

Teorema de no clonación e influencia en el entrelazamiento cuántico

Parte I

Dr. Ing. Ernesto Gandolfo Raso

egandolfo@frm.utn.edu.ar

El gato de Schrödinger

Señor Gato de Schrödinger, se lo acusa de ocultar información vital para nuestro conocimiento del mundo físico ¿como se declara?

Inocente y culpable, su señoría

¿Me está tomando el pelo?

Si y no, su señoría

¿Sabe de cuantos cargos más puedo acusarlo por su actitud?

Lo sé y no lo sé, su señoría

¿Pero usted se cree vivo?

Vivo y muerto, su señoría



Estado cuántico dentro de la teoría:

Un estado cuántico es un objeto matemático que contiene la información de que disponemos sobre un sistema físico; idealmente, si la cuántica es una teoría completa y conocemos el sistema perfectamente, un estado cuántico contiene toda la información acerca del sistema.

Los estados cuánticos son herramientas matemáticas, como las formulaciones de Heisenberg y Schrödinger, que permiten realizar predicciones científicas de una precisión tan extraordinaria que, desde muy pronto, prácticamente nadie cuestionaba unos ni otras.

Debemos profundizar algo más en el concepto de “estados incompatibles”.

Los dos *eigenestados* de la moneda, $|cara\rangle$ y $|cruz\rangle$, establecen las dos únicas posibilidades que pueden medirse del observable *lado* de la moneda; cualquier otro estado se “colapsa” a uno de estos dos estados una vez que observamos la moneda.

Es más: cualquier estado anterior, viene a ser una medida de la probabilidad de que, al observar la moneda, su estado sea $|cara\rangle$ o $|cruz\rangle$.

Es como si cualquier estado pudiera ser:

“completamente $|cara\rangle$ ”

“completamente $|cruz\rangle$ ”

o una combinación de los dos:

“casi completamente $|cara\rangle$ y un poquito $|cruz\rangle$ ”

“prácticamente $|cara\rangle$ pero un poco $|cruz\rangle$ ”

“medio $|cara\rangle$ y medio $|cruz\rangle$ ”

etc.

Es decir, puede pensarse en los estados de la moneda como superposiciones de los dos autoestados.

Esto es posible, precisamente, por la propiedad de la incompatibilidad de los dos estados o, matemáticamente, por la *perpendicularidad* entre los dos *autoestados*.

La segunda frase tiene un condicional fuerte: si la teoría cuántica, por ejemplo, *no* es una teoría completa, un estado cuántico es algo con un valor muy relativo, mientras que si es una teoría completa y conozco el estado cuántico completo de un sistema, **conozco el sistema todo lo bien que puede ser conocido.**

Por ejemplo: imaginemos que se tiene una moneda, y que se va al interior de una habitación. Mientras se está allí, se coloca la moneda sobre una mesa, y se sale de la habitación. Si se informa de que se ha colocado la moneda sobre la mesa, pero no de si la moneda muestra cara o cruz, el estado de la moneda será:

$$\frac{1}{\sqrt{2}}|\text{cara}\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|\text{cruz}\rangle$$

ya que no hay nada que haga suponer que una posibilidad es más probable que la otra.

Pero en ese caso estamos dando una definición *suave* o *blanda* del concepto de *estado* de la moneda.

El que dejó la moneda en la habitación sabe perfectamente qué lado muestra la moneda.

Pero otro observador externo no, pero no porque no esté definido en sí mismo, ni porque sea imposible conocerlo, **sino porque no tengo toda la información que es posible tener sobre la moneda.**

En el caso de la moneda hay una diferencia muy intuitiva entre el “*estado real*” de la moneda y el “*estado de información*” que representa mi conocimiento sobre la moneda, ya que no tengo más que preguntarte (por ejemplo) para cambiar mi conocimiento sobre la moneda sin cambiarla a ella. Son conceptos claramente separados.

En el caso de un electrón, un fotón o un átomo, es mucho más difícil saber si lo que conozco sobre ellos es todo lo que se puede conocer o no lo es.

Por eso en esos casos es muy complicado saber si lo que conozco es el “estado de información” o el “estado real” de lo que estoy estudiando. Las ecuaciones de la cuántica no distinguen entre ambos, pero eso no quiere decir que muchos físicos se conformaran con eso.

Crearon interpretaciones de las ecuaciones y las predicciones que éstas realizaban.

Algunos de ellos, como Heisenberg y Bohr, desarrollaron la *Interpretación de Copenhague*, ya que ha sido durante décadas –y sigue siendo, aunque seamos conscientes de sus limitaciones– la interpretación más extendida de la cuántica. Esta interpretación se basa en varios principios, y varía bastante según a quién le preguntes.

Sin embargo, aquí tienes los cuatro principios esenciales expuestos por Bohr y Heisenberg:

1) Función de onda ψ

Un sistema está **completamente definido** por una función

de onda ψ , que representa todo el conocimiento del sistema por parte de un observador.

2) Principio de indeterminación

No es posible conocer los valores de todos los observables del sistema al mismo tiempo; sí lo es establecer leyes probabilísticas sobre ellos.

3) Principio de complementariedad

Las cosas tienen una naturaleza dual, y se comportan como partículas o como ondas, **PERO NO COMO AMBAS A LA VEZ.**

4) Principio de correspondencia

La descripción cuántica de sistemas macroscópicos **tiende a la descripción clásica** de esos sistemas, según la probabilidad tiende hacia la estadística en un número muy grande de medidas.

Como puedes ver, el primer principio de la *Interpretación de Copenhague* invalida el estado:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} |\text{cara}\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |\text{cruz}\rangle$$

de la moneda como estado cuántico del sistema.

Ese estado representa información, pero no *toda* la información que se puede tener sobre el sistema.

Es información, pero no un estado cuántico, pues no todo conjunto de información sobre un sistema es un estado cuántico,

**SÓLO LOS QUE CONTIENEN TODA LA
INFORMACIÓN DEL SISTEMA LO SON.**

Entender esta diferencia es esencial para comprender la diferencia entre esta interpretación y otras.

Por el contrario, si conozco la posición y el momento de una partícula con la máxima precisión posible (que no es infinita para ambos, como ya sabes), y escribo esa información sobre la partícula como objeto matemático, eso *sí es* un estado cuántico de acuerdo con la *Interpretación de Copenhague*, porque conocido ese objeto matemático se conoce el sistema tan bien como es posible conocerlo.

Este concepto es fundamental.

Ese primer principio produjo un intensísimo escozor mental a muchos físicos, ya que supone la verdadera ruptura con las ideas anteriores de realidad objetiva. No es que un estado cuántico sea probabilístico porque no hayamos obtenido toda la información del sistema: el estado cuántico **ES** toda la información del sistema. En resumen: Dios *sí* juega a los dados. Esto era inaceptable para muchos, entre ellos Einstein y Schrödinger, que trataron de encontrar agujeros en la interpretación de Copenhague y de proponer otras alternativas.

Es importante que se entienda, antes de que discutamos otras interpretaciones alternativas de la mecánica cuántica, que una interpretación es científicamente relevante, entre otras cosas, si es falsable.

Einstein discutió durante bastante tiempo con Bohr y sus partidarios.

Esto generó de la *paradoja EPR*, que Einstein publicó junto con Podolsky y Rosen en 1935. El mismo año, en parte como reflexión ante esa paradoja, Erwin Schrödinger propuso otro experimento mental que trataba de mostrar lo absurdo de llevar la interpretación de Copenhague a sus últimas consecuencias:

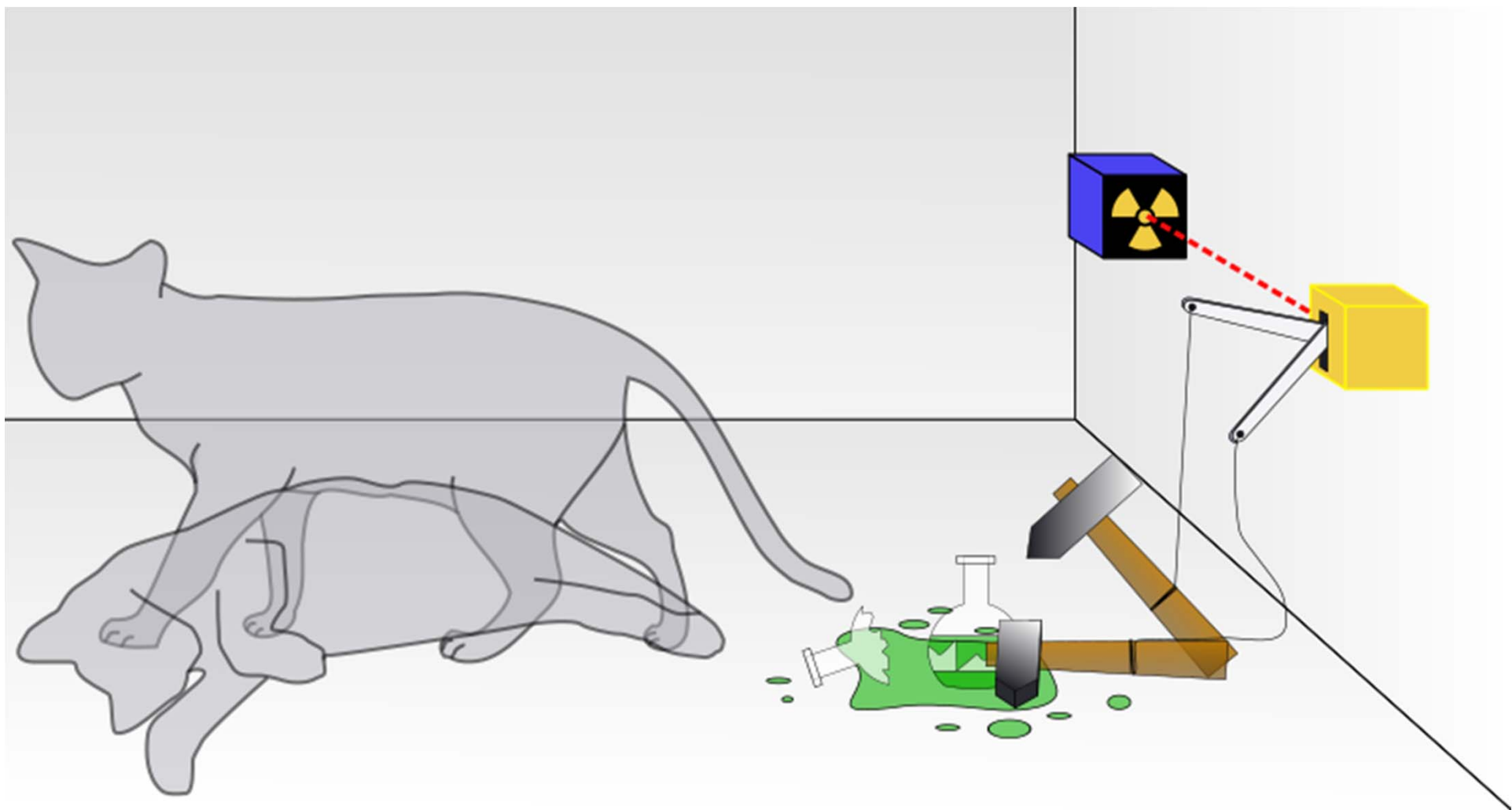
LA PARADOJA DEL GATO DE SCHRÖDINGER

El artículo de Schrödinger, en la revista alemana *Die Naturwissenschaften* (*Las Ciencias Naturales*), es bastante largo, y trata de desmontar las ideas de Bohr y compañía de diversas maneras.

En lo que se refiere al gato, la parte más memorable del artículo, Schrödinger intenta mostrar cómo es fácil suponer que un estado cuántico representa absolutamente la información completa de un sistema cuando hablamos, por ejemplo, del espín de un electrón, o de la probabilidad de que una partícula sufra el efecto túnel, pero no cuando hablamos de cosas macroscópicas.

Aquí una traducción del párrafo en cuestión:

Pueden incluso plantearse casos bastante absurdos. Un gato está encerrado en una cámara de acero, junto con el siguiente aparato (que debe ser protegido frente a una posible injerencia por parte del gato): en un contador Geiger hay una minúscula cantidad de una sustancia radioactiva, tan pequeña que tal vez, en el transcurso de una hora, uno de los átomos se desintegre, pero también, con igual probabilidad, ninguno lo haga; si sucede, el tubo del contador Geiger se descarga y, a través de un relé, libera un martillo que rompe un pequeño frasco de ácido cianhídrico. Si se deja este sistema aislado durante una hora, podríamos decir entonces que el gato seguirá vivo si ningún átomo se ha desintegrado. La función de onda de este sistema expresaría esto incluyendo el gato vivo y el gato muerto (perdón por la expresión) mezclados o esparcidos a partes iguales.



Es decir, como hay un 50% de probabilidades de que se haya desintegrado algún núcleo y un 50% de que no, hay un 50% de probabilidades de que el gato esté vivo y un 50% de que esté muerto, y no estaré seguro de cuál de las dos posibilidades es real hasta que abra la caja.

De acuerdo con la notación de Dirac, podemos describir el estado del gato antes de abrir la caja así:

$$\frac{1}{\sqrt{2}}|\text{vivo}\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|\text{muerto}\rangle$$

Pero *¿qué quiere decir eso exactamente?* Es una cosa hablar de estados del núcleo que se desintegra o no, y una muy distinta de algo, como un gato, que es cercano a nuestra experiencia. ¡O el gato está vivo, o está muerto! *¿O no?*

El experimento mental de Schrödinger plantea preguntas fundamentales sobre el concepto de estado y de realidad, de observación y localidad, como veremos luego; preguntas que toda interpretación de la mecánica cuántica que se precie debe responder. De hecho, una manera relativamente sencilla de presentar una interpretación determinada de la cuántica es responder a la pregunta:

¿Cómo se describe el caso del gato de Schrödinger con esta interpretación?

Por ejemplo, si se es un partidario de Einstein, y se piensa que la naturaleza probabilística de la cuántica no se debe a propiedades inherentes a la materia, sino a que no conocemos todas las variables del sistema. ¿Cómo explicarías entonces el caso del gato de Schrödinger?

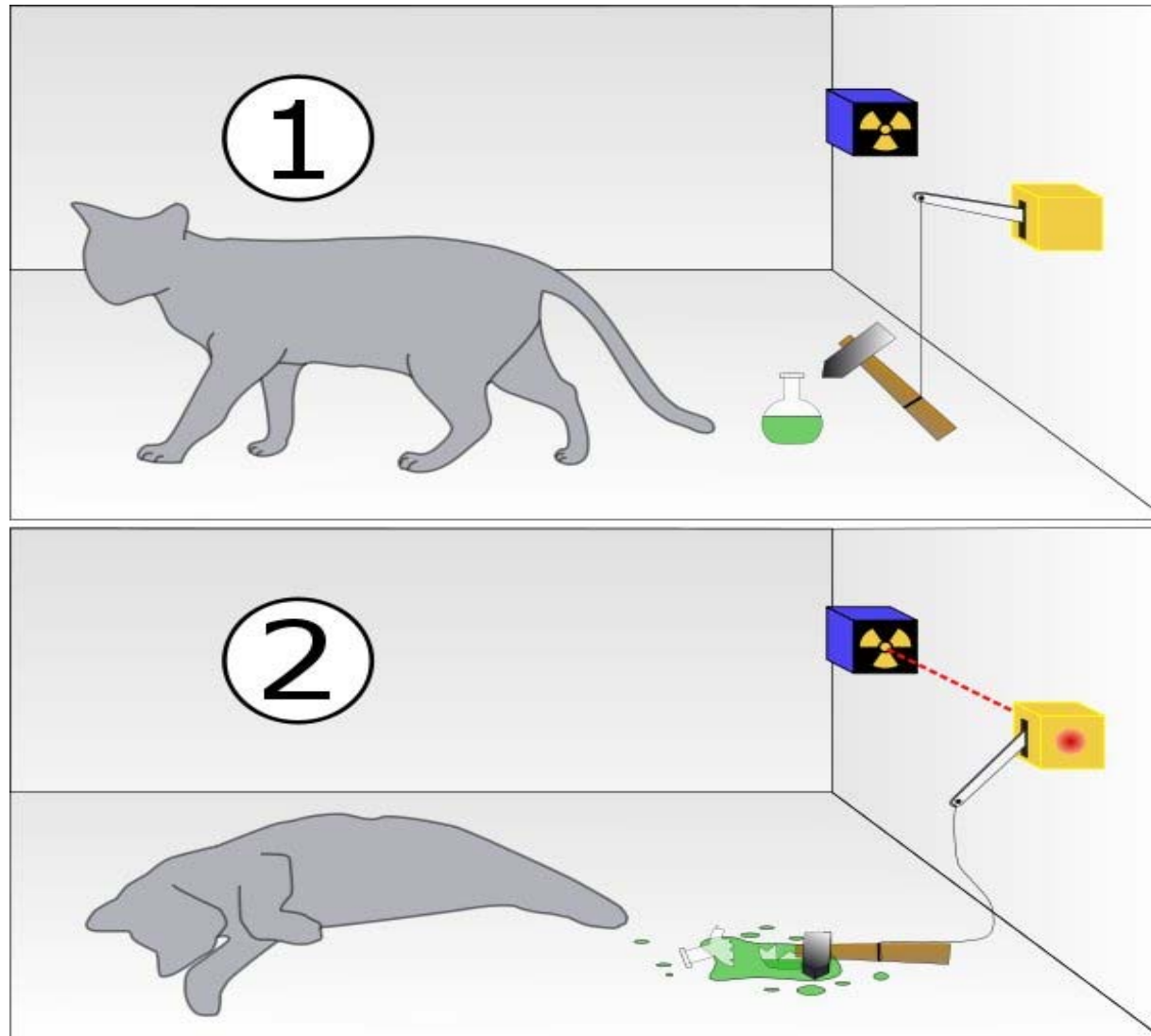
Básicamente así: el gato está en todo momento vivo o muerto. Si digo que el gato está:

$$\frac{1}{\sqrt{2}}|\text{vivo}\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|\text{muerto}\rangle$$

estoy diciendo más sobre mi propia información sobre el problema que sobre el propio gato. Mi información es incompleta; desconozco si se ha desintegrado un núcleo o no porque estoy tratando el problema de manera probabilística debido a mi conocimiento parcial sobre el comportamiento de los átomos.

Si tuviera en cuenta *todas* las variables del problema, el estado del gato siempre sería:

$|\text{vivo}\rangle$ o $|\text{muerto}\rangle$



Por lo tanto, cuando se abre la caja no sucede nada especial: el gato es el mismo de antes.

El estado del gato cambia simplemente porque lo hace mi información sobre él, y entonces lo conozco perfectamente.

Según Einstein:

el gato no está borroso, es que nosotros tenemos unas gafas mal ajustadas, tenemos que buscar unas mejores.

Heisenberg, por el contrario, frunciría las cejas ante la explicación de Einstein.

Lo que sucede, según la versión más “dura” de la Interpretación de Copenhague, es que el estado $\frac{1}{\sqrt{2}}|\text{vivo}\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|\text{muerto}\rangle$ es *toda* la información que es posible obtener sobre el gato. A efectos prácticos, para un científico que se enfrenta al problema, *es el gato*. La indeterminación sobre su estado no se debe al hecho de que no conozcamos bien el comportamiento de los átomos y sus desintegraciones: se debe al hecho de que una partícula en un pozo de potencial finito puede escapar de él en cualquier momento y no es posible asegurar cuándo lo hará, ni siquiera si lo hará, sólo realizar predicciones probabilísticas.

Cuando abro la caja, la función de onda se colapsa y mido uno de los *autoestados* del gato.

Es decir, según Heisenberg **el gato está borroso y se hace nítido al abrir la caja.**

No tiene sentido preguntarse sobre si “realmente” estaba vivo o muerto antes de ese momento, ya que no hemos medido el observable.

Tanto la interpretación de Einstein como la de Heisenberg tienen problemas serios, pero la importancia del experimento mental de Schrödinger es cómo diferencia las distintas interpretaciones a un nivel que es fácil de entender, ya que se refiere a algo que podemos imaginar fácilmente e incluso experimentar en cierto sentido. Es algo mucho más cercano que un núcleo atómico o un fotón.

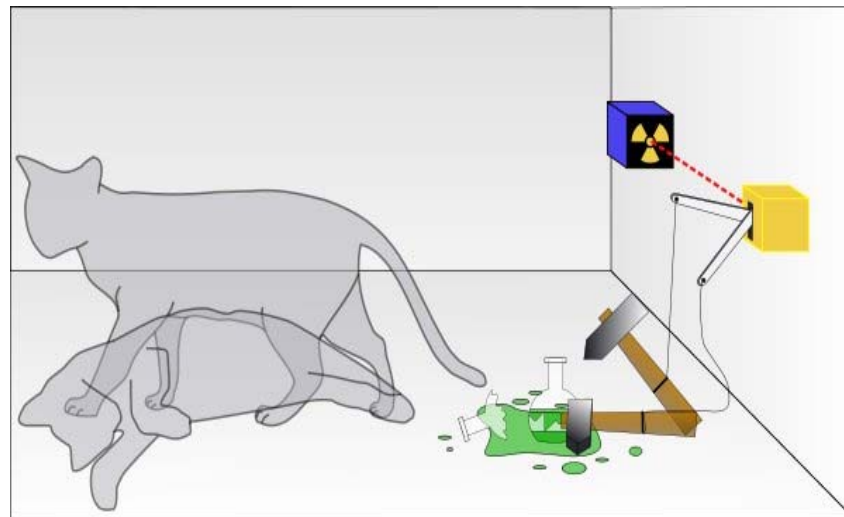
En él se ponen de manifiesto algunas lagunas enormes de la *Interpretación de Copenhague*, como el propio hecho de la medida:

¿Qué es “medir” en este experimento? ¿Abrir la caja?

¿Cómo modifica al gato el que yo abra la caja, cuando la desintegración se ha producido (o no) en el pasado?

¿Qué es lo relevante, el hecho de que yo conozca el resultado o el proceso físico de la medida?

¿Por qué se trata cuánticamente al gato y la caja, pero no a mí ni al proceso de medida?, etc.



Además, el hecho de que el gato sea un ser vivo plantea preguntas adicionales:

*¿cuál es el estado del gato para el propio gato?
¿es el mismo que para mí, que estoy fuera de la caja?*

Si abro la caja y el gato sigue vivo, debe tener recuerdos de lo que sucedió antes:

¿se recuerda a sí mismo siempre vivo, o como una superposición de vivo y muerto?

Es más, si una persona diferente de mí abre la caja:
¿qué le sucede al estado del gato?

*Si en vez de un gato meto en la caja a una persona que puede relatar con posterioridad lo que ha sucedido:
¿qué contaría?*

En resumen, el experimento del gato muestra la clave de las diferencias entre unas interpretaciones y otras:
¿es el estado cuántico una entidad con existencia propia, es sólo una abstracción de mi conocimiento incompleto, o no tiene sentido hacerse esa pregunta?

Afortunadamente, las interpretaciones de la cuántica realizan predicciones que pueden comprobarse empíricamente, y algunas son predicciones incompatibles con otras interpretaciones. Es posible diseñar experimentos que demuestren que una u otra característica de una interpretación concreta es falsa o verdadera, aunque algunos de estos experimentos no se hayan realizado aún por problemas prácticos (otros sí lo han hecho).

El experimento mental del gato es importante además porque, en él, Schrödinger hace mención de un término que hoy en día utilizamos hasta la saciedad y tiene implicaciones muy serias, según la interpretación que le demos.

Este término es *Verschränkung*, que podemos traducir como *entrelazamiento* o, más específicamente (para no confundir), *entrelazamiento cuántico*.

Existe, en el caso del gato y la muestra de material radioactivo, una conexión íntima entre sus estados cuánticos – están *entrelazados*.