Journal de Ciencia e Ingeniería, vol.16, no.1, pp.5-12, 2024
http://jci.uniautonoma.edu.co
DOI: https://doi.org/10.46571/JCI.2024.1.2

Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
ISSN 2145-2628, e-ISSN 2539-066X
Mecánica Cuántica

Más de un tipo de entrelazamiento en el mundo cuántico y ninguno en el mundo clásico

More than one type of entanglement in the quantum world and none in the classical world

J.D. Bulnes[+1] **M.A.I. Travassos**[+2] **H.E. Caicedo-Ortiz**[*3] **y J. López-Bonilla**[**4]
[+]**Dep. Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal do Amapá, Macapá, 68903-419, AP, Brasil**
[*]**Facultad de Ingeniería, Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, Popayán, Colombia**
[*]**Instituto de Educación Media Superior de la Ciudad de México, Ciudad de México, México**
[**]**ESIME-Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México**

Resumen. En este artículo destacamos algunos aspectos relacionados con la dificultad encontrada al intentar identificar el entrelazamiento físico en sistemas cuánticos. Ofrecemos algunos comentarios que pueden alertarnos a la hora de distinguir los aspectos puramente matemáticos del entrelazamiento de los aspectos físicos en los sistemas cuánticos del mundo real. Mostramos el caso de un tipo de entrelazamiento inusual recientemente identificado, así como un ejemplo del mismo, considerando un sistema compuesto por cuatro partículas, donde las diferencias con el caso habitual de entrelazamiento son evidentes. Finalmente, consideramos un ejemplo de cómo se desarrollaría el entrelazamiento clásico (si existiera) en el mundo descrito por la física clásica.

Palabras Claves. Entrelazamiento cuántico; Entrelazamiento no usual; Entrelazamiento espurio.

Abstract. In this article, we emphasize some aspects related to the difficulty encountered when identifying physical entanglement in quantum systems. We offer some comments that can alert us when it comes to distinguishing the purely mathematical aspects of entanglement from the physical aspects in real-world quantum systems. We show the case of an unusual type of entanglement, recently identified, as well as an example of this, considering a system composed of four particles, where the differences in relation to the usual case of entanglement are evident. Finally, we consider an example of how classical entanglement (if it existed) would develop in the world described by classical physics.

Keywords. Quantum entanglement; Unusual entanglement; Spurious entanglement.

[1] *e-mail: bulnes@unifap.br*
[2] *e-mail: angelicaptravass@gmail.com*
[3] *e-mail: hecaicedo@gmail.com*
[4] *e-mail: jlopezb@ipn.mx*

Como citar. J.D. Bulnes, M.A.I. Travassos, H.E. Caicedo-Ortiz y J. López-Bonilla, Más de un tipo de entrelazamiento en el mundo cuántico y ninguno en el mundo clásico. *Jou. Cie. Ing.*, vol. 16, no. 1, pp. 5-12, 2024. doi:10.46571/JCI.2024.1.2

Recibido: 11/01/2024 **Revisado:** 23/04/2024 **Aceptado:** 22/05/2024

1. Introducción

El *entrelazamiento cuántico*, que tiene el *status* de una propriedad sin equivalente físico en el mundo clásico (ver sección 3), corresponde a un tipo de correlación no clásica entre partículas cuánticas. El entrelazamiento, que aparece como resultado de: (i) la interacción entre partículas, o también (ii) cuando partículas nacen de un mismo proceso físico, se refiere a la situación cuando las partículas cuánticas ya no interactúan. Sin embargo, en el caso de que las partes interactúen entre sí, como sucede con los electrones en un átomo, o con los protones (vía, por ejemplo, sus *spins* dentro de una molécula), se debería escribir el estado total *como si las partes* no estuvieran en interacción[5].

En la información cuántica, así como en la computación cuántica [1], se ha incorporado la representación matemática de estados entrelazados cuanticamente en algunos algoritmos o protocolos y se ha determinado cuáles serían las consecuencias matemáticas que esta inclusión traería [2]; por lo que se considera que el entrelazamiento cuántico es un recurso computacional extraordinario.

De acuerdo con abundantes publicaciones, el entrelazamiento cuántico está siendo útil en los más diversos campos de la física y también está encontrando aplicaciones tecnológicas. Algunos ejemplos de ello son: la transmisión de datos a través de la atomósfera, por más de 140 kilometros, usando fotones entrelazados, [3]; el estudio de estados cuánticos de pares de *quarks top-antitop* dentro do formalismo de la cromodinámica cuántica [4]; la investigación sobre el surgimiento de un entrelazamiento cuántico a partir de la energia potencial gravitacional (“entrelazamiento gravitacional”) [5]; el análisis y cálculo de cantidades que permitirían medir el entrelazamiento del estado fundamental de un campo escalar masivo acoplado a la curvatura del espacio−tiempo [6], etc.

1.1. Un ejemplo para reforzar el conceito de separabilidad de una función

Asumamos la seguinte situación física: En un determinado instante inicial, $t = 0$, en una región del espacio vacío, dos partículas cuánticas, que no interactúan entre sí, se mueven libremente.

Por simplicidad, supongamos que sabemos que estas partículas nunca interactuaron en el pasado. En ese caso, considerando cada una de ellas como un subsistema de un sistema mayor (el conjunto de las dos partículas), podemos escribir el estado cuántico total como el producto de los estados cuánticas atribuídos, separadamente, a cada una de ellas en el instante $t = 0$; es decir,

$$\vartheta(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = \xi(\vec{r}_1)\ \chi(\vec{r}_2).$$

La función ϑ es *separable* en las variables $\vec{r}_1$ y $\vec{r}_2$. También se podría decir que ϑ es separable en las funciones ξ y χ, pero esta afirmación es menos significativa. Por un argumento de simplicidad, supongamos que los espacios de los estados cuánticos subyacentes, $\mathcal{H}_1$ y $\mathcal{H}_2$, tienen dimensión dos y que de cada uno de estos tomamos las bases $\Big\{\varphi_1(\vec{r}_1), \varphi_2(\vec{r}_1)\Big\}$ y $\Big\{\sigma_1(\vec{r}_2), \sigma_2(\vec{r}_2)\Big\}$, respectivamente. En ese caso, considerando la expansión de los estados ξ e χ, en las respectivas bases, escribimos:

$$\vartheta(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = \Big(a_1\varphi_1(\vec{r}_1) + a_2\varphi_2(\vec{r}_1)\Big)\Big(b_1\sigma_1(\vec{r}_2) + b_2\sigma_2(\vec{r}_2)\Big) =$$

[5] Debemos tener en consideracion que, por efecto de la interacción, los espacios de los estados individuales son, en general, *modificados* (lo que no sucede si no existe interacción).

$$\vartheta(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = c_1\varphi_1\sigma_1 + \Big(c_2\varphi_1\sigma_2 + c_3\varphi_2\sigma_1\Big) + c_4\varphi_2\sigma_2,$$

(com $c_1 = a_1b_1$, $c_2 = a_1b_2$, $c_3 = a_2b_1$ e $c_4 = a_2b_2$) la que *continúa* separable en las variables $\vec{r}_1$ y $\vec{r}_2$, pero que *no es separable* en las cuatro funciones: φ_1, φ_2, σ_1 y σ_2.

En el ejemplo anterior se ha reforzado algo conocido. Dada uma función de varias variables, lo que es relevante en relación a su separabilidad es la relativa a sus variables y no a las funciones en que se podría descomponer (un ejemplo con funciones "separables" se escribe como: $\varphi_1.\varphi_2.\sigma_1.\sigma_2$). Así, el hecho de que un sistema físico formado por dos partes que no interactúan, y que, por lo tanto, evolucionan una independientemente de la otra, debe expresarse matematicamente por una función total separable en sus variables.

1.2. No apenas entrelazamiento, sino "entrelazamiento matemático" o "entrelazamento físico"

El *entrelazamiento matemático* es el que surge en el modelo cuántico, o dicho de otro modo, es una propiedad del modelo, lo que no garantiza que deba manifestarse en el sector de la naturaleza observada. Si ocurriera que ese entrelazamiento no tiene correspondencia con algún aspecto o cualidad de un estado cuántico del sistema físico considerado, entones se trataría de un *entrelazamiento espúrio*. Sin embargo, si fuera posible colocar el entrelazamiento matemático en correspondencia con una cualidad de un estado de ese sistema, entonces se trataría de un *entrelazamiento físico*.

En los siguientes párrafos se entenderá la conveniencia de utilizar las denominaciones anteriores, para superar, al menos parcialmente, las dificultades que surgen cuando se intenta identificar y caracterizar el entrelazamiento cuántico.

Las referencias [7], [9], son muy interesantes. Se trata de un comentário a un artículo y la correspondiente respuesta, notándose en el contexto general de lo abordado una confusión común relacionada con el entrelazamiento cuántico, la que podemos aclarar. De un lado, Wójcik, refiriéndose a un reporte de Berkley *et al.*, [8], en el que se afirma que los resultados que ellos presentan proporcionan evidencias de la creación del entrelazamiento en un sistema de dos *q-bits* del tipo contactos Josephson acoplados, a través de la implementación de los estados de Bell, comenta lo siguiente[6]:

"... *El misterio del entrelazamiento se origina en la existencia de correlaciones entre dos sistemas fisicamente no acoplados. Se debe enfatizar, sin embargo, que aunque las correlaciones entre sistemas entrelazados sean generalmente llamadas no locales, es la pérdida del acoplamiento y no la separación espacial entre ellas la que debería ser considerada como la condición necesaria para que la noción de no localidad puede ser usada. En el experimento reportado, dos q-bits, del tipo contacto Josephson, están intensamente acoplados; así, lo que es realmente observado no es el entrelazamiento sino la mezcla de los estados inducidos por la interacción*".

De otro lado, Berkley, en su réplica [9], ofrece el siguiente comentário[7]:

"... *Creemos concordar de manera general con Wójcik en lo que se refiere a la esencia física involucrada en nuestro experimento y diferir, a lo más, en una cuestión de terminología. Nosotros hemos usado la definición común de entrelazamiento: Un estado entrelazado es un estado de un sistema compuesto que no puede ser escrito como um producto tensorial directo de los estados de los subsistemas individuales*".

La confusión a la que me refiero surge de una omisión: no haber establecido las diferencias entre los conceptos usados; por ello, parecería que Wójcik y Berkley están refiriéndose a un mismo asunto, cuando en realidad se refieren a asuntos *distintos*. Wójcik claramente se refiere a la ausencia de un entrelazamiento *físico* en el correspondiente sistema, mientras que Berkley sólo ofrece argumentos que podrían caracterizar a un entrelazamiento que es (únicamente) *matemático*.

[6] Traducción libre del original en inglés.

[7] Traducción libre del original en inglés.

La conexión entre *propiedades matemáticas* de un modelo y *propiedades físicas* de un sistema real se dá a través del establecimiento de ciertas *correspondencias* con significado físico, como fue ejemplificado y discutido en [10,11] dentro del contexto de las matrices pseudo puras extendidas 4 por 4. Así, en general, la posibilidad de escribir estados (matemáticos) con la forma entrelazada no implica, necesariamente, que se trate de un entrelazamiento físico (como propiedad de un sistema del mundo real) [10, 11].

2. Evidencia matemática a favor de más de un tipo de entrelazamiento cuántico

En la literatura dedicada a la teoria cuántica, tanto formal como aplicada, no se encuentra ningún teorema que garantice la imposibilidad de que más de un tipo de entrelazamiento matemático pueda ser compatible con esta teoría. Por esa razón, la búsqueda por tipos de entrelazamiento cuántico[8] que presenten, al menos, una característica distinta a las del caso usual, sería interesante, además de inesperada. En ese sentido, el resultado mostrado en [12] es al menos alentador.

En [12] se presenta una función que está entrelazada, pero su entrelazamiento no coincide con el usual. A diferencia del caso usual, que puede ser degradado o suprimido como resultado de la interacción del correspondiente sistema com su ambiente, en el caso visto en [12], inclusive en la total ausencia de un ambiente, el entrelazamiento progresivamente va desapareciendo por causa de la separación espacial entre las partes que constituyen el sistema entrelazado. Esa progresiva desaparición depende del cociente entre la distancia que separa las partículas en movimiento y la longitud de onda de Compton de las mismas. Una "función coeficiente", que depende del valor de ese cociente y que es parte de la función con entrelazamiento inusual, progresivamente va anulándose conforme llegamos al limite $|\vec{x}_1 - \vec{x}_2| \to \infty$, donde las variables $\vec{x}_1$ están asociadas con el subsistema 1 y las variables $\vec{x}_2$, con el subsistema 2. De esa manera, al anularse esa función coeficiente, toda la función (antes entrelazada) se anula.

Ese tipo de entrelazamiento parece adecuado para estudiar, al menos en principio, algún aspecto del "problema de la frontera cuántico−clásica", cuando se debe producir el colapso de una función entrelazada en las proximidades de la misma; colapso que debería ocurrir independientemente de que exista un ambiente físico.

Con base en lo comentando en los párrafos anteriores, queda claro que el espacio de soluciones de la ecuación de Schroedinger, para dos o más partículas cuánticas, no ha sido investigado completamente en lo que se refiera a los tipos de entrelazamiento cuántico que podrían manifestarse dentro del modelo cuántico.

Especificamente, en [12] fue considerada una función no separable ψ, con seis variables independientes[9], cuyo valor está dado por la expresión,

$$\Psi(\vec{x}_1, \vec{x}_2) = \sum_n C_n\Big(\frac{\vec{x}_1 - \vec{x}_2}{\lambda}\Big)\, \eta_n(\vec{x}_2)\, \xi_n(\vec{x}_1). \tag{1}$$

siendo $\Big\{\eta_n(\vec{x}_2)\Big\}$ y $\Big\{\xi_n(\vec{x}_1)\Big\}$ dos conjuntos de autofunciones de observables arbitrários (funciones ortogonales), λ una constante característica de las partículas envolvidas (en verdad $\lambda = \lambda_C$ es la longitud de onda de Compton de las partículas) y $C_n = C$ es la "función coeficiente" mencionada anteriormente.

[8] Ésta no está considerada, ni mucho menos, entre las líneas de investigación atentidas por la comunidad científica que trabaja en el campo de la información cuántica o en la mecánica cuántica.

[9] Las que, si fuese posible, estarían vinculadas, separadamente, a un sistema formado por dos partículas cuánticas en movimiento en el espacio 3-dimensional. Los argumentos y resultados presentados en [12] están enmarcados dentro del modelo cuántico, como un entrelazamiento matemático, no siendo éstos suficientes para afirmar que ese entrelazamiento inusual sería del tipo físico.

Fue mostrado en [12] que, para dos partículas libres con parâmetros de masas iguales a $m = h/c\lambda$ (con "c" la rapidez de la luz en el vacío y "h" la constante de Planck), y cuando los coeficientes $C_n((\vec{x}_1 - \vec{x}_2)/\lambda)$ se anulan en limite $|\vec{x}_1 - \vec{x}_2|/\lambda \to \infty$, entonces la función Ψ, dada en (1), satisface la ecuación de Schroedinger[10], sin dependencia temporal[11] ($\partial\Psi/\partial t = 0$):

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla_1^2\Psi(\vec{x}_1,\vec{x}_2) - \frac{\hbar^2}{2m}\nabla_2^2\Psi(\vec{x}_1,\vec{x}_2) = 0. \tag{2}$$

2.1. Entrelazamiento inusual y cuatro partículas libres

La versión física: Considere un proceso cuántico que produce cuatro partículas cuánticas entrelazadas que se alejan entre si. Supongamos, que un par de estas partículas se mueven para el "lado derecho" de una cierta dirección, dentro de un ángulo sólido pequeño. El otro par de partículas se mueva hacia el "lado izquierdo", también dentro de un ángulo sólido pequeño, en relación a la misma dirección. A partir de cierta distancia mínima entre las partículas, éstas se mueven libremente. Consistentemente con [12], podemos esperar una situación en la que los dos pares de partículas libres se separen entre sí lo suficiente de manera que ha desaparecido el entrelazamiento entre las cuatro partículas, pero el entrelazamiento en cada uno de los pares, separadamente, no ha desaperecido.

La versión matemática: Considere la ecuación de Schroedinger, para cuatro partículas libres de igual masa, sin dependencia temporal,

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla_1^2 - \frac{\hbar^2}{2m}\nabla_2^2 - \frac{\hbar^2}{2m}\nabla_3^2 - \frac{\hbar^2}{2m}\nabla_4^2\right)\Psi(\vec{x}_1,\vec{x}_2,\vec{x}_3,\vec{x}_4) = 0, \tag{3}$$

Vamos suponer que una solución de (3) se pueda escribir de forma separable para las variables de las partículas 1 e 2, juntamente (Ψ_{12}), y, separadamente, para las variables de las partículas 3 e 4, juntamente (Ψ_{34}). Entonces, podemos escribir:

$$\Psi(\vec{x}_1,\vec{x}_2,\vec{x}_3,\vec{x}_4) = \Psi_{12}(\vec{x}_1,\vec{x}_2)\ \Psi_{34}(\vec{x}_3,\vec{x}_4). \tag{4}$$

Entonces, sustituyendo (4) en (3), tenemos,

$$\begin{aligned}&\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla_1^2\Psi_{12}(\vec{x}_1,\vec{x}_2) - \frac{\hbar^2}{2m}\nabla_2^2\Psi_{12}(\vec{x}_1,\vec{x}_2)\right)\Psi_{34}(\vec{x}_3,\vec{x}_4) + \\ &+\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla_3^2\Psi_{34}(\vec{x}_3,\vec{x}_4) - \frac{\hbar^2}{2m}\nabla_4^2\Psi_{34}(\vec{x}_3,\vec{x}_4)\right)\Psi_{12}(\vec{x}_1,\vec{x}_2) \ = \ 0.\end{aligned} \tag{5}$$

De otro lado, considere las siguientes funciones:

$$\Psi_{12}(\vec{x}_1,\vec{x}_2) = \sum_{j=1} \mathcal{C}_j\Big(\frac{\vec{x}_1 - \vec{x}_2}{\lambda}\Big)\phi_j(\vec{x}_1)\psi_j(\vec{x}_2), \tag{6}$$

$$\Psi_{34}(\vec{x}_3,\vec{x}_4) = \sum_{s=1} \mathcal{Q}_s\Big(\frac{\vec{x}_3 - \vec{x}_4}{\lambda}\Big)\chi_s(\vec{x}_3)\eta_s(\vec{x}_4), \tag{7}$$

[10] La que recientemente fue deducida, de manera exacta, para el caso de una dimensión espacial, a partir de la ecuación de Hamilton-Jacobi, [13].

[11] Notar que aquí no corresponde usar la ecuación de Schroedinger estacionaria, porque, al llegar a la frontera cuántico-clásica, se producirá inevitablemente el colapso de la función entrelazada, lo que de ninguna manera correspondería a un contexto estacionario.

donde $\mathcal{C}_j$ y $\mathcal{Q}_s$ se anulan cuando $|\vec{x}_1 - \vec{x}_2|/\lambda \to \infty$ y $|\vec{x}_3 - \vec{x}_4|/\lambda \to \infty$, respectivamente. De acuerdo con [12], las funciones (6) y (7) son soluciones de las ecuaciones,

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla_1^2\Psi_{12}(\vec{x}_1,\vec{x}_2) - \frac{\hbar^2}{2m}\nabla_2^2\Psi_{12}(\vec{x}_1,\vec{x}_2) = 0, \tag{8}$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla_3^2\Psi_{34}(\vec{x}_3,\vec{x}_4) - \frac{\hbar^2}{2m}\nabla_4^2\Psi_{34}(\vec{x}_3,\vec{x}_4) = 0. \tag{9}$$

separadamente; así, el producto de (6) y (7) es una solución de (3), la que podría estar revelando una situación donde las cuatro partes comienzan entrelazadas, pero con su distanciamiento progresivo, e independientemente de la acción de elementos deteriorantes del entrelazamiento usual, tendríamos dos pares de partículas que, separadamente, permanecen entrelazadas (del tipo incomún), pero las cuatro partes ya no lo estarían.

La diferencia: Suponga que, antes que el entrelazamiento inusual entre las partículas 1 e 2 se haya perdido, se realiza una medición, de la energia (por ejemplo) sobre la partícula 1. En ese caso, la función de onda Ψ_{12} colapsará y el estado de la partícula 2 quedará bien definido, pero esa medición *no afectará* al estado Ψ_{34}, pues estos estados eran separables, de acuerdo con (4). Esto es muy diferente de lo que ocurriría con el entrelazamiento usual, por el cual, la medida sobre la partícula 1 produciría el colapso de la función de onda total para las cuatro partículas.

Ahora podrá apreciarse a qué nos referíamos, al inicio de la sección 2, cuando mencionamos otros tipos de entrelazamiento, que llamamos inusuales, que pueden presentar características o consecuencias distintas a las del entrelazamiento usual.

Finalizamos estas secciones enfatizando sobre la gran dificultad que se encuentra cuando se pretende entender cuál es el *significado físico* del entrelazamiento cuántico. Nada mejor que averiguarlo repasando la pregunta a un reconocido físico experimental que ha trabajado por mucho tiempo en este asunto. En una entrevista hecha al Professor Alain Aspect [14], al ser preguntado sobre cuál sería la natureza de la "comunicación" a distancia entre las partículas entrelazadas, él responde: "... *A única respuesta sólida está en las ecuaciones ...*"

3. No existe el entrelazamiento clásico

En las secciones anteriores hemos ofrecido algunas informaciones, que fueron breves y simplificadas, relacionadas con el entrelazamiento usual entre partículas cuánticas, así como en relación a un caso de entrelazamiento inusual. A continuación, proponemos la siguiente pregunta: ¿Cómo *se manifestaría* el entrelazamiento, en el caso de que fuese posible, en los objetos que obedecen las leyes de la física clásica? En esta sección respondemos a esta pregunta a través de elementos conceptuales.

Consideremos un objeto clásico, específicamente un cuerpo sólido, que se encuentra en reposo en cierto referencial inercial terrestre y aislado de su entorno. En tal caso, tanto el *momentum* lineal como el *momentum* angular iniciales son nulos y se conservan. Supongamos, además, que como consecuencia de la manifestación de un proceso interno (de cuyo origen y mecanismo no nos ocuparemos) dicho sólido explota y resulta dividido en dos partes. Previamente a esa división no hay manera de predecir cuál será la dirección de los vectores de *momentum* lineal de cada una de las partes, pues lo único que podemos conocer es la suma de dichos vectores. Luego de la división del objeto, los vectores de *momentum* lineal de las dos partes se mantendrán opuestos uno al otro y tendrán la misma magnitud mientras no se actúe sobre ninguna de las partes; es decir, mientras se mantengan aislados de su entorno.

De manera similar podemos referirnos a los correspondientes vectores de *momentum* angular. Ahora, supongamos que cuando esas partes están suficientemente alejadas: (i) intervenimos actuando sólo sobre una de las partes del sistema (así, éste no está más aislado), por ejemplo,

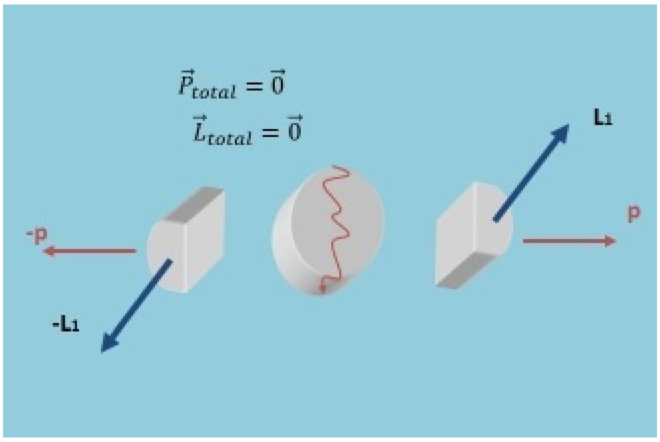

Figura 1: Un objeto clásico explota y se divide en dos partes que se alejan a lo largo de una dirección que no se puede anticipar. En la figura se asume que los vectores mostrados corresponden a los de *momentum* lineal (en color rojo) y angular (en color azúl) de cada una de las partes.

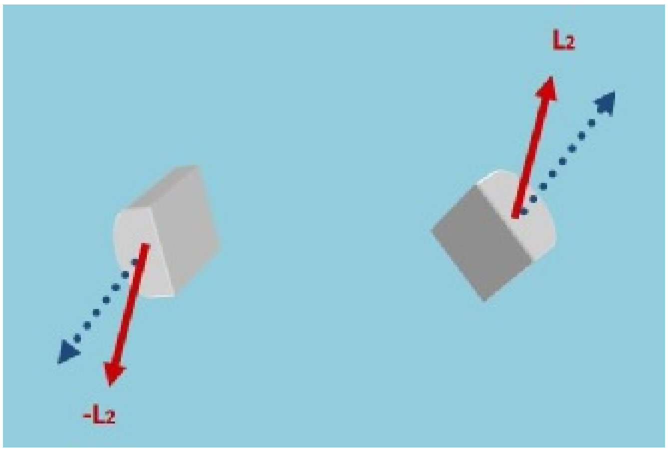

Figura 2: En esta figura vemos, a la derecha y en color rojo, la nueva dirección del vector de *momentum* angular, que resultó de una acción externa. El entrelazamiento clásico, *si existiese*, se manifestaría, de manera no local e instantánea, modificando la dirección del vector de *momentum* angular del pedazo que vuela a la izquierda hasta que quede opuesto a $\mathbf{L}_2$ del pedazo a la derecha.

sobre aquella que viaja a lo largo de (lo que llamaremos) la dirección $+Z$, y (*ii*) como consecuencia de esa actuación, modificamos la dirección de su *momentum* angular, sin cambiar su magnitud. Siendo así, podemos afirmar que la dirección del vector de *momentum* angular de la parte que viaja a lo largo de la dirección $-Z$ no puede cambiar sola para quedar opuesta a aquella (ahora modificada) que viaja en la otra dirección; pero si tal cambio fuese posible, y debería ser *instantáneo*, exigiría la participación de un mecanismo o propiedad que no tendría ninguna relación con la conservación del *momentum* angular o de cualquier otra cantidad física: esta propiedad *sería* el 'entrelazamiento clásico'.

En la Figura 1, se muestran, tanto la situación inicial (del cuerpo en reposo) y aquella que es inmediatamente posterior a su división en dos pedazos, juntamente con los vectores de *momentum* lineal y angular de cada una de las partes. En la Figura 2 se ha dibujado, sobre la derecha (con línea punteada y en color azúl), el vector de *momentum* angular inicial y el vector modificado (en color rojo) por la acción externa; al lado izquierdo, vemos la modificación imposible (que surgiría sin cualquier acción externa), pero que sería esperada *si existiese* el entrelazamiento clásico.

4. Conclusión

En este artículo hemos presentado algunas informaciones relativas al entrelazamiento cuántico entre partículas microscópicas y preferido un análisis conceptual, cualitativo y físico por sobre una presentación predominantemente matemática, la cual está muy presente en la literatura, particularmente dentro del área de la información cuántica. Hemos tratado de mostrar algunas de las dificultades que surgen cuando se busca identificar el entrelazamiento en los sistemas cuánticos y ofrecido discusiones que pueden ayudar a distinguir aspectos puramente matemáticos de los aspectos físicos y así entender un poco esta propiedad cuántica que está muy presente en las investigaciones contemporáneas. Hemos considerado el (supuesto) problema de cómo se revelaría el entrelazamiento clásico *si existiese* en el mundo físico macroscópico.

Referencias

[1] M. Nielsen, I. Chuang, *Quantum Information and Quantum Computation*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2001.
[2] P.W. Shor, "Polynomial-Time Algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer", *SIAM J. COMPUT*, 26(5), 1484-1509, October, 1997.
[3] R. Stone, "Entangled Secret Messages From Space", *Science*, 336(6089), 1632-1633, 29 June, 2012.
[4] Y. Afik, J. Muñoz de Nova, "Quantum information with top quarks in QCD", *Quantum*, 6, 820, 2022.
[5] A. Belhaj, S.E. Ennadifi, L. Jebli, "Probing quantum entanglement from quantum correction to newtonian potential energy", *Physica Scripta*, 99, 035217, 2024.
[6] A. Belfiglio, O. Luongo, S. Mancini, "Entanglement area law violation from field-curvature coupling", *Physics Letters B*, 848, 138398, 2024.
[7] A.Wójcik, *Science*, 301, 29 August, Letters (2003).
[8] A.J. Berkley *et al.*, "Entangled Macroscopic Quantum States in Two Superconducting Qubits", *Science*, 300(5625), 1548-1550, July (2003).
[9] A.J. Berkley *et al.*, *Science*, 301, 29 August, Letters (2003).
[10] J.D. Bulnes, L.A. Peche, "Entrelazamiento cuántico espurio con matrices seudopuras extendidas 4 por 4", *Revista Mexicana de Física*, 57(3), 188-192, 2011.
[11] J.D. Bulnes, F.A. Bonk, "A case of spurious quantum entanglement originated by a mathematical property with a non-physical parameter", *Lat. Am. J. Phys. Educ.*, 8(4), 4306.1-4306.4, 2014.
[12] J.D. Bulnes, "An unusual quantum entanglement consistent with Schrödinger's equation", *Global and Stochastic Analysis*, 9, 79-87, 2022.
[13] J.D. Bulnes, M.A.I. Travassos, D.A. Juraev, J. López-Bonilla, "From the Hamilton-Jacobi equation to the Schrödinger equation and vice versa, without additional terms and approximations", *Himalayan Physics*, 11, 21-27, 2024.
[14] L. Haddad, "Códigos secretos protegidos pelas leis da natureza. Entrevista com Alain Aspect", *Gazeta de Física*, 22(2), Junho, 1999.