Teletransporte cuántico: reseña para internautas

Posted on 1 de julio de 1999 by César Gómez

Hace dos años, en el Institut für Experimentalphysik de Innsbruck (Austria), un equipo dirigido por Anton Zeilinger, basándose en una idea de Charles H. Bennett y sus colaboradores en IBM, consiguió trasladar instantáneamente un cuerpo de un lugar a otro. El experimento suscitará en el profano una imagen familiar: la del investigador que, en un clásico de la ciencia-ficción, se descompone materialmente con el propósito de recomponerse en un punto distante del espacio, enredándose de paso con las moléculas de una mosca que se ha introducido inadvertida en su máquina transportadora. El experimento de Zeilinger, conocido en el mundo de la física como «teletransporte cuántico», difiere en aspectos cruciales del episodio ficticio. Primero, el objeto transportado era un fotón. Segundo, la traslación fue rigurosamente instantánea. Tercero, el objeto fue aniquilado y reproducido en un punto distante, y no recompuesto. En muchos sentidos, el experimento real supera en magia y extravagancia al que nos ha legado la ciencia-ficción. Conviene señalar que la aplicación del teletransporte a objetos macroscópicos como un hombre o un vaso de Borgoña exigiría un grado de desarrollo de la tecnología informática fabulosamente remoto del estado de la disciplina en este momento. En las páginas que siguen, César Gómez intenta una tarea casi imposible: explicar al no especialista los fundamentos físicos del teletransporte cuántico, eludiendo a la vez las simplificaciones tergiversadoras a que con frecuencia da lugar la divulgación periodística.

La mecánica cuántica, sin duda la revolución científica más importante de este siglo, se comenzó a gestar en diciembre del año 1900, cuando el físico alemán Max Planck postuló –para resolver un problema aparentemente marginal como era el de la radiación en equilibrio térmico– la existencia de *cuantos* o átomos de energía. En 1905, Einstein reinterpretaría estos cuantos de energía como los fotones, descubriendo fenómenos, como el efecto fotoeléctrico, en los que las ondas de luz presentan un comportamiento típicamente corpuscular. Pocos años más tarde, el aristócrata francés Louis de Broglie, dando en cierto modo la vuelta a la tortilla, postulaba comportamientos típicamente ondulatorios de las partículas de materia, por ejemplo de los electrones. El comportamiento ondulatorio de la materia fue inmediatamente puesto en evidencia mediante experimentos de difracción en

cristales, encontrándose para los electrones un comportamiento similar al por entonces bien conocido de los rayos X. Cuando se asocian estas ondas con los electrones de un átomo, conseguimos lo que se conoce como el modelo atómico de Bohr, que explica maravillosamente los espectros atómicos. Estas ondas mecanocuánticas que asociamos con la materia adquieren carta de ciudadanía científica gracias al trabajo del físico austríaco E. Schrödinger, quien descubrió la ecuación (bautizada desde entonces con su nombre) que rige la dinámica de dichas ondas. Sin embargo, las ondas cuánticas no son como las ondas de luz o como las ondas de agua que se forman en un estanque. En estos dos últimos casos, la onda refleja el comportamiento de un sistema complejo de muchos grados de libertad; por ejemplo, el agua de un estanque es un sistema con millones de átomos de hidrógeno y oxígeno. Por el contrario, las ondas que postula la mecánica cuántica son ondas que vamos a asociar con un solo cuerpo; por ejemplo, con un solo electrón.

Todos hemos visto el fenómeno de interferencia de ondas que se produce cuando tiramos dos piedras en lugares distintos de un estanque con el agua en calma. Las ondas que nacen de los lugares donde han caído las piedras se van propagando hasta encontrarse, creando nuevos frentes que definen la familiar imagen de interferencia a la que estamos acostumbrados. La mecánica cuántica nos va a devolver este fenómeno de una manera completamente nueva. Si pensamos en la onda asociada a un solo electrón, lo que podemos esperar es que el electrón interfiera consigo mismo, algo que va a dar lugar a una serie sorprendente de nuevos fenómenos.

El modo en que hemos de interpretar el significado físico de la onda mecanocuántica ha sido, ya desde los orígenes de la teoría, materia de encendidas discusiones entre los físicos. Al margen de cuestiones de interpretación filosófica, la naturaleza de estas ondas, tal y como las describe la mecánica cuántica ortodoxa, da lugar a fenómenos paradójicos y de muy difícil comprensión desde el prisma del realismo clásico. En los últimos años, algunas de las predicciones más espectaculares de la mecánica cuántica han comenzado a ser exploradas experimentalmente. De entre ellas elegiré, para esta nota, una que resultará especialmente sorprendente para el gran público: los experimentos recientes sobre teletransporte cuántico.

El término «teletransporte» ha sido importado de la ciencia-ficción y se refiere al proceso físico consistente en la destrucción de un objeto, acompañado de la simultánea creación de una copia idéntica en algún lugar distinto. La imagen intuitiva más simple que podemos hacernos de este fenómeno es la de la transmisión por fax. Con diferencias obvias, porque se trataría de enviar por fax objetos tridimensionales, y la copia transmitida tendría que ser una réplica exacta. Pero el ejemplo del fax nos dará una idea intuitiva, que llamaremos clásica, de cómo tiene lugar el proceso. Cuando colocamos un texto en el fax, lo que la máquina hace en primer lugar es traducir la información contenida en el texto –la distribución de caracteres

sobre el papel– en un código, una serie de bits, que pueden ser enviados por cable telefónico a una máquina distante. Esta segunda máquina procederá a reconvertir toda la información original en una sucesión de impulsos de tintas que reproducirán el texto original sobre una nueva hoja de papel. Observemos que lo crucial del proceso ha sido, en primer lugar, conseguir una información completa sobre el objeto que queremos transportar y, en segundo lugar, contar con un material nuevo que pueda actuar como soporte de esta información y a partir del cual podamos construir la réplica exacta. Si lo que se trata de teletransportar es un sistema físico, aunque éste sea tan simple como un solo electrón, lo primero que nos exige ese guión, basado en la imagen clásica del fax, será conocer con exactitud el estado físico de dicho electrón. Sólo contando con tal información seremos capaces de crear un electrón en idéntico estado en algún lugar distante.

Es aquí donde las diferencias entre mecánica clásica y cuántica van a ser cruciales. En la física clásica, lo que llamamos el estado de un electrón –la descripción que recoge todas las propiedades físicamente objetivas del electrón en un instante dado de tiempo– queda completamente determinado por la masa de dicho electrón, su posición, su estado de movimiento (es decir, la velocidad en un instante dado) y su carga eléctrica. Estas son las propiedades que, según la física clásica, determinarán de manera unívoca el resto de las propiedades físicas medibles de dicho cuerpo. Con la mecánica cuántica, esta descripción simple del cuerpo se complica enormemente. Lo que ahora estamos obligados a conocer será la forma específica de la onda, de la que hablábamos antes, asociada con dicho cuerpo. Es este tipo de información sobre el sistema lo que conocemos en física como la *función de onda cuántica.* El problema con el que nos vamos a encontrar está ya de alguna manera oculto en la misteriosa naturaleza de estas ondas.

Pocos serán los lectores que no hayan oído hablar del *principio de incertidumbre* de Heisenberg, otra de las piezas clave, junto con la ecuación de Schrödinger, de la mecánica cuántica. Expuesto de manera simple, lo que nos dice este principio es que nunca podremos, por procedimientos observacionales, descubrir de manera exacta cuál es la función de onda de un sistema físico. En este punto de la discusión temo que el lector comience a sentir en su propia carne la naturaleza altamente paradójica de la teoría a la que nos enfrentamos. Por un lado decimos que la mecánica cuántica nos obliga a describir un cuerpo mediante su onda asociada y por otro, decimos que nunca podemos conocer exactamente, por procedimientos experimentales, cuál es esa función de onda. Son este tipo de encrucijadas intelectuales las que han convertido para muchos la mecánica cuántica en un formalismo matemático, con reglas precisas que nos permiten comprobar experimentalmente sus predicciones, pero carente, en último extremo, de una interpretación física convincente. El principio de incertidumbre se puede presentar también –de una manera que resultará para algunos

periodísticamente más atractiva– como *la imposibilidad de clonación cuántica*. En efecto, lo primero que necesitamos para construir un clon de algo es saber con exactitud su cuadro genético; pero en el mundo cuántico, dicho cuadro genético es la propia función de onda que, como decíamos, nunca podemos conocer exactamente.

Lo anterior nos permite ya descubrir algo sobre el teletransporte. Supongamos que hubiéramos sido capaces de realizar el teletransporte de algo o alguien desde la Tierra hasta, por ejemplo, Andrómeda. En este punto se nos abren dos posibilidades. Podemos pensar que, como resultado del teletransporte, lo que tenemos ahora son dos individuos idénticos, con la única diferencia de que uno está en la Tierra y el otro en Andrómeda, lo que equivaldría a una forma complicada de clonación. O por el contrario, podemos pensar que el resultado del teletransporte va a consistir en tener el mismo individuo, que al principio se encontraba en la Tierra, pero ahora localizado en Andrómeda. El principio de incertidumbre nos permite decidir entre estas dos posibilidades. Dado que el principio de incertidumbre implica la imposibilidad de clonación cuántica, la única alternativa posible de teletransporte supondrá un proceso en el que el individuo en la Tierra es destruido y un individuo idéntico es recreado en Andrómeda. Quizá la discusión anterior recordará al lector la distinción metafísica entre decir que dos cosas son idénticas o que ambas son la misma. La lógica cuántica no nos permite plantear este problema en su forma tradicional, puesto que, como hemos intentado explicar, la construcción de un clon implica necesariamente la destrucción del modelo, algo similar al viejo problema, tan querido de la filosofía analítica, del famoso barco de Teseo.

Pero ¿cómo diablos va a ser posible el teletransporte si en el fondo el principio de incertidumbre nos está diciendo que nunca podemos conocer lo que teletransportamos? Si logramos resolver este problema habremos dado con la clave de todo el asunto.

Consideremos primero el problema desde un punto de vista muy general. Si decidimos que es la función de onda cuántica la que describe físicamente el sistema y aceptamos al mismo tiempo que dicha función de onda nunca puede ser conocida exactamente por métodos observacionales, nos encontramos ante la aparición de una fisura entre lo que decimos que las cosas son y lo que nosotros como observadores podemos conocer acerca de ellas. Frente a esta dificultad filosófica, la solución más conservadora consistirá en interpretar la función de onda cuántica como un constructo matemático que nos permite, mediante ciertos algoritmos, calcular las probabilidades de que al realizar ciertas operaciones de medida encontremos ciertos resultados; por ejemplo, la probabilidad de que al medir la posición de un electrón nos lo encontremos en un lugar concreto. Puestas así las cosas, lo más natural, aplicando la famosa navaja de Occam, sería olvidarnos de las misteriosas funciones de onda y limitarnos a una pura descripción de las probabilidades con la que nos encontraríamos –al medir una propiedad física– un cierto valor concreto. Si la cosa terminara aquí, la mecánica

cuántica no sería una verdadera revolución científica, sino una descripción estadística del mundo real, y en este sentido más imprecisa que la que nos ofrece la física clásica newtoniana. Esta interpretación de la mecánica cuántica es la que se conoce como *interpretación de variables ocultas*, según la cual todo el misterio de la mecánica cuántica se reduce a la existencia de algún tipo de información sobre el mundo que nos ha pasado inadvertida y sobre la que de alguna manera hemos promediado, como cuando hacemos estadística clásica.

Aceptemos por un momento que las cosas fueran así. Supongamos ahora el caso de un sistema de dos electrones; uno de ellos lo colocamos en Andrómeda y el otro en la Tierra, es decir, suficientemente separados para que podamos considerarlos absolutamente independientes uno del otro. Si realizamos ahora operaciones de medición sobre estos electrones en la Tierra y en Andrómeda, y hemos supuesto que dichos electrones no interactúan en absoluto, lo que deberíamos esperar, pensando de una manera estadística ortodoxa, es que las probabilidades de los resultados de medición en Andrómeda y en la Tierra fueran del todo independientes. Igual que, en un sorteo de lotería, la probabilidad de que salga el 7 en el primer bombo no afecta en absoluto a la probabilidad de que salga el 7, el 3 o cualquier otro número en el segundo bombo o en el tercero. Pero lo que observaremos en el experimento con los electrones será algo completamente distinto. Comprobaremos que las probabilidades están correlacionadas, independientemente de cuán alejados estén los electrones entre sí. La correlación será tal que una operación de medida realizada en Andrómeda determinará unívocamente el resultado de la misma operación de medida realizada sobre el electrón que se encuentra en la Tierra. Ahora bien, este tipo de correlación sería del todo inimaginable si la mecánica cuántica fuera un simple promedio estadístico sobre alguna variable oculta. La correlación que estamos observando experimentalmente y que será el instrumento crucial para construir la máquina del teletransporte está escondida en las tripas de la función de onda cuántica que va a volver con fuerza a entrar en escena.

Si usted es un lector atento que ha llegado hasta aquí sin desfallecer, se hará ahora la misma pregunta que se hizo Albert Einstein, junto a B. Podolski y N. Rosen, allá por los años treinta, cuando estos autores trabajaban en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton en New Jersey. En 1905, el mismo año en que descubrió el fotón, Einstein había enunciado la teoría de la relatividad restringida. Dicha teoría nos dice, entre otras cosas, que la velocidad de la luz es la velocidad máxima a la que podemos enviar información de un lugar a otro. La correlación entre los resultados de las mediciones sobre nuestros electrones en la Tierra y en Andrómeda se da de manera simultánea, lo que a primera vista contradice el principio básico de la relatividad restringida de Einstein, puesto que la luz tardaría años en llegar de un punto al otro. ¿Qué pasa aquí? ¿Cuál de las dos teorías es falsa?

Una primera respuesta la tenemos ante nuestras mismas narices. La correlación no nos va a permitir transmitir información alguna, en un sentido paralelo a como las tripas de la función de onda, aunque determinantes de dicha correlación, nunca se pueden conocer exactamente por procedimientos observacionales. El círculo se cierra coherentemente. La información observacionalmente elusiva que contiene la función de onda se va a traducir en correlaciones, pero unas correlaciones que no sirven para mandar información de un lugar a otro. Einstein puede así quedarse un poco más tranquilo. La discusión anterior nos lleva de cabeza a lo que podría ser el eslogan publicitario del teletransporte: *hacer sin saber* o, en otras palabras, *correlación sin transmisión de información*. Esta será en el fondo la idea que llevará a Charles Bennett y sus colaboradores en IBM al diseño de la máquina capaz de realizar el teletransporte. En este punto conviene volver, aunque sea brevemente, a nuestra discusión sobre los clones. La información que necesitaríamos utilizar para construir un clon va a ser reemplazada por la correlación cuántica que acabamos de describir, y será precisamente la física de este tipo de correlaciones la que nos obligará a la destrucción del original en el proceso del teletransporte.

Para que el lector pueda jugar al mecano del teletransporte, me veré obligado a pedirle que realice a continuación algunos cálculos simples, que le servirán como un primer contacto con el formalismo de la mecánica cuántica. Veamos en primer lugar cómo describir el tipo de correlación a la que nos hemos referido antes. Las funciones de onda cuánticas que describen estas correlaciones se denominan *estados enmarañados*. En el caso del sorteo de lotería, la probabilidad de que salga el 3 en el primer bombo y el 7 en el segundo es el producto de las probabilidades respectivas. Como decíamos antes, este es un caso en el que no existe correlación alguna entre lo que pasa en un bombo y lo que pasa en el otro. La correlación, entonces, vendrá descrita por funciones de onda de un sistema de dos partículas que NO son el producto de las funciones de onda de cada partícula. Es este tipo de función de onda la que consideraremos *enmarañada*. Veamos cómo hacer esto para un sistema formado por dos cuerpos que llamaremos 1 y 2. Pensemos en un plano, por ejemplo una hoja de papel, y asociemos vectores del plano con las funciones de onda. Este simple modelito matemático nos puede servir para describir el enmarañamiento cuántico. Un estado enmarañado de los cuerpos 1 y 2 será, por ejemplo, aquel en que el estado del cuerpo 1, cualquiera que sea, es ortogonal al estado del cuerpo 2. Volviendo al plano, recuerde el lector que dos vectores son ortogonales si el ángulo que definen es un ángulo recto. La correlación descrita por el anterior estado es, como vemos, completamente independiente de nuestro potencial conocimiento de los estados de los cuerpos 1 y 2. Supongamos ahora que este estado describa la situación en la que tenemos nuestros dos electrones, uno en la Tierra y el otro en Andrómeda. Lo que sabemos es que cualquiera que sea el resultado de la operación de medición realizada sobre el cuerpo 1 en Andrómeda, dicho resultado

determinará lo que resulte de medir la misma propiedad en la Tierra sobre el cuerpo 2. Así tenemos ya una decripción de la extraña correlación cuántica.

Es probable que el lector poco acostumbrado a las lindezas de los tecnicismos matemáticos se haya quedado un poco frío con la descripción anterior y encuentre deseable una imagen más intuitiva de lo que pueda significar enmarañarse cuánticamente. Una imagen posible sería la siguiente: pensemos en las diferentes maneras en las que es posible que nos encontremos a un cuerpo en un instante dado. La famosa interferencia de las ondas mecanocuánticas, de las que hablábamos al principio, se va a traducir en que dichas posibilidades –para un solo cuerpo– se pueden sumar de una manera similar a como las ondas del estanque se superponen cuando se encuentran. Lo que nos encontramos ahora es con situaciones como la del famoso gato de Schrödinger, que estaba en un estado que es la suma de las dos posibilidades: estar muerto y estar vivo. El enmarañamiento surge cuando extendemos esta lógica cuántica de lo posible desde un cuerpo a dos cuerpos, lo que nos dará algo así como la existencia de posibilidades para los dos cuerpos que no se reducen a ser el simple «producto» de lo que es posible para un cuerpo por lo que es posible para otro. En este abismo abandono al lector para volver a nuestro teletransporte.

La idea de Bennett y sus colaboradores en IBM fue enmarañar el sistema físico que deseamos teletransportar mediante lo que vamos a diseñar como la máquina de teletransporte. Para diseñar esta máquina necesitaremos, de manera previa, realizar un pequeño cálculo que podremos hacer en el margen de esta revista. Dada una línea recta que asociaremos con el vector o estado v1, tracemos una recta ortogonal que llamaremos v2. Una vez hecho esto, dibujamos una recta ortogonal a v2 que llamaremos v3. Si todo ha ido como debe y no nos hemos equivocado en el dibujo, observaremos que v3 es idéntico a v1. Nuestro kit de teletransporte está ya preparado. Llamemos 1 al sistema que queremos teletransportar. Nuestra máquina va a consistir en un par de sistemas 2 y 3 enmarañados en una onda cuántica que describiremos así: «el estado del sistema 2 es ortogonal al estado del sistema 3». Si lo deseamos, podemos diseñar dicho estado de tal manera que el sistema 2 se dirija hacia el laboratorio, donde tenemos localizado al sistema 1, que deseamos teletransportar, mientras que el sistema 3 se dirige hacia un lugar distante, por ejemplo Andrómeda, que es a donde queremos teletransportar nuestro sistema original. La idea es ahora enmarañar el sistema 1, que deseamos teletransportar, con el sistema 2 de la máquina en un estado del tipo «el estado de 1 es ortogonal al estado de 2». Esta es la parte más difícil experimentalmente, pero es algo que podemos hacer utilizando los llamados polarizadores de Bell. Al final del proceso, lo que tenemos es que, sin saber cuál es el estado del sistema 1, lo que sí sabemos es que es ortogonal al estado del sistema 2, que a su vez es ortogonal al estado del sistema 3, de donde –recuerde el lector el ejercicio realizado al margen de la

revista– sabrá que el estado del sistema 1 que pretendemos teletransportar es idéntico al estado del sistema 3 que, como decíamos, habríamos podido mandar, si hubiéramos querido, a Andrómeda. El teletransporte ha finalizado. Tan sólo un detalle importante que nos devuelve a nuestra discusión sobre clonación. Al pasar por el polarizador de Bell, el estado original 1 se ha destruido, de tal manera que lo que aparece en Andrómeda sea una copia exacta de lo que queremos teletransportar, pero no un clon suyo.

Aunque el teletransporte ha concluido con éxito, no por ello se deje llevar el lector de la pasión y comience a sentir sudores fríos imaginando que se enmaraña con una mosca, como en la famosa película. Lo que se ha conseguido experimentalmente hasta ahora ha sido el teletransporte de un fotón, y por ahora estamos muy lejos de poder teletransportar objetos complejos. Aunque para algunos de los profetas del teletransporte, y de un primo suyo como es la computadora cuántica, los problemas para extender estos fenómenos a sistemas complejos son esencialmente tecnológicos, la verdad es que dichas dificultades son por el momento de tal calibre que no tenemos idea alguna de cómo superarlas. La dificultad se puede entender muy fácilmente. Los sistemas complejos o macroscópicos, como un lápiz, o una copa o usted mismo, son sistemas para los cuales las peculiaridades cuánticas de que hemos hablado están muy reducidas. Esto es lo que en física se conoce como *pérdida de coherencia cuántica*, que señala la frontera entre el mundo clásico y el mundo cuántico. A medida que un sistema se vuelve más complejo, los márgenes experimentales que tenemos para mantener el tipo de coherencia cuántica que necesitamos para llevar a cabo el teletransporte se hacen cada vez más estrechos; por ejemplo, los tiempos se vuelven más y más pequeños, hasta magnitudes que por ahora no son accesibles a nuestras capacidades experimentales. He mencionado de pasada otro tema de moda, cuyo fundamento es muy similar al del teletransporte: los computadores cuánticos. En este caso, la idea es usar un *hardware* típicamente cuántico. En tales condiciones, el computador, utilizando las correlaciones cuánticas, puede en principio realizar operaciones de manera mucho más eficiente que un computador clásico. De nuevo el mensaje es: *hacer sin saber*. El computador hará el cálculo, siempre y cuando no intentemos contemplar la manera en que lo hace.

Espero que la excursión anterior habrá permitido al lector vislumbrar, aunque sea de lejos, lo fascinante del mundo cuántico, y comenzar a apreciar la importancia de adentrarse en lo que en definitiva constituye una manera nueva de pensar lo real. El mundo deja de ser ese complejo engranaje que imaginaban los racionalistas del siglo XVII y del que Dios poseía un plano completo. Gracias a ello podemos en último extremo hacer sin saber, algo que angustiará a algunos pero liberará a otros, y que desde luego afecta al modo en que decidamos pensar esa difusa línea de separación (sobre la cual se construye la epistemología) entre pensamiento y mundo.

*

NOTA: He titulado esta nota «reseña para internautas» porque, en lugar de hacer referencia explícita a libros (lo que debería ser el caso en una revista de libros), remito al lector interesado a una serie de direcciones de Internet donde puede encontrarse material, a nivel de divulgación, sobre los avatares tanto teóricos como experimentales del teletransporte cuántico.

Direcciones de Internet:

http://www.uibk.ac.at/c/c7/c704/ qinet
http://info.uibk.ac.at/c/c7/c704/qo/
http://info.uibk.ac.at/c/c7/c704/qo/photon/tele port/index.html
http://www.halcyon.com/dyar/starfleet/ starfleet.html
http://www.research.ibm.como/quantuminfo/teleportation/