

Teorema de no clonación e influencia en el entrelazamiento cuántico

Parte II

Dr. Ing. Ernesto Gandolfo Raso

egandolfo@frm.utn.edu.ar

Teletransporte cuántico

Tiene que quedar en claro *lo que no es*: **no es** ni un transporte de materia **ni** un proceso instantáneo. Cuando decimos la palabra “teletransporte”, lo que viene a la cabeza es el transporte instantáneo de materia a través del espacio. Evidentemente, siempre podemos transportar materia a lugares lejanos, simplemente moviéndola, pero eso requiere tiempo y nadie lo llamaría “teletransporte”. Si hay una barrera física entre ambos lugares, por ejemplo, ya no podríamos transportarnos. De igual modo, si queremos transportar algo entre dos lugares que están a una distancia gigantesca, hacerlo mediante el movimiento requiere de un tiempo muy largo, mientras que el teletransporte –entendido de manera intuitiva– significaría que podemos realizar el *tránsito instantáneamente*.

Y, siguiendo este criterio, ese “teletransporte” es imposible de acuerdo con la mecánica clásica, con la relativista y la cuántica, todas por igual.

Pero podemos imaginar esta otra situación, que podríamos llamar **pseudoteletransporte clásico**, y que podría tener lugar si el mundo no fuera “borroso”, sino que la mecánica clásica fuera la que describe el Universo de forma completa; no es un “teletransporte verdadero”, pero casi.

Supongamos que una persona, A, está en un lugar determinado, y otra, B, consigue, de alguna manera, conocer con una exactitud absoluta la posición y velocidad de todas y cada una de las partículas fundamentales que componen el cuerpo de A.

Si así fuera, y luego *A* transmitiera toda esa información hasta otro lugar diferente, por ejemplo, la Estación Espacial Internacional, y allí dispusiera de los suficientes átomos de distintos elementos como para reconstruir un cuerpo humano, podría utilizar esa información que *B* ha obtenido, disponer los átomos en la estación de modo que todos y cada uno de ellos tuvieran exactamente las mismas posiciones relativas, velocidades, energías, etc., con lo que tendríamos una copia exacta e indistinguible de *A* en la Estación.

A continuación, *B* podría destruir el cuerpo de *A* en la tierra, para que no tuviéramos la incómoda situación de que hubiera dos copias de *A*, y entonces el único “*A*” que existiría sería el que está en la Estación Espacial Internacional, sin que el cuerpo de *A* se haya movido, en ningún momento, desde su lugar en la tierra hasta la estación.

Naturalmente, existe un problema filosófico muy profundo ahí: el que está en la Estación Espacial Internacional ¿es realmente A?

Si la configuración y estructura exacta de tus huesos, músculos, sistema nervioso con cada una de las neuronas, recuerdos, etc., son indistinguibles del original, ¿es “A”?

Esto lleva a cuestiones mucho más profundas aún, como la propia pregunta de qué significa “A”, en las que no vamos a entrar ahora.

La cuestión es que, de este modo, habríamos logrado una suerte de “pseudoteletransporte”. Por un lado, los átomos del cuerpo de A no se han movido de su sitio, ni instantáneamente ni de ninguna otra manera. De hecho, para evitar situaciones incómodas se ha reducido el cuerpo original a cenizas; además, B ha necesitado tener ya, en el lugar de destino, **un conjunto de átomos de muchos elementos listo para recibir la información** del cuerpo de A y convertirse en el “nuevo cuerpo de A”. Por otro lado, el proceso *no es instantáneo* en absoluto: se ha necesitado transmitir la información desde la habitación de la casa de A hasta la Estación Espacial, por ejemplo utilizando ondas de radio, y luego recibir la información allí y disponer la materia que se tenga para reformar el cuerpo de A de la manera adecuada. De ahí que no sea un teletransporte “de verdad”, aunque todo depende, claro está, de cómo definamos el término.

Este pseudoteletransporte es teóricamente perfectamente plausible de acuerdo con la mecánica clásica... e irrealizable en la práctica por razones obvias.

Para empezar, *¿puedes imaginar la cantidad de información que requeriría transmitirse para conocer con exactitud todas las variables que definen cada una de las partículas que forman el cuerpo de A?*

Y, aunque enlace otra vez con los aspectos filosóficos del asunto, *¿estaría dispuesto A a someterse al proceso, y sentiría que quien aparecería en la Estación es el mismo A ?*

Pero este “pseudoteletransporte” mediante la transferencia de la información completa sobre un sistema físico para reconstruirlo en otro lugar no sólo es imposible en la práctica: **es imposible debido a la naturaleza cuántica del Universo.**

No es posible conocer todas las variables de un sistema con exactitud o, lo que es lo mismo, *no es posible conocer el estado de un sistema sin alterarlo*. De hecho, lo de “*conocer con una exactitud absoluta la posición y la velocidad*” lleva a cuestionarse; ”
¿Con exactitud ambas cosas a la vez?

De modo que ¿cómo conseguir ese pseudoteletransporte en un mundo cuántico?



(top, left) Richard Jozsa, William K. Wootters, Charles H. Bennett. (bottom, left) Gilles Brassard, Claude Crépeau, Asher Peres. Photo: André Berthiaume.

Los primeros en definir teóricamente un proceso por el cual conseguirlo fueron C. H. Bennett, G. Brassard, C. Crépeau, R. Jozsa, A. Peres y W. K. Wootters, en 1993, en [“Teleporting an Unknown Quantum State via Dual Classical and Einstein-Podolsky-Rosen Channels”](#), publicado en 1993.

La primera vez que se consiguió llevar el sistema de estos científicos a la práctica “teletransportando” fotones fue en 1997 (se publicó en *Nature* “*Experimental Quantum Teleportation*”, de D. Bouwmeester, J.-W. Pan, K. Mattle, M. Eibl, H. Weinfurter y A. Zeilinger).

La clave del sistema de Brassard y sus colegas es el entrelazamiento cuántico.

Mediante el entrelazamiento es posible transmitir, de manera indirecta, el estado de una parte de un sistema sin alterarlo, midiendo por el contrario otra parte del sistema que esté entrelazada con él, como se hizo en el caso de la criptografía cuántica .

Supongamos el caso de un sistema físico más sencillo que el del cuerpo; el de un sistema físico con dos autoestados, como un electrón que puede tener el espín hacia arriba o hacia abajo, un fotón que puede estar polarizado horizontal o verticalmente o, el de un cuantejo que puede resultar ser zanahoriófilo o zanahoriófobo cuando se le muestra una zanahoria, e intentemos teletransportarlo en el Universo cuántico.

Supongamos que un cuantejo está en un estado cualquiera que es una superposición de los dos estados propios:

$$a |zanahoriófilo\rangle + b |zanahoriófobo\rangle$$

donde a y b tienen que ver con la probabilidad de que al mostrarle esa verdura el cuantejo la coma o la rechace.



Veamos por qué no se puede hacer lo mismo que si el mundo no fuera cuántico; *¿por qué no puedes simplemente mostrarle una zanahoria al cuantejo, ver si es zanahoriófilo o zanahoriófobo, llamar por radio a la Estación Espacial y comunicárselo y punto final?* Si se le enseña una zanahoria al cuantejo en tierra, está claro que su estado va a colapsarse a:

$|zanahoriófilo\rangle$ o $|zanahoriófobo\rangle$

Pero si eso es lo que se comunica a la Estación Espacial y ellos preparan un cuantejo idéntico al que se tiene en tierra *después de mostrarle la zanahoria*, lo que tienen no es idéntico al cuantejo original.

Para entender esto, supondremos un estado concreto para el cuantejo –un estado que el observador en tierra y el de la estación espacial, por supuesto, desconocen si no se realiza ninguna medición sobre el cuantejo enseñándole una zanahoria–, de modo que no haya unas a y b abstractas.

Imaginemos pues que el cuantejo de tierra está en el estado:

$$\frac{1}{2}|zanahoriófilo\rangle + \frac{\sqrt{3}}{2}|zanahoriófobo\rangle$$

es decir, es bastante más probable que al enseñarle la zanahoria se muestre zanahoriófobo que zanahoriófilo.

¿Se ve cómo enseñarle una zanahoria al cuantejo y luego comunicar el resultado a la Estación no resuelve el problema? Esto es lo que sucedería.

En tierra se tienes:

$$\frac{1}{2}|zanahoriófilo\rangle + \frac{\sqrt{3}}{2}|zanahoriófobo\rangle$$

Se enseña una zanahoria al cuantejo, y éste la rechaza, luego su estado se ha colapsado a:

$$|zanahoriófobo\rangle$$

Se llama por radio a la Estación Espacial Internacional, y se les comunica que el estado del cuantejo es:

$$|zanahoriófobo\rangle$$

Ellos de algún modo preparan a su cuantejo para que también lo sea, con lo que tienen un cuantejo en el estado:

$$|zanahoriófobo\rangle$$

¡No hemos teletransportado el cuantejo original!

Hemos obtenido una cosa diferente, pues el proceso ha modificado el cuantejo inicial.

De hecho, como puedes ver, este pseudoteletransporte funcionaría sólo para cuantejos que están en uno de los dos autoestados, porque entonces la información a transmitir es trivial y se trata de un caso casi idéntico al clásico.

Pero, si el cuantejo está en un estado que no es trivial y **que no conocemos**, como por ejemplo:

$$\frac{1}{2}|zanahoriófilo\rangle + \frac{\sqrt{3}}{2}|zanahoriófobo$$

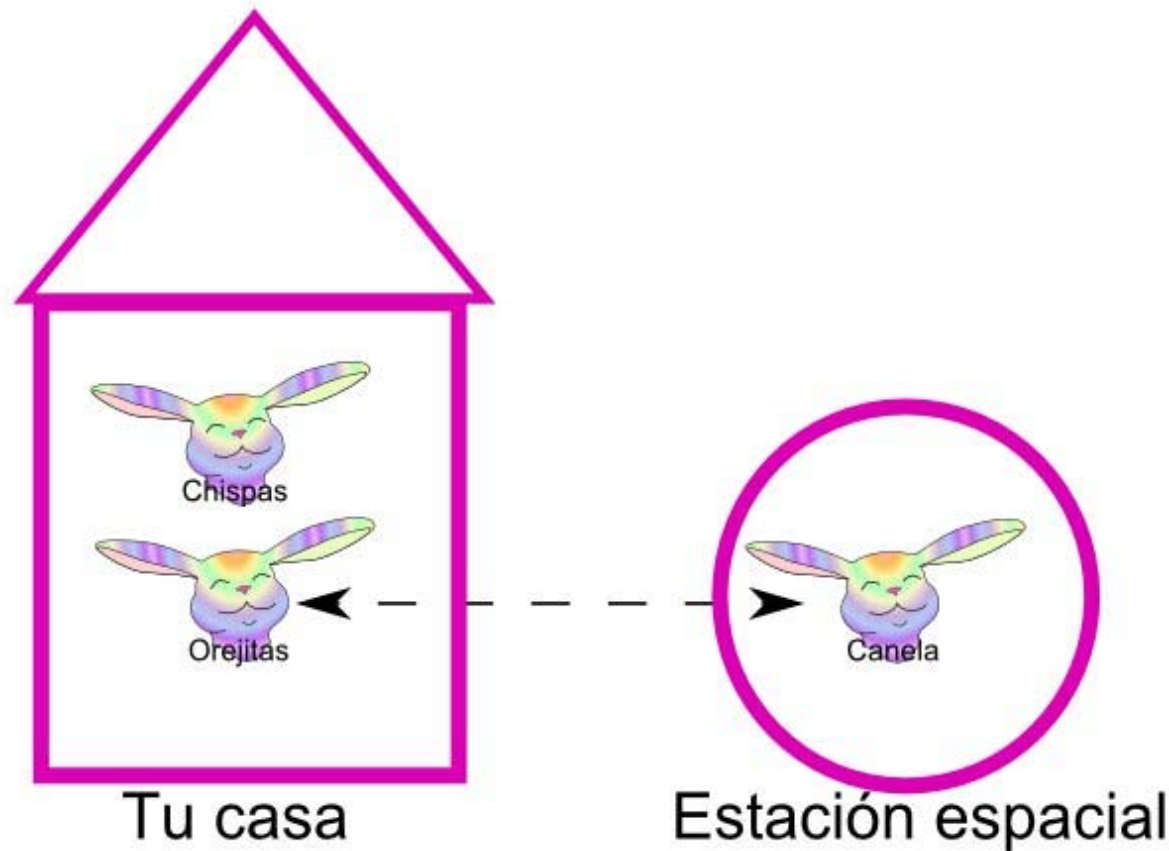
¿cómo teletransportar ese cuantejillo a otro lugar como la Estación sin modificar su estado, de modo que al otro lado tengamos un cuantejo indistinguible de éste sin llevarlo físicamente hasta la Estación?

.

Lo primero que nos hace falta, además del cuantejo original que queremos pseudoteletransportar, es **otro par de cuantejos más**. Porque la clave de la cuestión es utilizar el entrelazamiento cuántico para convertir el cuantejo de la Estación en una copia indistinguible del de Tierra, a efectos prácticos, en el mismo cuantejo.

De modo que, en primer lugar, producimos un par de cuantejos entrelazados de modo que estén siempre en estados opuestos. Alguien se queda en tierra con uno de ellos, al que llamaremos Orejitas, y otro se va a la Estación con el otro cuantejo, Canela. Y unos días después intentamos realizar nuestro experimento con un cuantejo más, Chispas.

Nuestro objetivo es que Chispas acabe en la Estación Espacial, o un cuantejo indistinguible de Chispas.



Recordar: si se realiza una medición sobre Chispas, entonces dejará de ser Chispas como era antes y habremos fastidiado todo el asunto, porque lo que se mandaría a la estación espacial sería sólo parte de la información sobre Chispas, de manera que en la estación espacial serían incapaz de recrear a Chispas tal y como era.

La razón de que el teletransporte no pueda funcionar a la manera clásica es que lo que queremos transportar –Chispas, un fotón, un átomo de sodio– *no es completamente cognoscible*. Si medimos absolutamente algunas de sus propiedades, por el **principio de incertidumbre de Heisenberg** perdemos otras, con lo que no es posible convertir el sistema en información a la antigua usanza, transferir esa información y luego reconstruir el sistema en el punto de destino con la información transmitida.

En términos de Chispas, nuestro simple cuantejo tiene una “personalidad” en lo que a las zanahorias se refiere, una personalidad que nos es imposible conocer completamente:

$$\frac{1}{2}|zanahoriófilo\rangle + \frac{\sqrt{3}}{2}|zanahoriófobo\rangle$$

La única manera de conocer parte de su personalidad es mostrarle una zanahoria –medir–, pero entonces sólo tenemos una parte de la información sobre él, y la otra parte se ha perdido y nunca podremos recuperarla de nuevo.

Nuestro sistema, que es el del teletransporte cuántico, salvará ese obstáculo haciendo uso del entrelazamiento, mediante el cual hay una conexión íntima entre Orejitas y Canela, *una conexión que transmite el estado de uno al otro de manera instantánea y sin que haya necesidad de que lo conozcamos nosotros.*

Lo que haríamos sería lo siguiente:

Entrelazamos a Chispas con Orejitas.

Para ello metemos a ambos en una misma caja durante cierto tiempo. El caso es que ahora Orejitas y Chispas son amigos.

Medimos el estado conjunto de Chispas y Orejitas, mostrándoles una zanahoria. Una vez hemos hecho esto, no hay vuelta atrás: Chispas ya no es el que era antes, hemos colapsado el estado Chispas + Orejitas y sólo hemos obtenido parte de la información que queremos transmitir.

Si no hubiéramos hecho nada más, nuestro experimento sería un fracaso, porque la parte de la información sobre Chispas que no hemos obtenido se habría perdido.

Para seguir con nuestra analogía, ya que conocemos algo sobre Chispas pero no todo, imaginemos que ahora sabemos que Chispas tenía mayor probabilidad de ser zanahoriófobo que de ser zanahoriófilo, es decir, sabemos que $b > ab > a$.

Y ya nunca podremos saber, mirando a Chispas, qué valores tenían ni a ni b .

Aquí es donde está lo genial del sistema desarrollado por Bennet, Jozsa, Wootters y compañía. Al entrelazar a Chispas con Orejitas, éste contiene parte de la información de Chispas, y por tanto la misma información –o más bien la opuesta– está en Canela, en la Estación Espacial.

La parte de la información original que se queda en Orejitas y, a través de él, en Canela, *es justo la información que no hemos obtenido al hacer la medición.*

Es decir, ahora Canela “se parece” a Chispas, pero puede no ser exactamente igual que él. En términos de nuestro ejemplo, supongamos que tras la medición Canela puede acabar en uno de estos dos estados:

$$\frac{\sqrt{3}}{2} |\text{zanahoriófilo}\rangle + \frac{1}{2} |\text{zanahoriófobo}\rangle$$

o

$$\frac{1}{2} |\text{zanahoriófilo}\rangle + \frac{\sqrt{3}}{2} |\text{zanahoriófobo}\rangle$$

Supongamos que hay un 50% de probabilidades de que Canela haya quedado en uno u otro estado, con lo que es incluso posible que ya sea exactamente igual que Chispas, o tal vez no. Y recuerda también que nosotros no conocemos el estado de Canela ni esos números, ya que no lo hemos “medido”.

Tenemos, por tanto, el estado original de Chispas “partido” en dos pedazos: por un lado, información que conocemos nosotros explícitamente, al haber mostrado la zanahoria a Chispas + Orejitas, a saber, que Chispas es más zanahorióforo que zanahoriófilo.

Por otro lado, información contenida en Canela, un cuantejo sobre el que no hemos realizado medición ni modificación alguna todavía, que es el hecho de que Canela está en uno de los dos estados que he escrito un poco más arriba. De modo que, para que se pueda disponer de toda la información, implícita y explícita, hace falta que se envíe un mensaje con lo que se ha visto al enseñar la zanahoria a Chispas + Orejitas, por ejemplo, mediante una llamada de radio. De Tierra se llama a la Estación y dicen, *“Se ha enseñado zanahorias a los cuantejos y la conclusión es que Chispas es más zanahorióforo que zanahoriófilo”*.

Finalmente, utilizando la información que se ha enviado, en la estación se modifica a Canela. Por ejemplo, lo “entreno” para que si su probabilidad de ser zanahoriófilo era menor que la de ser zanahoriófobo se quede como estaba, pero si era al revés intercambie los coeficientes de zanahoriófilo y zanahoriófobo.

En la realidad, claro está, hablamos de cosas como fotones, de modo que puede hacerse pasar el fotón por un sistema físico que asegure, por ejemplo, que la componente horizontal de la polarización del fotón sea mayor que la vertical si no era así.

Observa que el entrenamiento de Canela consiste básicamente en “decirle”: si ya eres más zanahorióforo que zanahoriófilo, quédate cómo estás.

Si es al revés, intercambia ambas probabilidades, **pero no se está enseñando ninguna zanahoria a Canela.**

No se ha medido nada sobre él, luego no se ha colapsado ni:

a $|zanahoriófilo\rangle$

ni

a $|zanahoriófobo\rangle$

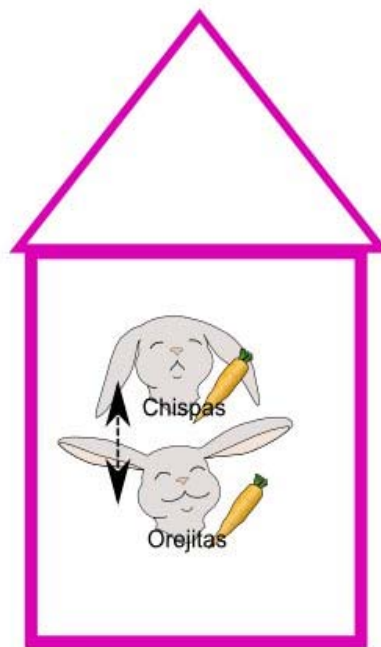
Supongamos que, en nuestro caso particular el estado de Canela era:

$$\frac{\sqrt{3}}{2} |zanahoriófilo\rangle + \frac{1}{2} |zanahoriófobo\rangle$$

Tras el entrenamiento, el cuantejillo habrá comprendido que debe intercambiar ambos coeficientes, pues si se quiere que sea más zanahoriófobo que zanahoriófilo al igual que Chispas, de modo que se modifica hasta convertirse en:

$$\frac{1}{2}|zanahoriófilo\rangle + \frac{\sqrt{3}}{2}|zanahoriófobo\rangle$$

es decir, **en Chispas**.



Tu casa



Estación espacial

Recapitulemos: hemos logrado tener en la Estación a un cuantejo exactamente idéntico a Chispas. Recuerda que, si la cuántica es una teoría completa, cuando el estado de dos sistemas es el mismo estado no es sólo que tengamos la misma información de ambos, *sino que ambos sistemas son idénticos en sí mismos*, es decir, **quien está en la Estación ya no es “Canela” sino “Chispas”**, porque todo lo que hace a Chispas ser Chispas, sin excepción, está en él. A cambio, nuestro Chispas original ya no es Chispas – su estado se ha colapsado a otra cosa.

Hemos “pseudoteletransportado” a Chispas

Observa que todas las limitaciones del pseudoteletransporte clásico siguen presentes aquí: hace falta un cuantejo en el destino antes de “transportar” nada, y hace falta transmitir información a la manera clásica –en nuestro caso, cuando se llama por radio a la Estación– para completar el proceso, ya que la información transmitida por el entrelazamiento entre Orejitas y Canela es sólo una parte del total. De modo que no estamos cerca, ni mucho menos, de transportar objetos similarmente complejos: la cantidad de información necesaria, como en el caso anterior, es increíblemente grande.

Otra limitación, en este caso una que no existía de igual modo en el método clásico, es el hecho de que hemos tenido dos cuantejos entrelazados en Tierra y la Estación.

Pero, en la práctica, mantener el entrelazamiento sin que se produzcan interacciones con el entorno que acaben con ella es muy difícil, sobre todo si es durante un tiempo o distancias largas.