

PRINCIPIOS DE TELEPORTACIÓN CUÁNTICA

LEONEL PINEDA

*Facultad de Estudios Superiores Cuautitlan, Universidad Nacional Autónoma de México
San Sebastián Xhala, Cuautitlan Izcalli, 54714 Estado de México, México
E-mail: lexleo1000@yahoo.com.mx, lexleo1000@comunidad.unam.mx*

Resumen. La teleportación es una tecnología cuántica única que transfiere un estado cuántico a una localización arbitrariamente alejada usando un estado de entrelazamiento cuántico distribuido y la transmisión de cierta información clásica. En el presente artículo se dará un bosquejo general al entrelazamiento cuántico, fundamental para la teleportación cuántica y también se propondrá un protocolo de comunicación.

Descriptores: Teleportación Cuántica, Entrelazamiento Cuántico, Mecánica Cuántica.

Abstract. The quantum teleportation is a unique technology that transfers a quantum state to a remote location using an arbitrary state of distributed quantum entanglement and some classical information transmission. In this article we give a general outline to quantum entanglement, which is essential for quantum teleportation and also will propose a communication protocol.

Key words: Quantum teleportation, Quantum entanglement, Quantum mechanics.

PACS: 03.67.-a; 03.65.-w

1. INTRODUCCIÓN

En el comienzo del siglo XX, se descubrió que el comportamiento de partículas muy pequeñas, tales como electrones, los núcleos de los átomos y moléculas, no pueden ser descritos por la mecánica clásica, la cual describe de una manera satisfactoria el mundo macroscópico en que se “acepta” que vivimos, según claro está desde nuestro punto de vista. Esta nueva física (mecánica cuántica) provocó una verdadera revolución en la forma en cómo se pensaba que se comportaba la naturaleza, provocando que inclusive hoy, cuando ha pasado más de una década del siglo XXI, aun no se tenga una idea universal y claramente concisa por parte de los profesionales de la física, que nos explique porque se comporta de este modo la naturaleza [1].

A pesar de las numerosas aplicaciones que se han derivado de la teoría, iniciando verdaderas revoluciones en otras ciencias diferentes de la física, tales como la química o la biología, las cuales no podrían ni imaginar sus avances sin la aplicación directa o indirecta de esta teoría física.

La mecánica cuántica proporciona “reglas” básicas de por ejemplo; como se unían los átomos y de cómo se podían mejorar estas uniones. Esta simple, aunque revolucionaria idea es la clave del vertiginoso avance que tuvo la química en el siglo XX. Esto a su vez tendrá en este siglo algo parecido en la biología, provocando avances inclusive difíciles de pronosticar por los mismos biólogos.

La mecánica cuántica se diferencia de la mecánica clásica principalmente porque en la cuántica no se puede predecir el resultado de la medición de una cantidad física, solo se puede “hablar” de la probabilidad de obtener un determinado valor. Esta “simple” diferencia es la verdadera dificultad a la hora de abordar la descripción de sistemas atómicos o subatómicos tales como núcleos y partículas elementales, la razón es muy simple. Los seres humanos al igual que los animales hemos desarrollado formas intuitivas de ver el mundo físico, que sin embargo en la cuántica de poco o nada sirven, por lo tanto probablemente la solución para “entender” la mecánica cuántica resida en ver lo “intuitivo” del mundo subatómico. Esta propuesta podría requerir eventualmente, el desarrollo de una teoría completamente nueva.

2. ANTECEDENTES

Tal vez el título de este trabajo podría parecer casi esotérico; seguramente le recordó la famosísima serie de televisión “Star Trek” que forjó varias generaciones en todo el mundo. En esa serie el intrépido Capitán Kirk se “teletransportaba” con solo tocar su hombro izquierdo con la mano derecha. Probablemente Charles Bennet, Gilles Brassard, Claude Crépeau, Richard Jozza, Asher Peres y William K. Wootters [II] pensaron en ello, cuando bautizaron “Teleportation” al fenómeno que reportaron en 1993.

2.2 Descripción del fenómeno

La idea básica de la teleportación, algunas veces llamada teletransportación (en este artículo se utilizará el primero), consiste en que un objeto en el lugar A al tiempo t se “desmaterializa” y luego reaparece en un lugar distante B al tiempo $t+T$. En el caso de teleportación cuántica implica que queremos hacer lo mismo con un objeto cuántico.

La teleportación cuántica es la acción de teletransportar el estado cuántico de un objeto. Es decir el estado de una partícula A que se teletransportara al estado cuántico de otra partícula B. Sin embargo existe un hecho clave que nos permite hablar realmente de teleportación: las partículas elementales que pueblan el universo son indistinguibles entre sí (es decir un electrón en el estado tal en un átomo de hidrógeno es indistinguible-excepto por la posición espacial- de otro electrón en el mismo estado cuántico de otro átomo de hidrógeno, por ejemplo). Y aquí es donde entramos en la parte filosófica del asunto: lo que define que usted sea usted (y que piense lo que justamente está pensando en este momento) es el estado cuántico de todas las partículas elementales de los átomos que lo integran; si pudiéramos transmitir toda esa información a otro conjunto igual de átomos en algún otro lugar, entonces usted sería efectivamente teletransportado, solo que tendríamos que enfrentar un problema que aun no hemos comentado: Para teletransportar una partícula hay que destruirla en el proceso (para leer su estado cuántico). Es decir que para teletransportar a un ser humano tendríamos que destruir el original, para de esta manera conocer el estado cuántico de las partículas que lo integran. Entonces para realizar una teleportación cuántica necesitamos [III]:

- Obtener todas las propiedades del objeto que se desea teletransportar-destruyéndolo en el proceso-
- Mandar la información obtenida en forma de información clásica, al sitio de destino, donde finalmente se recrea otro objeto con exactamente las mismas propiedades.

En este artículo se realizará un protocolo de teleportación real, es decir un caso “ideal” donde las influencias del medio ambiente no afecten al experimento, como ejemplos de estos problemas “reales”, está el principio de incertidumbre el cual impide saber realmente donde se encuentra todas las propiedades del objeto en un momento determinado, además de un sin número de problemas técnicos (ruido de los instrumentos de medición).

3. DESARROLLO

Los sistemas cuánticos, a diferencia de los clásicos, pueden superponerse. Logrando estar en una superposición de varios estados al mismo tiempo y por lo tanto permiten la existencia de estados entrelazados. Una medición sobre dicho sistema cuántico lo proyecta hacia uno solo de esos estados (postulado de proyección).

3.1 Protocolo de Teleportación

Imaginemos que tenemos a dos jóvenes enamorados llamados Diana y Justin que se encuentran bien lejos el uno del otro, también tenemos una fuente emisora de pares de electrones (qubits) de dos niveles [IV], que tienen espín $\frac{1}{2}$ con entrelazamiento máximo. El estado del sistema integrado del par de electrones, es:

$$|\Psi_{DJ}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0_D\rangle|0_J\rangle + |1_D\rangle|1_J\rangle) \quad (1)$$

Donde el índice “D” es el qubit para Diana y los otros son para Justin, debido a que es un estado entrelazado no puede ser expresado como productos de los estados individuales que lo conforman y es diferente de una mezcla estadística.

$$\frac{1}{2}(|00\rangle\langle 00| + |11\rangle\langle 11|) \quad (2)$$

Que es el estado más correlacionado para este sistema, permitido por la física clásica. Ahora a Diana “le cae” otro qubit en un estado desconocido por ella, supongamos que ese qubit se lo quiere regalar a su novio Justin, ese qubit desconocido se denotará como:

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad (3)$$

Donde α y β son números complejos arbitrarios, Si este estado no fuera desconocido por Diana, la teleportación sería trivial, ya que si ella conociera $|\psi\rangle$

bastaría con que le llamara por teléfono a Justin y se lo describiera para que el pudiera recrearlo y completar así la teleportación. Pero ya que ella no lo conoce, no puede medirlo para obtener toda la información necesaria para decirlo a Justin como recrearlo. La alternativa que le queda es utilizar las propiedades del estado cuántico del primer qubit que tenía y que se encuentra entrelazado con el que tiene Justin. Por lo que el estado global de los tres qubits será:

$$\begin{aligned}
 |\chi\rangle &= |\psi\rangle \otimes |\Psi_{DJ}\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \otimes \left(\frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}} \right) \\
 &= \frac{\alpha(|000\rangle + |011\rangle) + \beta(|100\rangle + |111\rangle)}{\sqrt{2}} \quad (4) \\
 &= \frac{1}{2} \left[|\Phi^+\rangle(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) + |\Phi^-\rangle(\alpha|0\rangle - \beta|1\rangle) + \right. \\
 &\quad \left. |\Psi^+\rangle(\alpha|1\rangle + \beta|0\rangle) + |\Psi^-\rangle(\alpha|1\rangle - \beta|0\rangle) \right]
 \end{aligned}$$

Donde:

$$\begin{aligned}
 |\Phi^+\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) \\
 |\Phi^-\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle - |11\rangle) \\
 |\Psi^+\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle + |10\rangle) \\
 |\Psi^-\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle - |10\rangle) \quad (5)
 \end{aligned}$$

Los cuales forman una base ortonormal de los dos qubits de Diana, los estados de la ecuación (5), son los estados de Bell [V], con una base diferente a la habitual, ya que se usa la expresión (4) como esta última.

Ahora es posible ver el alto grado de correlación entre los qubits de Diana y Justin (se encuentran cuánticamente entrelazados), ya que ahora cada estado de los qubits de Diana, le corresponde un estado del qubit de Justin.

Por lo tanto recopilando:

1.- Justin y Diana comparten un par de qubits entrelazados. Cuando Diana recibe el qubit a teleportar en el estado desconocido $|\psi\rangle$, le practica mediciones proyectivas en la base de Bell sobre sus dos qubits. Esto significa que obtendrá al azar uno de los cuatro estados de Bell, con igual probabilidad

2.- Ahora si Diana recibe el estado $|\Psi^+\rangle$. Ahora el estado conjunto de los tres qubits (los dos de Diana y uno de Justin) es:

$$|\Phi_{DJ}\rangle = |\Psi^+\rangle(\alpha|1\rangle + \beta|0\rangle) \quad (6)$$

Diana le comunica a Justin el resultado de sus mediciones (por medio de tweet, por ejemplo). Este mensaje tiene como finalidad informarle a Justin en que se diferencia el estado de su qubit con el que Diana tenía antes.

3.- Ahora Justin sabe que hacer exactamente para completar la teleportación. Tiene que aplicarle una transformación unitaria a su qubit (operación U_{NOT}) medido por Diana [VI].

$$\begin{aligned} U_{NOT}|0\rangle &= \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = |1\rangle \\ U_{NOT}|1\rangle &= \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = |0\rangle \end{aligned} \quad (7)$$

Por lo que finalmente el estado del qubit de Justin será $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, que es precisamente el estado $|\psi\rangle$ que Diana quería enviar teleportar hacia donde él estaba.

Todas las operaciones hechas por Diana y Justin son de naturaleza local, es decir que no se realizó una medición sobre los tres qubits al mismo tiempo, por lo que se puede decir que este protocolo aquí escrito es una auténtica tele portación. Aquí es conveniente realizar algunas observaciones importantes.

- Las operaciones hechas por Justin, son independientes del estado que Diana trata de teletransportarle.
- La comunicación clásica entre Justin y Diana es **imprescindible**, si no fuera necesaria significaría que Diana podría mandarle a Justin la información más rápido que la velocidad de la luz.

Por lo que se puede concluir que la que información que tenía originalmente Diana es completamente destruida, ya que como se puede ver ahora esa información es ahora un par de qubits en un estado máximamente entrelazado de la forma:

$$\frac{1}{2}(|0\rangle\langle 0| + |1\rangle\langle 1|) \quad (8)$$

Esto último es debido al teorema de no clonación. Por supuesto que el estado descrito por la ecuación (1) también es destruido, lo que implica que ya no hay correlación entre las partículas de Diana y Justin, ya no hay estados entrelazados. Para que Diana y Justin vuelvan realizar otra teleportación, necesariamente tendrán que compartir otro par de partículas entrelazadas.

4. TELEPORTACIÓN DE UN SER HUMANO ¿ES POSIBLE?

Una primera consecuencia de la existencia de estados entrelazados está relacionada con la cantidad de información necesaria para caracterizar un estado. En un sistema clásico, el número de parámetros necesarios para caracterizar un estado (sus grados de libertad) es igual a la suma de los grados de libertad de cada una de sus partes. En un sistema cuántico, el número de grados de libertad crece exponencialmente con el número de constituyentes.

Esto representa un problema a la hora de intentar teleportar un sistema de muchas partículas, tal como un ser humano. Por ejemplo, en un sistema formado por solo 40 espines $s = 1/2$, el espacio de estados puros estaría formado por $2^{40} = 1,1 \times 10^{12}$ estados. Un vector arbitrario en ese espacio queda definido entonces por $1,1 \times 10^{12}$ coeficientes complejos, que en representación de coma flotante a simple precisión representan $1,1 \times 10^{12} \times (2) \times (4 \text{ bytes}) = 8,8 \text{ TBytes}$, el almacenamiento de un tal estado supera ampliamente la capacidad de los discos rígidos actuales (típicamente, del orden del TByte).

El espacio completo de estados mezcla requiere además almacenar 240 de estos estados, con sus respectivos pesos, esto es, $1,1 \times 10^{12} \times 8,8 \text{ TB} \approx 9,68 \text{ Ybit}$. Si apiláramos los discos rígidos (de 8 TBytes) necesarios para almacenar esta información, formaríamos una columna de casi 40 veces la distancia Tierra-Luna [VII]. Esto nos demuestra que aunque “teóricamente” es posible realizar la teleportación de un sistema de muchas partículas como un ser humano, “tecnológicamente” hablando la humanidad está aún muy lejos de lograrlo.

Otro tipo de problemas son de índole filosófico. Por ejemplo, si una máquina hipotética teleportará a un sujeto X, dicho sujeto tendría que ser destruido en el proceso, tal y como se ha mostrado en este artículo. ¿Cómo saber si la persona que va a salir del otro lado de la máquina, es el mismo sujeto que entro a la máquina? Cuánticamente lo es, pero como es posible si dicho sujeto fue destruido en el proceso de la teleportación. Si usted fuera la persona a teleportar ¿Se metería a esa máquina? interesante no.

5. CONCLUSIONES

En el presente artículo se propuso un protocolo de comunicación para realizar teleportación cuántica el cual expone claramente la naturaleza del fenómeno y su posible alcance. Sin embargo cabe recalcar que aun hace falta mucha investigación en esta área, especialmente cuando se trata de teleportación de por ejemplo; muchos átomos, tal como un ser humano. Esto además del problema filosófico que hay intrínsecamente en este proceso.

Agradecimientos

LP agradece al prof Zbigniew Oziewicz (FESC, UNAM) por las aclaraciones sobre distintos aspectos del entrelazamiento y de la mecánica cuántica en general.

REFERENCIAS

- [I] J. Morones, Los misterios del mundo cuántico, Ingenierías. 8 (2005), 26
- [II] C.H. Bennett, G. Brassard, C. Crépeau, R. Jozsa, A. Peres and W.K. Wootters, Phys. Rev. Lett. 70 (1993) 1895
- [III] R.C. Burgos, Viabilidad de la teletransportación cuántica, B.Sc. thesis, UNAM, 2005.
- [IV] M. B. Plenio and V. Vedral, Vlatko, Contemporary Physics 39 (1998) 6
- [V] J. S. Bell, Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics (Cambridge University Press 1987)
- [VI] D. McMahon, Quantum Computing Explained (John Wiley & Sons, Inc 2008), pp. 176-177
- [VII] J. M. Matera, Entrelazamiento cuántico en sistemas de muchos cuerpos, Ph.D. thesis, Universidad Nacional La Plata, 2011.