



Guillermo Mattei,
Dto. de Física, FCEyN - UBA.

La paradoja de la Mecánica Cuántica de “El gato de Schrödinger”

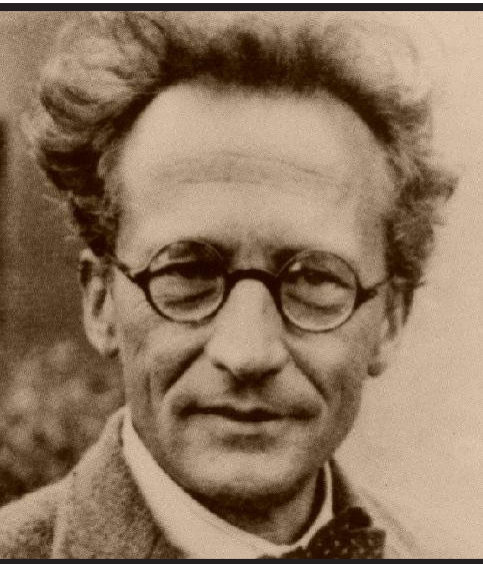
Acercas de aquel famoso gato cuántico

Fue un gato de la propiedad intelectual de uno de los padres de la mecánica cuántica, Erwin Schrödinger (1887-1961). Lejos de rayar muebles, deshacer madejas de lana y acechar pájaros, este gato no sólo perturbó las ideas de su dueño legítimo sino la de innumerables pensadores de varios campos del conocimiento. Los físicos del Siglo XXI, ¿le habrán puesto su cascabel?



Un ámbito hermético en sentido amplio: ninguna influencia externa lo penetra. Adentro un gato y un experimentador, IN, que no respira el aire del recinto sino el de un equipo autónomo propio. Afuera otro experimentador, OUT, que puede disparar un fotón, emitido por una fuente luminosa en un cierto estado predeterminado, que viaja por el interior del recinto hasta un espejo semiespejado que dividiría cualquier haz de luz incidente en uno transmitido en la dirección original y en otro reflejado en una dirección perpendicular. En el camino del haz reflejado hay una fotocélula que accionaría un mecanismo que liberaría cianuro al recinto si detectara una señal luminosa. ¿Qué pasará si OUT dispara el fotón disponible? ¿El gato tendrá igual chance de morir que de vivir? ¿El gato estará vivo y muerto simultáneamente? ¿IN y OUT influyen en el resultado del experimento al intentar reportar lo sucedido? ¿El aire del recinto, con o sin cianuro, afecta la medición? ¿Las mismísimas naturalezas de IN y OUT, incluidas las de sus estados conscientes, son relevantes?

Mirar por la ventanilla del tren de alta velocidad de la presente nota, que atraviesa raudamente el mundo de la Mecánica Cuántica, podría dejarnos divisar algunas imágenes con las respuestas a estos interrogantes o, quizás, con más preguntas.



Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger (1887-1961) compartió con Paul Dirac, en 1933, el Premio Nobel de Física por sus contribuciones a la mecánica cuántica, pero también se ocupó - entre otras cosas- de buscar puentes entre la física y la vida.

En 1944 publicó *¿Qué es la vida?* donde sostenía que la vida no es ajena a las leyes de la termodinámica y escandalizó a muchos biólogos con sus reflexiones sobre la herencia. Unos años más tarde, los descubridores de la estructura de doble hélice del ADN, James D. Watson y Francis Crick, señalaron a la obra de Schrödinger como una de sus principales fuentes de inspiración.

UN MUNDO FANTÁSTICO

Las filosofías realistas, o *allí afuera hay un mundo objetivamente real*, se llevaron muy bien con el electromagnetismo de Maxwell, la relatividad de Einstein y, por supuesto, con la mecánica newtoniana. Sin embargo, pequeñas discrepancias entre la realidad y la física del siglo XIX, generaron una nueva física para un nuevo mundo: el mundo cuántico. De todas maneras, este mundo cuántico también es capaz de emerger en el nuestro a través de la existencia de los cuerpos sólidos, de la resistencia, de la superconductividad y en la química, los colores, la herencia y, según el físico británico Roger Penrose, probablemente en la mismísima naturaleza de la conciencia humana.

La imagen del mundo, según la mecánica cuántica, puede tener dos interpretaciones. Según el danés Niels Bohr (1885-1962), más que un padre de esta rama de la Física, esa imagen no es objetiva ni hay realidad externa: sólo hay realidad en la medida. Pero, según la línea einsteniana de Penrose, el estado cuántico es el que debería tener los atributos de realidad física objetiva.

La manera de conocer la evolución temporal de los estados cuánticos es a través de la llamada ecuación de Schrödinger (EcSch): precisa y determinista. Sin embargo, cuando tiene lugar una medición, el estado cuántico, que tan eficientemente establece la EcSch, desaparece y sólo sirve para calcular las diversas probabilidades de que el estado salte de uno a otros nuevos estados posibles: el famoso salto cuántico.

Pensemos en una partícula. Clásicamente la caracterizan su posición y su velocidad pero, cuánticamente, cada posición simple que ella puede ocupar, es sólo una alternativa disponible. En mecánica cuántica, deben coexistir siempre las posibilidades alternativas abiertas a un sistema, sumadas y ponderadas por pesos estadísticos que, para darle mayor extrañeza a la teoría, son números complejos. Esta colección de pesos estadísticos complejos describe el estado cuántico de la partícula. La función compleja de la posición que se construye con esta colección de pesos estadísticos es la llamada *función de onda psi* (Ψ) o "la probabilidad de que la partícula esté en tal posición".

Penrose sostiene que la función de onda etiqueta el estado como un todo y que la realidad física de la localización de la partícula es, en todo caso, su estado cuántico Ψ . Para hablar de la probabilidad de localizar a la partícula en una posición, hay que tomar el módulo de Ψ y elevarlo al cuadrado. Sorprendentemente, la función de onda también contiene las amplitudes relacionadas con la velocidad de la partícula, por medio de un procedimiento similar al del análisis armónico de los sonidos musicales: los tonos puros de las distintas notas podrían asimilarse a los diferentes valores posibles de la velocidad que pudiera tener la partícula. Estas dos versiones de la función de onda, la de la posición y la de la velocidad, están ligadas mutuamente por la llamada *transformada de Fourier*. Por ejemplo, un estado de posición, en la imagen ordinaria del espacio de las posiciones, es una función que tiene un pico muy agudo en la coordenada de posición en cuestión y todas las otras amplitudes, correspondientes a los otros infinitos valores de la posición, son nulas. La transformada de Fourier de esta función da, en el espacio de estados de velocidades, una función armónica.

INCERTIDUMBRE DESDE EL PRINCIPIO

Casi como una consecuencia esperable en funciones apareadas a través de la transformada de Fourier, las precisiones de las dos variables involucradas, posición y velocidad, están mutuamente condicionadas. Es más, existe un límite absoluto para el producto de estas precisiones: el famoso *principio de incertidumbre de Heisenberg*. Casi el ícono de la mecánica cuántica: "Si la posición fuera medida con precisión infinita, entonces la velocidad quedaría totalmente indeterminada y viceversa". Penrose se pregunta y se responde: "¿Torpeza en el proceso de medida? Confuso. ¿Propiedad típica de las partículas? Falso. ¿Los conceptos clásicos de posición y velocidad son inaplicables para la partícula cuántica? Demasiado pesimismo..."

Sin embargo, es posible balancear estas incertidumbres, de manera compati-



ble con el principio, y construir funciones de onda con estados de posición y velocidad muy similares entre sí. Un estado cuántico de este tipo se lo conoce como *paquete de ondas* y es la mejor aproximación cuántica a una partícula clásica.

Detrás de esta evolución del paquete de ondas en el tiempo, obviamente, está la EcSch. Lo que hace la ecuación es propagar cada uno los estados de velocidad posibles -como se dijo: a los que se podrían asimilar tonos puros en acústica musical- de manera tan determinista como las ecuaciones de Maxwell.

“Considerando que Ψ describe la realidad del mundo, en tanto está gobernada por la EcSch determinista, no tenemos nada de ese indeterminismo que se supone que es una característica inherente a la teoría cuántica”, aclara Penrose. Este mecanismo recibe el nombre de *proceso de evolución U*. Sin embargo, cada vez que se mide, amplificando los efectos cuánticos hasta el nivel clásico, la cosa es

¿En qué consiste la paradoja?

La paradoja de Schrödinger se basa en un hecho casual e imprevisible que ocurre en un sistema aislado. El sabio imaginó un gato encerrado con una ampolla de veneno que se rompe o permanece intacta según el resultado de un experimento azaroso. La física cuántica establece que mientras no se observe una partícula, persiste la incertidumbre acerca de su estado. Schrödinger se preguntó si entonces, y mientras la caja permaneciese sin abrir, el gato encerrado estaría a la vez vivo y muerto.

El experimento podría ser que un fotón pase o no al interior de una caja, y que la partícula de luz pueda desencadenar, quizás, el trágico fin del animal de experimentación; o, de modo opuesto, rebotar en el espejo y salvarlo. Si el fotón, de acuerdo con la mecánica ondulatoria cuántica, está a la vez adentro y afuera de la caja ¿estará el gato a la vez vivo y muerto? Ésa es la aparente paradoja, en una de sus versiones.

Su solución para este caso es que el fotón está a la vez adentro y afuera de la caja, mientras no se produzca su interacción con ningún otro objeto. Una vez que interacciona, queda definido dónde ejerció su acción. Cerca de la mitad de las veces que se repita ese experimento, el gato sobrevivirá; y por desdicha perecerá el resto de las oportunidades, estadísticamente, como si se decidiera su suerte a los dados.

El concepto de observación es, cuánticamente, más amplio que el clásico, e incluye todo tipo de interacción. Aunque el experimentador permanezca afuera de la caja, el fotón disparará el mecanismo, o no lo hará, se sepa o no eso en un dado instante. Ningún humano observa el mecanismo, pero como observar es lo mismo que producirse una interacción, alcanza con que un fotón se absorba, o que rebote al chocar con otro cuerpo, para que la suerte del felino quede echada.

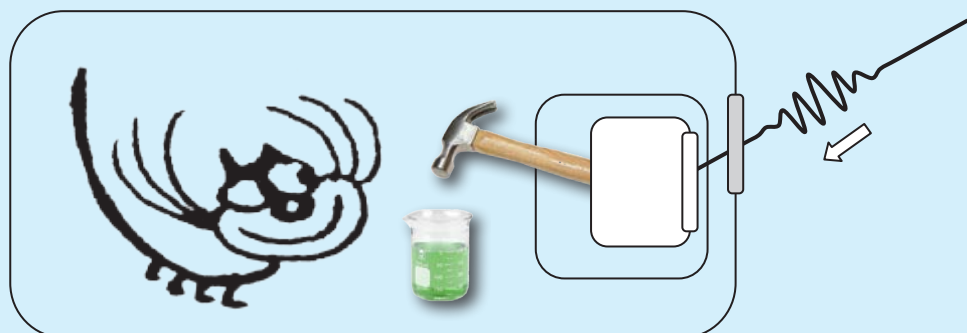
El gato de Schrödinger está vivo, o bien está muerto, lo sepamos o no después de jugar su suerte en esa cruel e imaginaria ruleta fotónica.

La base de la paradoja del gato consiste en llevar al extremo la idea cuántica de que la observación incide sobre el desarrollo del fenómeno, que parece fácil de entender cuando lo que se observa es una sola partícula de la que interesa saber a la vez su posición y su velocidad. Schrödinger, en cambio, imagina un hecho que ya está a todas luces resuelto: el gato o bien murió envenenado, o aún sigue con vida, según la ampolla esté íntegra o rota. El sabio se pregunta si el hecho de averiguarlo al abrir la caja, influye en la suerte ya echada del animal.

¿En qué estado se encuentra una partícula que decidimos no observar todavía? Esa pregunta carece de sentido cuántico, pues la física, a partir de 1916, rechaza la idea de una realidad separada del observador.

A.R.

Interpretación del autor de la idea de Schrödinger. El fotón pasa al interior de la caja y dispara el mecanismo que envenena el gato, o bien rebota con igual probabilidad. Mientras eso no se sepa ¿el gato está a la vez vivo y muerto? El dibujo del irracional es de Juan Carlos Colombres, más conocido como Landrú.



diferente. El proceso U ya no es aplicable: los físicos emplean el proceso R , que implica la construcción de las probabilidades a partir de las amplitudes. A diferencia de U , R es el culpable de la introducción de las incertezas y de la aleatoriedad en la teoría cuántica. U es la herramienta de cálculo de los físicos pero R es el insomnio de los filósofos. Mientras U es determinista, R es todo lo contrario. U mantiene las superposiciones complejas pero R las viola. U es continuo y R es descaradamente discontinuo. No hay manera de deducir R como un ejemplo complicado de U . Esta excentricidad y misterio de la mecánica cuántica esconde, nada menos, lo que significa hacer una medida.

En física es muy útil construir espacios asociados a los sistemas en estudio, llamados de *fases*, de dimensión igual a la suma del número de, por ejemplo, las componentes de la posición y de la velocidad. Particularmente, en mecánica cuántica, esos espacios se llaman *espacios de Hilbert* y, un punto en ese espacio representa el estado cuántico del sistema entero. Este espacio es vectorial y complejo y permite armar las sumas ponderadas imprescindibles en este mundo. Los elementos de este espacio se llaman vectores de estado y se representan por el símbolo $|x\rangle$.

La realidad de los estados cuánticos es motivo de profunda y casi interminable discusión entre los especialistas. Penrose opina que hay que hacer una distinción entre lo que es objetivo y lo que es medible según la mecánica cuántica. El vector de estado de un sistema no es medible, aunque parece ser una propiedad objetiva del sistema, y está caracterizado completamente por los resultados que debe dar en los experimentos que pudieran realizarse.

Cuando se trata de muchas partículas, la complejidad de las superposiciones de las diferentes localizaciones posibles de todas las partículas por separado aumenta, más que considerablemente, la complejidad del panorama. Por ejemplo, en el caso del estado de dos partículas, con solo diez posiciones permitidas, el estado $|\Psi\rangle$ tendría la forma:

$$Z_{00}|0\rangle|0\rangle + Z_{01}|0\rangle|1\rangle + \dots + Z_{09}|0\rangle|9\rangle. \quad \text{¿Y cuando se trata de un gato?}$$



Homenaje al físico Erwin Schrödinger en un billete de mil chelines austriacos. (Hasta el 20 de abril de 2018 el Oesterreichische National Bank lo canjea por 72,67 euros.) Nótese la presencia de la función Ψ ubicada en el círculo a la derecha de Schrödinger.

EL GATO CUÁNTICO

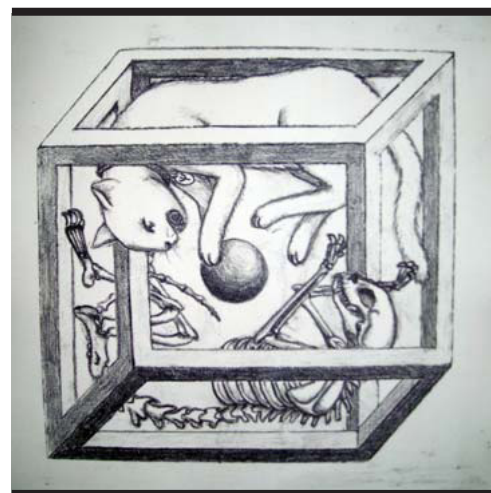
Desde del punto de vista del experimentador IN, o bien el fotón ha sido reflejado, porque se observa que la fotocélula ha registrado y el gato ha muerto, o bien se considera que el fotón ha sido transmitido, porque se observa que la fotocélula no ha registrado nada y el gato está vivo. O lo uno o lo otro ocurre realmente: R ha actuado y la probabilidad de cada alternativa es 50%. Para el experimentador OUT, se puede suponer que el vector de estado inicial de su contenido le es conocido antes de que la habitación



sea cerrada y ninguna medida ha tenido lugar realmente de modo que la evolución completa del vector de estado debería haber seguido la evolución de \mathcal{U} . El fotón es emitido por su fuente, en su estado predeterminado, y su función de onda se desdobra en dos haces, con una amplitud de, pongamos, $1/\sqrt{2}$ de que el fotón esté en cada uno de ellos (de modo que el cuadrado del módulo lleva a la probabilidad del 50%). Puesto que todo el contenido está siendo tratado como un solo sistema cuántico por OUT, la superposición lineal de alternativas debe mantenerse hasta la escala del gato. Hay una amplitud $1/\sqrt{2}$ de que la fotocélula registre y otra de $1/\sqrt{2}$ de que no lo haga. Ambas alternativas deben estar presentes en el estado, con el mismo peso como parte de una superposición lineal cuántica. Según OUT, ¡el gato está en una superposición lineal de estar muerto y estar vivo!

Si bien el propio Schrödinger fue el primero en espantarse de esta posibilidad, la evidencia experimental abrumadora posterior al desarrollo del formalismo cuántico termina de confirmar la realidad objetiva del proceso \mathcal{U} . Si para OUT el gato está vivo y muerto, sólo cuando se abre el recinto colapsará el vector de estado del gato en uno u otro estado. Para IN, el vector de estado habría colapsado mucho antes, y la combinación lineal de OUT, $|\Psi\rangle = (1/\sqrt{2})(|muerto\rangle + |vivo\rangle)$, no tiene importancia. "Demasiada subjetividad", protesta Penrose.

Si el OUT, a partir de su conocimiento del estado inicial del interior del recinto, hiciera algo más elaborado que mirar, tal como utilizar alguna manera de calcular con la EcSch cuál debe ser el estado en el contenedor obtendría de manera determinista a $|\Psi\rangle$, que incluye la superposición vivo-muerto y descarta todas las otras posibles combinaciones y amplitudes, entre las cuales se encuentran vectores de estado ortogonales al original en el espacio de Hilbert. De modo que es algo más que la simple coexistencia entre la vida y la muerte lo que afecta al gato: todas las diferentes combinaciones complejas están permitidas y todas ellas son, en principio, distinguibles una de otra. Sin embargo, para IN todas esas combinaciones son irrelevantes: gato vivo o gato muerto.

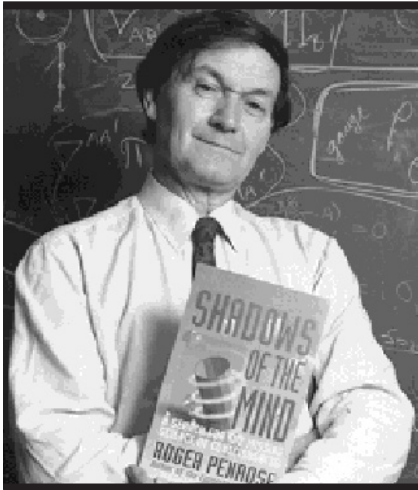


El gato de Schrödinger atrapado en el cubo de Necker-Escher. Litografía de jq2152 (se puede visitar la galería del autor de la obra <http://www.flickr.com/photos/25128555@N03/>)

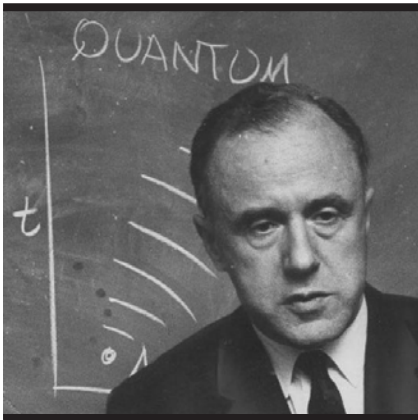
DE VETERINARIOS CUÁNTICOS Y GATOS QUE CAEN PARADOS

Diseñar un experimento que distinga el estado $|\Psi\rangle$ de cualquier otro ortogonal es en la práctica imposible para OUT dado que necesitaría conocer el estado exacto de todo el contenido, incluido IN. Este experimento debería ser imposible desde un principio, puesto que de otro modo no tendríamos derecho a eliminar uno de los estados $|muerto\rangle$ o $|vivo\rangle$ de la realidad física. El inconveniente es que la mecánica cuántica, si no se la cambia, nada dice acerca de cómo trazar una línea divisoria entre las medidas que son posibles y las que no lo son. Por otro lado, hay una sospecha de que las cosas mejorarían si el entorno pudiera ser tenido en cuenta: OUT ya no tendría un solo vector de estado. Incluso su propio estado correlacionaría con el entorno de forma muy complicada. La complejización de las combinaciones factibles hace imposible, en la práctica, distinguir las superposiciones lineales complejas de las simples alternativas con pesos probabilistas. Es muy difícil poder decir, en algún momento, que es imposible obtener efectos de interferencia de modo que, ahí mismo, pueda considerarse que los cuadrados de los módulos de las amplitudes en la superposición compleja proporcionan una probabilidad ponderada de muerto y vivo. Es más, aún en el caso de poder obtener los dos números reales de las probabilidades, pasar a una alternativa como lo demanda la realidad, parece imposible. "Clímax de subjetividad", diría Penrose.

Para otro punto de vista, la clave estaría en la presencia de observadores conscientes (uno o dos). Las leyes de superposición lineal cuántica compleja, ¿se deberían aplicar a la conciencia? Otro de los padres de la mecánica cuántica, Eugene Wigner (1902-1995), sugirió que la linealidad de la EcSch podría fallar para entes conscientes y debería ser reemplazada por algún procedimiento no lineal para resolver las alternativas disponibles en el sistema. Penrose opina: "Los rincones del universo en donde reside la conciencia podrían más bien ser pocos y muy apartados. Sólo en aquellos rincones podrían resolverse las



Roger Penrose



John Wheeler



Hugh Everett

superposiciones complejas en alternativas reales. Puede ser que semejantes rincones tuvieran para nosotros, la misma apariencia que el resto del universo, puesto que dondequiera que nosotros mirásemos (u observásemos de algún modo) haríamos, por el mismo acto de observación conciente, que se resolviese en alternativas, ya lo hubiese hecho antes o no”.

Otra postura es la del universo participatorio de John Wheeler (1911-2008) que lleva el asunto de la conciencia a un extremo diferente. La vida se debe a mutaciones que responden a las leyes de la mecánica cuántica, de modo que solo existirán en forma linealmente superpuestas hasta que, finalmente, conduzcan a la evolución de un ser conciente, cuya misma existencia es una muestra de todas las mutaciones correctas que han tenido lugar realmente. Es nuestra propia presencia la que, en esta concepción, faculta a nuestro pasado a la existencia.

Otro argumento es el de los muchos universos, de Hugh Everett (1930-1982), según la cual R no tiene lugar nunca en absoluto y la evolución completa del vector de estado está siempre gobernada por U . En este esquema, las conciencias de cada observador se desdoblan al punto de existir por duplicado: uno que ve un gato vivo y otro que ve un gato muerto. De hecho, no sólo un observador, sino todo el universo en el que habita, se desdobra en dos o más en cada medida que hace del mundo. Este desdoblamiento ocurre una y otra vez de modo que estas ramas de universo proliferan incontroladamente.

Penrose cree que las leyes de la mecánica cuántica actual necesitan un cambio fundamental aunque sutil. El físico británico argumenta: “si la teoría newtoniana perduró exitosamente 300 años (o 175 contando a partir de la revolución maxwelliana) hasta que la teoría de la Relatividad introdujo cambios que permitieron abarcar más y mejores explicaciones, los jóvenes casi 90 años de la mecánica cuántica todavía le depararían muchas reinterpretaciones y modificaciones novedosas”. Sólo que la teoría de Newton no tenía una paradoja de la medida. La linealidad y el buen comportamiento del proceso U , ¿podría ser un caso límite de una no-linealidad más abarcadora, precisa y sutil que resolviera el problema de la medida? Penrose, a contramano de las tendencias usuales, especula que es la mecánica cuántica la que debería adaptarse a la Relatividad General y no al revés, como se piensa usualmente, al buscar una teoría cuántica de campos que incluya la gravedad.

Analizando la asimetría temporal cosmológica y la que ocurre en la reducción del estado cuántico, pasando por consideraciones sobre la temperatura de los agujeros negros, los viajes en el tiempo y la energía negativa, Penrose reinterpreta el problema de la medida pero asignándole a la gravedad un rol fundamental. A través de algo así como una *ecuación de Newton-Schrödinger* (una EcSch que incorpora el campo gravitatorio newtoniano) en la cual hay reducción objetiva de estado cuántico, *proceso RO gravitatorio*. Penrose arriesga: “La reducción del estado cuántico se trata realmente de un proceso objetivo y es siempre un fenómeno gravitatorio”.

Penrose redobla la apuesta: “se pueden hacer experimentos que decidan si el proceso RO gravitatorio es o no el comportamiento de la naturaleza”. El proyecto de FELIX o Experimento en órbita libre con interferometría de rayos X, que el británico propone, sería una suerte de caja con un gato de Sch espacial a base de espejos de tamaños moleculares impactados por fotones de rayos X que viajarían 10.000 km entre plataformas espaciales. Por una décima de segundo cada espejo, más que diminuto, será una superposición de estar desplazado y no desplazado por el fotón. La reducción de estado se produciría espontáneamente comandada por el procedimiento RO gravitatorio.

Independientemente de la factibilidad de realizar experimentos como el FELIX, de las especulaciones sobre las simetrías de las fluctuaciones cuánticas en el Universo, de las reinterpretaciones de las reducciones de estado cuántico y de otras más que apasionantes cuestiones medulares de la mecánica cuántica, el gato de Schrödinger, vivo o muerto, se pasea con su parsimonioso andar felino y su cascabel a medio atar aún.

Bibliografía

Penrose, Roger. “La nueva mente del Emperador”, Ed. Grijalbo Mondadori (1989).

Penrose, Roger, “El camino a la realidad”, Ed. Debate (2004).

