

Teorema de no clonación e influencia en el entrelazamiento cuántico

Parte II

Dr. Ing. Ernesto Gandolfo Raso

egandolfo@frm.utn.edu.ar

El entrelazamiento cuántico

Schrödinger introduce el término de *entrelazamiento* al hablar del sistema gato-isótopo, ya que en el experimento mental— si se ha producido una desintegración, el gato habrá muerto, mientras que si no se ha producido, el gato estará vivo. Existe una “conexión íntima” a nivel físico entre el gato y el isótopo.

Imaginemos que existe una extrañísima especie de conejos cuánticos, los *cuantejos*, que tienen ciertas características muy peculiares:

1) Existen dos tipos de cuantejos: los *cuantejos angelicales* y los *cuantejos diabólicos*.

- los cuantejos angelicales son adorables, pacíficos y afectuosos.

- los cuantejos diabólicos son criaturas sanguinarias y feroces.

2) Las dos variantes de cuantejos están perfectamente equilibradas: los cuantejos siempre **nacen de a pares**, un cuantejo angelical y otro diabólico.

3) Al nacer, ambos son absolutamente **indistinguibles**, tanto por su apariencia como por su comportamiento.

Es durante la primera noche después de nacer cuando, de pronto, muestran su naturaleza angelical o demoníaca de forma inequívoca.

A partir de ahí, no cabe duda de a qué variante pertenece el cuantejo en cuestión – un 50% de las veces.

Ahora que nace un par de cuantejos. Ambos han nacido juntos, lo que significa que llegará un momento, esta misma noche, en el que uno de los dos cuantejos se mostrará como un cuantejo angelical, y el otro como diabólico.

Sin embargo, nos han dado los cuantejos metidos en sendas cajas, con lo que no se pueden ver y no hay nada exterior que los afecte de ningún modo.

De manera que un observador A va a tu casa con tu cuantejo, y otro B lo lleva a la suya, ambos metidos en las cajas, y se prometen mutuamente que no se abrirán las cajas hasta la mañana siguiente, después de que la verdadera naturaleza de los dos cuantejos se haya manifestado.

Los estados cuánticos correspondientes serán:

$|\text{angelical}\rangle$ y $|\text{diabólico}\rangle$

Estos son *autoestados* del observable *tipo de cuantejo*.

Cuando se van a las respectivas casas, el estado del cuantejo de A es:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} |\text{angelical}\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |\text{diabólico}\rangle$$

ya que no hay absolutamente nada que me indique de qué tipo es, pero se sabe que, de los dos, uno es el diabólico y el otro el angelical, con lo que existe la misma probabilidad de que un cuantejo resulte ser el uno o el otro.

Si la teoría cuántica es **completa**, eso quiere decir que se conoce absolutamente todas las variables que definen al cuantejo observado, con lo que el estado del cuantejo y el cuantejo en sí son, a todos los efectos, indistinguibles.

Dicho de otra manera:

si la teoría cuántica es incompleta, entonces existen variables que definen al cuantejo, que pueden ser conocidas, pero que la teoría no contempla.

Por ejemplo, si todos los cuantejos nacen con un gen que determina si son angelicales o diabólicos, pero ese gen no afecta al comportamiento ni la apariencia del cuantejo hasta la primera noche, y la teoría no contempla los genes, entonces la teoría es **incompleta**.

No es que la variante del cuantejo no esté determinada, es que no se conoce porque la teoría falla.

Esto es muy importancia : si la teoría es completa y se conoce el estado del cuantejo, si cambia el estado es que ha cambiado el cuantejo o al revés.

Pero si la teoría no es completa existe una desconexión entre la información que tengo del cuantejo y el cuantejo en sí.

Es posible que la información cambie sin que lo haga el cuantejo, o viceversa, porque hay variables que cambien sin que se conozca porque *la teoría no las contempla, no las tiene en cuenta.*

Las variables de ese tipo se denominan ***VARIABLES OCULTAS***.

Algunos físicos, como Einstein, consideraban que su existencia explicaría la aparente aleatoriedad de la cuántica – no es que las cosas no estuvieran definidas, sino que no estábamos teniendo en cuenta las cosas que las definían.

(No se han encontrado ninguna de esas variables hasta ahora).

Pero supongamos, para seguir con el ejemplo, que la teoría cuántica *sí* es completa, y que la naturaleza del cuantejo observado *no* está determinada en absoluto cuando el observador A lo lleva a casa, como tampoco lo está la del segundo cuantejo que otro observador B se lo lleva a su casa. Lo que sí está claro es que no es posible conocer la variante del cuantejo A sin conocer la del B y viceversa: ambos nacieron a la vez, con lo que uno de ellos es necesariamente angelical y el otro diabólico.

En cierto sentido, *no tiene sentido describir a nuestros cuantejos separadamente*, porque sus estados cuánticos están íntimamente unidos:

NUESTROS CUANTEJOS ESTÁN ENTRELAZADOS

Dicho de otro modo, lo que tiene sentido es describir el estado de *los dos cuantejos juntos* como algo así:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} |\text{angelical}\rangle_A \otimes |\text{diabólico}\rangle_B + \frac{1}{\sqrt{2}} |\text{diabólico}\rangle_A \otimes |\text{angelical}\rangle_B$$

Ese símbolo \otimes , en lo que aquí respecta, simplemente significa “combinado con”, ya que las dos posibles combinaciones son que el cuantejo A sea angelical y el B diabólico o al revés.

Cuantejo diabólico en acción

Imagina que, de madrugada, A decide romper su promesa y abre la caja de su cuantejo para ver si es afectuoso y adorable o una máquina de muerte y destrucción.

Supongamos que, en el momento en el que A abre la caja, el pequeño animalito salta hacia su yugular con las fauces abiertas, sediento de sangre.

No tiene sentido que diga que el estado de su cuantejo es: $|\text{diabólico}\rangle$.

Lo que sí tiene sentido que diga es que el estado de los dos cuantejos entrelazados es:

$$|\text{diabólico}\rangle_A \otimes |\text{angelical}\rangle_B$$

Hay una parte intuitiva de esto, y otra que no lo es. Al determinar que el cuantejo de A es diabólico, se está absolutamente seguro de que, cuando el observador B abra su caja, su cuantejo saltará a tus brazos, afectuoso y adorable.

Esto es inevitable dado **el entrelazamiento** de los cuantejos: si sé la variante de uno, sé la variante del otro sin lugar a dudas.

Si la variante de los cuantejos estuviera determinada por alguna variable oculta, entonces todo sería así de sencillo: el cuantejo A siempre fue diabólico desde el principio, y el B adorable.

Nada ha cambiado en ninguno de los dos cuantejos al abrir la caja de A, simplemente lo ha hecho la información que se tiene de ellos.

Pero, ¿y si la teoría cuántica es una teoría completa y el estado del cuantejo contiene absolutamente toda la información que es posible obtener sobre el cuantejo?

Supongamos que es así, y se verá cómo se obtiene consecuencias muy raras: tan raras que a Einstein le parecían aún más aberrantes que la aleatoriedad de la cuántica, e hicieron que el gran físico rechazase este concepto de entrelazamiento con énfasis.

Si los estados contienen toda la información, antes de que A abra su caja y el cuantejo A salte a morderle el cuello, no es que no se sepa si el cuantejo A es angelical o no; **es que el cuantejo A no es ni una cosa ni la otra**. Porque, si lo fuera pero no lo supiéramos, entonces habría algo que no estamos teniendo en cuenta en la teoría, luego no sería completa... pero hemos partido de la base de que lo es.

Si la teoría cuántica es completa y el estado del cuantejo A cambia, *es que el cuantejo A cambia.*

Si el estado cambiase de:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} |\text{angelical}\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |\text{diabólico}\rangle$$

a:

$$|\text{angelical}\rangle$$

sin que lo hiciese el cuantejo, es que el estado inicial no contenía toda la información del sistema, algo absurdo porque es nuestra premisa.

Esto quiere decir que, en el momento en el que A abre la caja y cuantejo A salta de ella con ojos inyectados en sangre, de manera absolutamente instantánea, el cuantejo B ha cambiado y, de ser un cuantejo “indeterminado” se ha convertido en un cuantejo angelical.

La conexión entre los cuantejos es así de íntima: no hay nada en el Universo que pueda hacer que, al alterar el estado del cuantejo A, el B no cambie también.

Esa interacción, a diferencia de la fuerza eléctrica o la gravitatoria, no disminuye con la distancia, no puede ser detenida por barreras físicas de ningún tipo, no puede ser detectada en su “*transmisión*” porque no hay ninguna transmisión mensurable en el espacio entre los dos cuantejos. Lo que sea que va del cuantejo A al B (aunque ésta no es una buena descripción, porque no hay movimiento ni transmisión de nada, hay un cambio simultáneo) es intangible, imparabile e inmediato.

En palabras de Einstein, se trata de una *spukhafte Fernwirkung*, una *acción fantasmal a distancia*.

Esto es algo que repugnaba al genial físico profundamente; tanto que, de ser la teoría cuántica una teoría completa, él mismo “*preferiría ser zapatero, o incluso empleado de una casa de apuestas, antes que físico*”.

La razón de esta repugnancia puede no resultar evidente al principio, pero se debe a la siguiente razón:

**Si la cuántica es una teoría completa, la realidad
NO ES LOCAL.**

Hasta este momento, se había considerado que un cambio en cualquier componente del Universo sólo producía un cambio en su inmediata vecindad, que luego podía ir propagándose (teniendo como límite la velocidad de la luz) hasta alcanzar puntos alejados de él según pasaba el tiempo.

Por ejemplo, si un observador A tiene un objeto y uno B tiene otro, y el objeto de A cambia, ese cambio no afectará al objeto de B hasta que haya pasado un tiempo determinado (tanto más grande cuanto más alejados estén los objetos).

Por lo tanto, de acuerdo con la teoría clásica, si A quiere estudiar el objeto de B durante un tiempo corto, se puede ignorar los cambios que A pueda realizar sobre el de B, porque no llegarán a afectarlo.

Pero, si la teoría cuántica es completa, como en el caso de los cuantejos, un cambio en uno de ellos puede producir cambios en otros de manera instantánea, **por muy alejados que estén de él**, sin que haya una mediación de cambios intermedios a través del espacio que los separa.

Esa realidad es ***NO LOCAL***: no puedo describir una parte del Universo sin describirlo todo, porque los cambios se producen “en todo a la vez”, en vez de producirse en un punto y propagarse a otros.

En palabras de Einstein,

La siguiente idea caracteriza la independencia relativa de los objetos A y B alejados en el espacio: la influencia externa sobre A no tiene influencia directa sobre B; esto se conoce como: Principio de Acción Local [...].

Si este axioma se rechazase completamente, la idea de la existencia de sistemas cuasi-aislados, y por lo tanto la postulación de leyes que pueden comprobarse empíricamente en el sentido comúnmente aceptado, sería imposible.

Una de las maneras más comunes de lograr el entrelazamiento es el uso de láseres y cristales. Ciertos cristales tienen la curiosa propiedad, cuando reciben luz (dicho “en cuántico”, fotones) de que a veces un fotón es absorbido por el cristal y a continuación se emiten dos en su lugar, en un proceso llamado **conversión paramétrica a la baja**. Desde luego, la energía total suma de los dos fotones es la del fotón original, pero existe otra propiedad más curiosa, debida a la conservación del momento lineal:

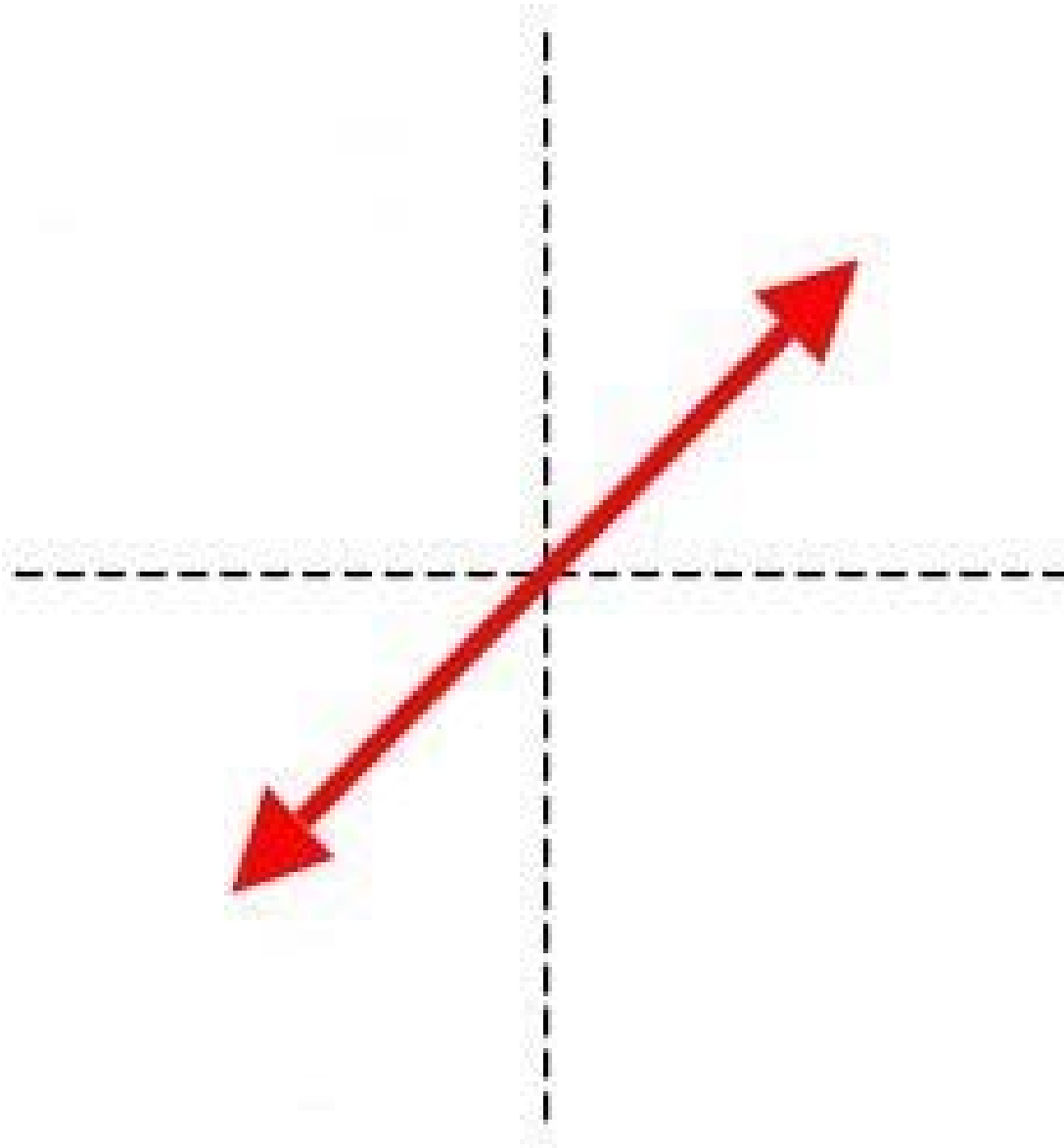
los dos fotones que salen están polarizados perpendicularmente el uno respecto del otro.

Si la onda electromagnética que transporta el primer fotón oscila *verticalmente*, entonces seguro que la del otro lo hará *horizontalmente*, y para cualquier otra dirección de oscilación, ambas serán perpendiculares la una a la otra.

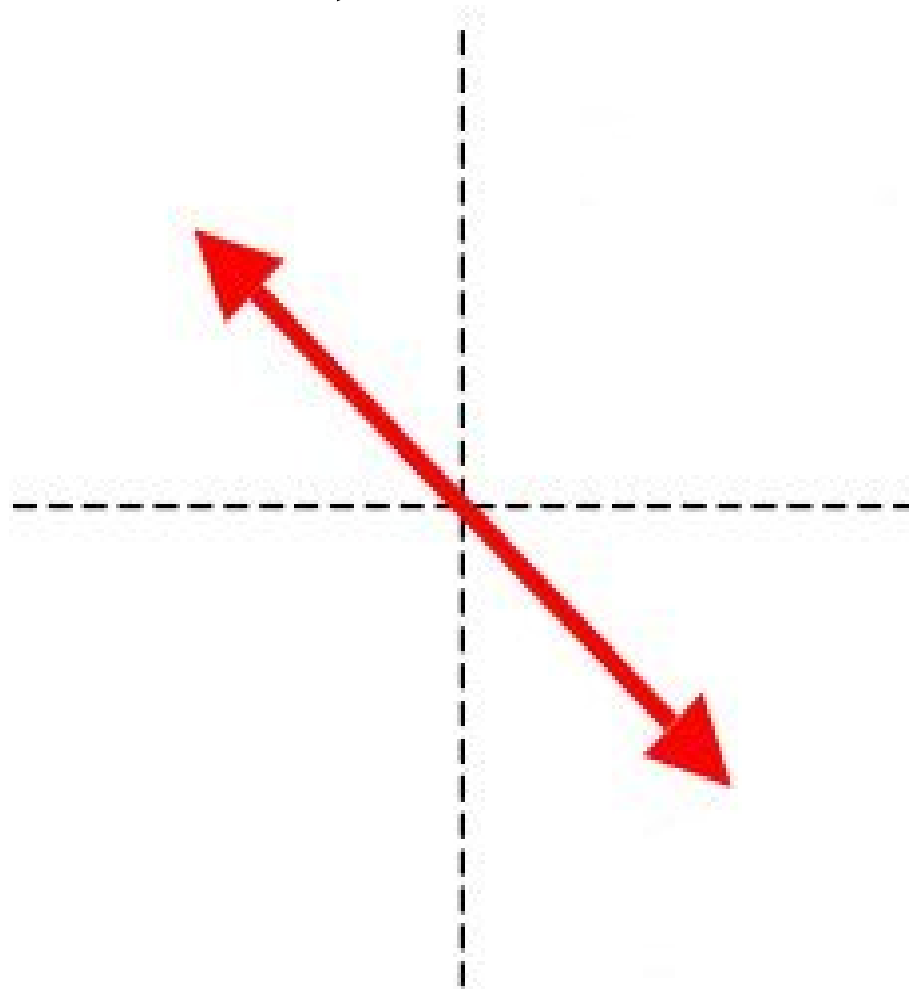
Hay que notar en cómo esto es bastante parecido al caso de los cuantejos: los dos fotones aparecen al mismo tiempo, y son indistinguibles el uno del otro hasta que se realice una observación sobre ellos.

Dado que los dos fotones pueden alejarse el uno del otro, es posible que yo, como observador, sólo me fije en uno de ellos, y que nunca jamás tenga acceso al otro.

Pero lo que es seguro es que, si mido la dirección de polarización de mi fotón y veo esto:



Entonces el estado de mi fotón ha cambiado, como también lo ha hecho, de forma instantánea, el otro fotón que nunca he visto; y puedo estar seguro de que, cuando alguien lo mida, observará esto:



No se puede terminar sin dejar de mencionar una falsa concepción relacionada con el entrelazamiento que se oye con relativa frecuencia, sobre todo al hablar de un concepto llamado el teletransporte cuántico. Esa falsa concepción es la idea de que lo que acabo de describir, de ser la cuántica una teoría completa, *permite una transferencia instantánea de información entre dos observadores.*

Esto es falso.

Sigamos con el ejemplo de los cuantejos:

Sigamos partiendo de la hipótesis de que la cuántica es una teoría completa y que, cuando A abre la caja y el cuantejo de él se abalanza, algo cambia en el de B de manera instantánea.

La pregunta aquí es, *¿cómo puedo utilizar esa instantaneidad para enviarte un mensaje burlándome de los límites de la velocidad de la luz?*

Por ejemplo, supongamos que, cuando se separan el observador A y el B, cada uno con su cuantejo, estaban pensando en ir al cine al día siguiente, pero A no estaba seguro de querer ir o no.

A está en su casa, con la caja de su cuantejo cerrada, y decide que no tiene nada importante que hacer al día siguiente y que sí quiere ir al cine.

Puede llamar por teléfono a B para decírselo, desde luego, pero:

¿existe alguna manera de utilizar el cuantejo A y el cambio instantáneo en el estado del cuantejo B para que pueda dar ese mensaje sin utilizar nada más?

¿qué código preestablecido podemos utilizar para eso, que no requiera que A lo sepa de antemano, mientras están juntos, cuál va a ser la elección?

Simplemente, **no se puede**.

Al abrir A su caja, su cuantejo resulta ser diabólico y se abalanza sobre él, y entonces se sabrá que el de B es necesariamente angelical, pero no hay manera de que se pueda utilizar ningún código para enviarle el mensaje de que, si A sobrevive a esta bestia infernal que trata de devorarlo, sí le gustaría ir al cine con B mañana.

La única manera que se tiene de emplear el entrelazamiento es utilizar un canal clásico de información (por ejemplo, llamarte por teléfono) para complementar el hecho de que sé que el cuantejo B es angelical.

*“Entonces, ¿para qué diablos sirve todo esto?
¡Si A va a llamar a B por teléfono de todos modos
para decirme si viene al cine, ¿de qué sirven los
cuantejos?”*