras, que el macrorealismo debe morir. Sin embargo, en su afán por enfatizar la posibilidad de un derrumbe experimental del macrorealismo, Leggett parece olvidar que la versión actual de su tesis está compuesta no sólo de un principio, P1, sino de la combinación de tres principios, P1, P2 y P3, que funcionan de forma interdependiente. Es por esto que, en caso de que los experimentos hagan necesario declarar la muerte del macrorealismo, aún nos quedan, diversas opciones para elaborar el duelo, sin forma alguna, *prima facie*, de escoger entre ellas.

Como una primera opción, podríamos optar por considerar que se ha logrado demostrar que P1 es falso. En este caso, se habrá mostrado que las

superposiciones mecánico cuánticas sobrepasan la frontera entre los niveles macroscópico y microscópico, y que nuestro “sentido común macroscópico” es simplemente incorrecto. Esta es la respuesta de Leggett. Sin embargo, estos mismos resultados experimentales pueden ser interpretados como evidencia de que tenemos que “mover la línea” que separa al régimen clásico del cuántico, en lugar de haber demostrado la falsedad del macrorealismo o de la mecánica cuántica. En otras palabras, es posible interpretar los resultados como evidencia de que la decoherencia tiene lugar no en el punto que separábamos sino más allá del punto en que se esperaba que ocurriera. En el caso de los SQUIDS, por ejemplo, podría suceder que mientras que la interpretación en uso de la mecánica cuántica sugiere que las disipaciones tipo decoherencia se empiezan a evidenciar al tener sistemas con, digamos,  $10^8$  electrones, lo muestren los experimentos es que en realidad la decoherencia se hace efectiva con  $10^7$  electrones. De acuerdo con la presente interpretación, nuestro “sentido común macroscópico” sigue siendo correcto y lo que ha de revisarse son aquellas partes de la mecánica cuántica que sugerían que la decoherencia sucedía en uno y no en otro lugar.

76 Una segunda alternativa es considerar que los resultados experimentales demuestran que P2, el principio de la Medibilidad No-Invasiva, es incorrecto. Históricamente ha habido gran cantidad de trabajo en esta dirección, cuyo origen puede rastrearse hasta Bohr, quien consideró sospechosa a cualquier interpretación de la MC basada en la independencia de las mediciones y los aparatos de medición con respecto a los sistemas bajo observación y lo que le llevó a proponer el principio de complementariedad como eje articulador de su interpretación de la mecánica cuántica, base de la actual interpretación estándar de la teoría. La caída del macrorealismo bien podría ser comprendida como el elemento largamente esperado que prueba experimentalmente que dicha independencia es tan sólo una ilusión.

Finalmente, la situación experimental propuesta puede ser considerada como una puerta abierta para considerar que P3, el principio de inducción, ha de ser abandonado. Las discusiones acerca de la posibilidad de causalidad invertida como una posible explicación del extraño comportamiento de los sistemas cuánticos han estado presentes desde los primeros días de la teoría, y han retornado ocasionalmente, con diferencias más de carácter técnico que de aproximación al problema. Una de estas aproximaciones puede encontrarse en el muy influyente artículo de Aharonov, Bergman y Levowitz<sup>5</sup> bajo el nombre de ‘simetría temporal de la medición cuántica’, y la causalidad inversa es una de las consecuencias esperadas del experimento mental de “*delayed choice*” de Wheeler.<sup>6</sup> Versiones contemporáneas de esta

---

<sup>5</sup> Aharonov, Bergman y Lebowitz (1964).



aproximación incluyen las “influencias superluminales” de Cramer<sup>7</sup>, la “multisimultaneidad de Suárez<sup>8</sup> y la “causalidad invertida” de Dowe<sup>9</sup> y de Price<sup>10</sup>. Lo que todas estas versiones tienen en común es que intentan demostrar la posibilidad lógica de interpretar algunas partes del formalismo de la mecánica cuántica de tal forma que sea posible que los estados futuros de un sistema jueguen algún papel en los resultados de mediciones presentes, o pasadas, del mismo sistema. A pesar de los afirmado por Leggett, estas propuestas han sido defendidas seriamente por sus creadores, y la posibilidad de que los experimentos que probasen errado al macrorealismo podrían incluso mostrar que no son sólo serias, sino incluso verdaderas, y que nos ofrecen la posibilidad de reinterpretar aspectos altamente atrincherados en nuestra cosmovisión, tales como el principio de inducción y la flecha causal.

Al final, entonces, no se ha mostrado que la interpretación de Leggett de los posibles resultados experimentales sea incorrecta, bien puede ser correcta. Sin embargo, se ha mostrado esta solución es tan sólo una entre una serie de posibles interpretaciones de los mismos resultados. Cuál sea la interpretación correcta, o incluso si existe en efecto alguna interpretación que lo sea, es algo que aún no estamos en capacidad de determinar a partir del estado actual de nuestro conocimiento de los fenómenos físicos en la frontera entre el mundo clásico y el mundo cuántico. De todas formas, lo que sí sabemos es que el camino a la respuesta resulta fundamental contar con y hacer uso de la posibilidad de interpretar los resultados desde múltiples perspectivas. Negarse a esa posibilidad, a esa necesidad, no sólo reducirá el número de potenciales soluciones sino que se convierte en un freno al proceso mismo de investigación, siempre hambriento de datos, siempre solícito de apoyo.

77

### Referencias Bibliográficas

- Y. Aharonov, P.G. Bergman y J.L. Lebowitz. 1964. “Time Symmetry in the Quantum Process of Measurement.” *Phys. Rev.* 134, 1410-16.
- Cosmelli, C. et al. 1999. “Measurement of the intrinsic dissipation of a macroscopic system in the quantum regime”. *Physical Review Letters*, 82:26.
- Cramer, J. 1986. “The Transactional Interpretation of Quantum Mechanics”. *Review of Modern Physics* 58, 647-87.
- Dowe, P. 2000. *Physical Causation*. Cambridge: Cambridge University Press.

---

<sup>6</sup> Wheeler (1979, 1981).

<sup>7</sup> Cramer (1986).

<sup>8</sup> Suárez, A. (1998, 2000).

<sup>9</sup> Dowe (2000, 2001).

<sup>10</sup> Price (1996, 2001).

- Dowe, P. 2001. "Causal loops and the independence of causal facts." *Philosophy of Science*. Supplementary volume.
- Friedman, J.R., Patel, V., Chen, W., Tolpygo, S.K., y Lukens, J.E., 2000. *Nature* 406: 43.
- Gal'peirin, Y.M. et al. 2001. "Quantum Andreev interferometer in an environment". *Chernogolovka 2000 Usp. Fiz. Nauk* (suppl) 171:10.
- Granata, C. et al. 2002. "Josephson device for quantum experiments". *Applied Physics Letters*. 80:15.
- Joos, E. 1999. "Elements of environmental decoherence." En: *Proceedings of the Bielefeld conference on "Decoherence: theoretical, experimental and conceptual problems"*. Edited by P. Blanchard, D. Giulini, E. Joos, C. Kiefer, and I-O. Stamatescu. Berlin: Springer.
- Joos, E. y Zeh, H. D. 1985. "The emergence of classical properties through interaction with the environment". *Z. Phys.* B59:223-243.
- Leggett, A. 1998. Macroscopic Realism: "What is it, and what do we know about it from experiment?" En Healey, R and Hellman, G. eds., 1998. *Quantum Measurement: Beyond Paradox*. Minnesota Studies in the Philosophy of Science, Minneapolis: University of Minnesota Press.
- Leggett, A. 2002. "Testing the limits of QM, motivation, state of play and prospects". *J.Phys: Condens. Matter*.
- Price, H. 1996. *Time's Arrow and Archimede's Point. New directions for the Physics of Time*. Oxford University Press.
- Price, H. 2001. "Backward causation, hidden variables and the meaning of completeness". *Pramada*, 56: 2 and 3, 199-209.
- Suárez, A. 1998. "Quantum mechanics versus multisimultaneity in interferometer-series experiments, *Phys. Lett. A*, 250:39.
- Suárez, A. 2000. "Quantum mechanics versus multisimultaneity in experiments with acousto-optic choice-devices", *Phys. Lett. A*, 269:293-302.
- van der wal, C.H., ter Haar, ACJ., Wilhem, F.K., Schouten, R.N., Harmans, C.J.P.M., Orlando, T.P., Lloyd, S., y Mooij, J.E., 2000. *Science*, 290: 773.
- Wheeler, J. A., 1978, En: *The Mathematical Foundations of Quantum mechanics*, ed. A. R. Marlow, (Academic Press, New York).
- Zeh, H. D. 1970. "On the interpretation of measurement in quantum theory". *Found. Phys.* 1:69.
- Zeh, H. D. 1986. "Emergence of classical time from an universal wave function." *Phys. Lett.* A116:9-12
- Zeh, H. D. 2001. *The Physical basis for the direction of Time*, Springer, NY.
- Zeh, H. D. 2001a. "The problem of conscious observation in quantum mechanical description". *Found. Phys. Lett.* 13:3.
- Zurek, W.H. 1981. "Pointer basis of quantum apparatus: into what mixture does the wave-packet collapse?" *Phys. Rev.* D24: 1516.
- Zurek, W.H. 1982. "Environment induced superselection rules." *Phys. Rev.* D26: 69.
- Zurek, W. H. 1991. "Decoherence and the transition from quantum to classical." *Physics Today* 44 Oct., 36-44.
- Zurek, W. H. 2002. "Decoherence and the transition from quantum to classical- Revisited". *Los Alamos Science*, 27.