

# Explorando el Entrelazamiento Cuántico entre Quarks

\*Jesús Manuel Sáenz Villela

Karen Yael Castrejón Parga

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

[jessaenz@uacj.mx](mailto:jessaenz@uacj.mx)

## Resumen

El artículo presenta las ideas principales del entrelazamiento cuántico, en especial en pares de quarks top-antitop producidos en las colisiones protón-protón del Gran Colisionador de Hadrones. Presenta también los principales conceptos del Modelo Estándar de la Física de Partículas, así como algunos detalles relacionados con nueva física y futuras aplicaciones relacionadas con el entrelazamiento cuántico.

## Introducción

¿Puede una partícula influir en otra de forma instantánea, incluso si están separadas por kilómetros? Aunque parece ciencia ficción, esto predice la mecánica cuántica, una de las teorías más exitosas.

Esta teoría describe el comportamiento de la materia a escalas muy pequeñas: incluso menores que los átomos, sus núcleos y las partículas subatómicas como electrones y protones. A escalas muy pequeñas, las leyes de la mecánica clásica, que explican cómo

se mueven los objetos macroscópicos, dejan de ser válidas. La mecánica cuántica describe las propiedades de las partículas:

- pueden estar en varios estados al mismo tiempo (*superposición*), como si una moneda pudiera estar en cara y cruz al mismo tiempo;
- no se puede saber exactamente dónde está una partícula y qué tan rápido se mueve al mismo tiempo (*incertidumbre*);

- pueden comportarse como partículas o como ondas.

Una de sus propiedades más enigmáticas es el *entrelazamiento cuántico*, una conexión especial entre partículas que puede persistir incluso a distancia: cuando dos partículas están entrelazadas, el estado de una de ellas no puede definirse de forma independiente de la otra. Lo que le ocurra a una afecta inmediatamente cómo se comporta la otra, aunque estén separadas [1], [2].

Estas propiedades son fundamentales en la física cuántica. Siguen siendo objeto de discusión, ya que plantean preguntas aun sin respuesta sobre la naturaleza de la realidad, la información y la medición.

El estudio de átomos y electrones a nivel cuántico ha permitido el desarrollo de parte de la tecnología moderna. Por ejemplo, el transistor, el componente básico de los chips en computadoras y teléfonos, se basa en el comportamiento de los electrones en los materiales, ya que se pueden controlar para encender y apagar señales eléctricas. El láser usado en comunicaciones, medicina y almacenamiento de datos funciona debido a que cuando los electrones bajan de estado de energía, liberan luz controladamente.

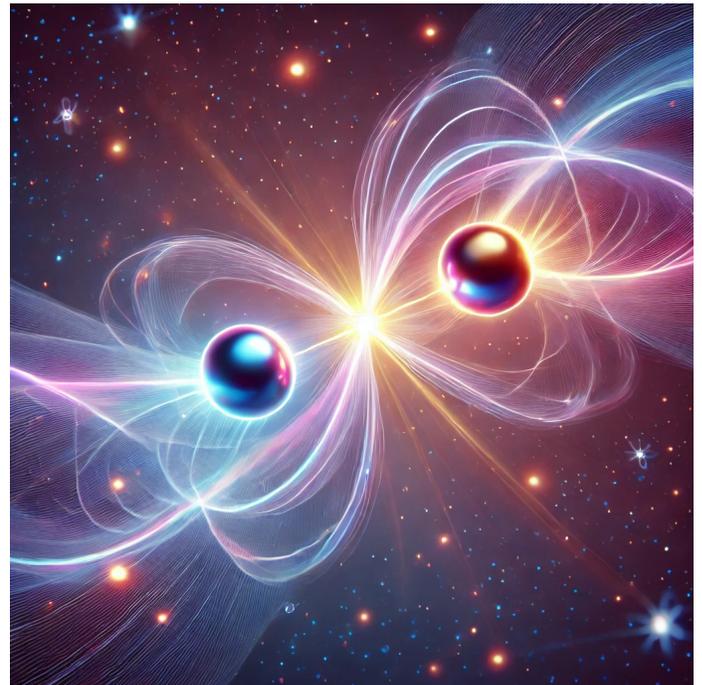
La mecánica cuántica ha permitido la computación cuántica [3], una tecnología emergente que usa la superposición y el entrelazamiento para procesar información, permitiendo resolver problemas, como simulaciones moleculares o ciertos cálculos matemáticos, significativamente más rápidamente que las computadoras actuales porque permite realizar cálculos en paralelo, acelerando el proceso. Sin embargo, la computación cuántica aun está en etapa experimental: los prototipos funcionan en laboratorios, no habiendo aplicaciones comerciales.

Otras aplicaciones del entrelazamiento son en las mediciones de alta precisión y la criptografía cuántica, que permitiría el intercambio seguro de claves, ya que

al interceptar la información se alteraría el sistema, detectado de esta manera al espía [4].

El entrelazamiento no tiene una contraparte en la física clásica. Por ejemplo, si dos personas lanzan monedas, cada persona tiene un 50% de probabilidades de obtener cara o cruz, sin que el resultado de una moneda afecte al resultado de la otra. Si representáramos una moneda entrelazada con otra, sería como si supiéramos automáticamente que, si una es cara, la otra es cruz, y esto sucedería incluso si están separadas por kilómetros [5]. Sin embargo, no es que la medición en un sistema afecte al otro, sino que hay una correlación instantánea entre ambos resultados, sin que haya señales que viajen entre los sistemas. La Figura 1 muestra una representación de entrelazamiento.

La materia está formada por átomos, que a su vez tienen núcleos formados por protones y neutrones, con electrones girando alrededor. Sin embargo, los protones y neutrones tienen estructura



**Figura 1.** Representación del entrelazamiento entre dos partículas generada con DALL-E, una herramienta desarrollada por OpenAI que genera imágenes a partir de descripciones escritas. La figura no debe interpretarse literalmente.

interna, es decir, están formados por partículas aún más pequeñas llamadas *quarks*. Hay seis *sabores* de quarks, llamados *arriba*, *abajo*, *encanto*, *extraño*, *cima* y *fondo*. Estos nombres fueron elegidos para distinguir las propiedades de los quarks como su masa y carga eléctrica y la manera como interactúan entre sí. Los quarks arriba y abajo forman los protones y neutrones, mientras que los otros sabores aparecen en condiciones de alta energía, como en los colisionadores de partículas.

En el Gran Colisionador de Hadrones (LHC), se hacen colisionar protones a altas energías. De las colisiones surgen otras partículas, que son detectadas con aparatos que registran por dónde salieron y cuánta energía llevaban [4]. Uno de los posibles productos de las colisiones son los de quarks cima [2]

En 2023 se dio a conocer el grado de entrelazamiento cuántico entre los pares de quarks cima producidos en las colisiones protón-protón

par y al alejarse mutuamente, cada quark genera pares y partículas a partir de otras [3], [6].

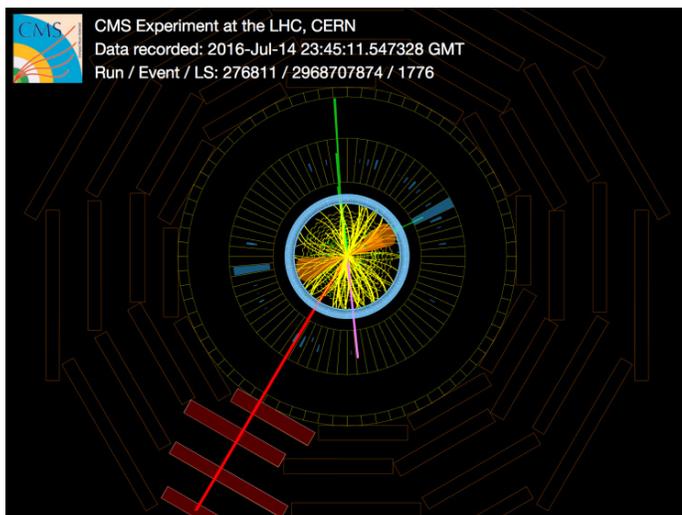
En el LHC se midió la dirección en la que salen las partículas tras la colisión [4]. Esta dirección está relacionada con el entrelazamiento del par de quarks, concretamente con su *spin*, una propiedad cuántica que se comporta como si la partícula girara, aunque no lo hace literalmente. Los resultados observados no se explican si las partículas no estuvieran conectadas cuánticamente [1], [7]. En la Figura 2 se muestra un ejemplo genérico de la producción.

Los resultados de 2023 y 2024 permiten estudiar el entrelazamiento cuántico entre partículas y el comportamiento de los sistemas cuánticos. Además, sugieren que los aceleradores pueden desempeñar un papel crucial en el desarrollo de tecnologías como la computación cuántica [2], [4].

### ¿Qué son los Quarks?

El Modelo Estándar resume la estructura y comportamiento de la materia a nivel fundamental [9]. Existen cuatro interacciones fundamentales: la *gravitacional*; la *interacción fuerte* entre quarks; la *interacción débil* responsable del decaimiento radiactivo; y la *electromagnética*, que es la interacción entre cargas eléctricas. La clasificación de las partículas se muestra en la Figura 3.

En la Figura 3 se observan los *quarks* y los *leptones*, y las partículas mediadoras de fuerza, conocidas como *bosones*. Existen tres generaciones, tanto de leptones como de quarks. Entre los leptones se encuentran el electrón, al muón y al tau (partículas con la misma carga del electrón, pero más pesadas y que decaen muy rápidamente), junto con sus respectivos neutrinos. Los bosones son las partículas que se intercambian en las interacciones: el *fotón* en la electromagnética; los bosones W y Z en la débil; y los *gluones* en la fuerte. A estas escalas, la gravedad entre las partículas es despreciable.



**Figura 2.** Colisión en el experimento CMS del LHC. La línea roja indica un muón, la verde un electrón y la línea morada representa la energía perdida. El par de quarks cima está señalado por los conos naranjas, que representan los conjuntos de partículas que resultan de sus decaimientos. Imagen tomada de [8].

2015 y 2018 [1]. El par de quarks consiste en un quark cima y su correspondiente *antiquark*, que es la antipartícula del quark, teniendo la misma masa, pero carga eléctrica opuesta. Una vez producido el

## Modelo estándar de física de partículas

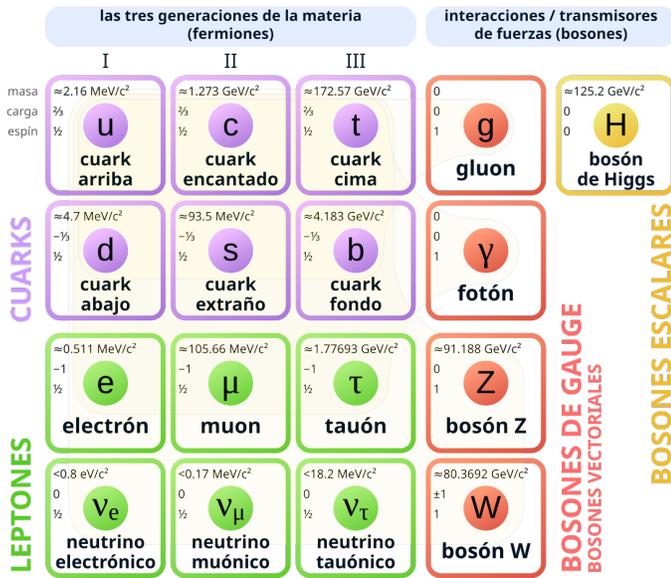


Figura 3. El Modelo estándar. Tomada de [10].

Cada partícula tiene nombre y se indica su masa en múltiplos de unidades de energía en electronvolts (eV) divididos entre la rapidez de la luz al cuadrado. Estas masas se expresan en  $\text{GeV}/c^2$ , donde el prefijo giga significa  $10^9$ , debido a la equivalencia entre masa y energía.

Las partículas pueden tener carga eléctrica y spin. El spin de todos los leptones y quarks es de  $\frac{1}{2}$ , por lo que se clasifican como *fermiones*. Por otro lado, el spin de los bosones es entero: 1 para los bosones mediadores y 0 para el Higgs.

Como mencionamos, los átomos tienen un núcleo (formado por protones y neutrones, ver Figura 4). Los protones están formados por dos quarks arriba y un quark abajo y los neutrones están compuestos por dos quarks abajo y uno arriba, Figura 5. Los quarks forman los *hadrones*. Un *barión* está formado por tres quarks, como el protón y el neutrón.

La interacción entre quarks se debe a tres cargas análogas a la carga eléctrica, llamadas *cargas de color*. Cada quark tiene alguno de los “colores” rojo, verde y azul. Estas cargas de color son propiedades cuánticas

de los quarks y no tienen relación con el concepto familiar de color, pero la analogía es útil, ya que los quarks se combinan en hadrones neutros de color.

El quark cima es tan masivo que decae muy rápidamente, por lo que no se hadroniza [1], [4]. Esta propiedad es la que lo hace especialmente útil en el estudio del entrelazamiento.

## Fundamentos del Entrelazamiento Cuántico

El entrelazamiento cuántico está relacionado con el trabajo de Albert Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen [13], en el que cuestionaron si la mecánica cuántica era una teoría completa. En este trabajo se argumenta que la descripción del estado un sistema cuántico no era suficiente para describir la realidad de manera objetiva y local. El artículo planteó que, si la mecánica cuántica fuera completa, al medir una cantidad física en un sistema entrelazado, se debería poder predecir con certeza

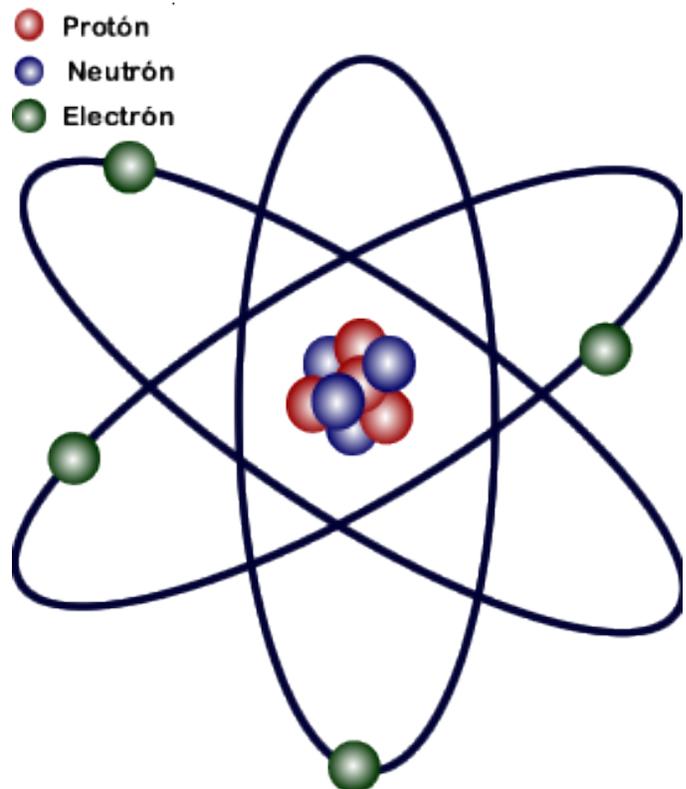


Figura 4. Modelo del átomo. Tomada de [11].

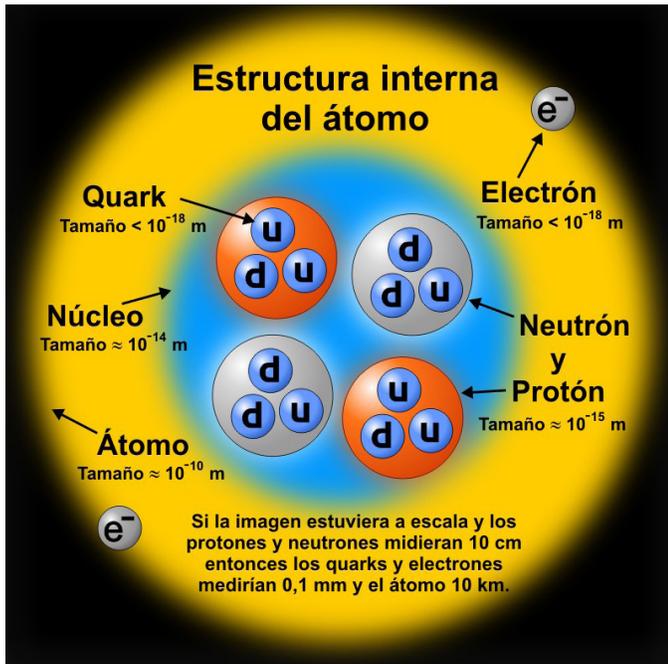


Figura 5. Estructura del núcleo. Tomada de [12].

una cantidad correspondiente en el otro sistema, sin afectar su estado de manera instantánea a distancia. Sin embargo, la mecánica cuántica predice que las partículas entrelazadas mantienen correlaciones no locales. Por esto, los autores propusieron que debiera existir información desconocida en el sistema, conocida como *variables ocultas*, es decir, factores desconocidos que podrían explicar el comportamiento de las partículas sin recurrir a efectos cuánticos. Esta es la paradoja de Einstein, Podolsky y Rosen (EPR).

La analogía del entrelazamiento cuántico donde el resultado de una moneda afecta inmediatamente el resultado de la otra, implicaría que la información entre los sistemas tendría que viajar incluso más rápido que la luz [5]. Aunque Einstein no usó este ejemplo con monedas, originalmente se refirió a esto como una “espantosa acción a distancia”, expresado en una carta dirigida a Born en 1947.

En 1964, Bell demostró [14] cómo las predicciones de la mecánica cuántica pueden violar ciertas desigualdades matemáticas, conocidas como

desigualdades de Bell, que una teoría de variable ocultas locales debe satisfacer. Esto implica que la mecánica cuántica es una teoría no-local, ya que una medición en un sistema afecta las correlaciones con un sistema lejano que conserva entrelazamiento luego de haber interactuado, pero esto no significa que haya una señal viajando entre ellas, y mucho menos más rápido que la luz.

El entrelazamiento en un sistema cuántico puede violar las desigualdades de Bell, es decir, cuando las predicciones cuánticas no pueden explicarse con teorías clásicas que suponen que las partículas no se afectan a distancia [15]. La violación nos permite distinguir entre las teorías clásicas locales y las teorías cuánticas [16].

## Entrelazamiento entre Quarks

Para medir el entrelazamiento entre quarks, se detectaron las direcciones relativas de los productos de decaimiento de los eventos generados en las colisiones protón-protón en el experimento ATLAS a una energía de  $13 \times 10^{12}$  eV [4]. Dado que los quarks cima decaen rápidamente, la información de su spin es transferida a sus productos de decaimiento; por lo tanto, la detección de las direcciones relativas de los productos permite deducir el spin que tenían los quarks antes de decaer [4].

Se define un parámetro numérico para medir si hay entrelazamiento entre las partículas, el cual indica entrelazamiento si [4]. Cuanto más negativo, más fuerte es la conexión. En las mediciones reportadas en 2023-2024, se obtuvo un valor de [7], indicando entrelazamiento entre los quarks [2].

## Implicaciones y Aplicaciones

Aunque actualmente no se usan quarks en computación cuántica, entender su entrelazamiento ayuda a estudiar la teoría para futuras aplicaciones.

Una de las aplicaciones tecnológicas del entrelazamiento son los bits cuánticos o qubits. A diferencia de los bits comunes, que solo pueden ser 0 o 1, los qubits pueden estar en una combinación de ambos debido a la superposición.

Como ejemplo, los quarks tienen spin que puede tomar uno de dos valores  $\pm\frac{1}{2}$ . Esto permite usarlos como si fueran qubits: pueden estar en un estado o en una combinación de ambos [4]. En un sistema de dos quarks entrelazados, sus spins están conectados: si uno tiene un valor, el otro automáticamente tendrá el valor opuesto [15].

La computación cuántica ha permitido hacer simulaciones de partículas entrelazadas utilizando qubits [3]. En [6] se reporta una simulación cuántica de la propagación y entrelazamiento entre los conjuntos o chorros de partículas resultantes cuando un par quark-antiquark se separan tras la colisión. Este trabajo es uno de los pioneros en la simulación cuántica de chorros de partículas generados por la colisión.

La relevancia de la medición del entrelazamiento entre los quarks cima y anticima radica en que los experimentos realizados en el LHC siguen siendo útiles para explorar los fundamentos de la mecánica cuántica [4].

### Desafíos en la Investigación

Una de las principales dificultades para medir el entrelazamiento entre partículas producidas es que las colisiones generan una gran cantidad de productos, lo que es como tratar de “escuchar un murmullo en un concierto de rock”. [2]. En [4], para que un evento generado en la colisión protón-protón fuera seleccionado para medir, debería contener un electrón y un muón con cargas opuestas, además de al menos dos chorros.

Los resultados tomaron en consideración la incertidumbre en los modelos de la producción de pares cima-anticima y sus decaimientos, además de las incertidumbres relacionadas con los detectores [4]. Se combinaron las diversas fuentes de error en una estimación total de las incertidumbres teóricas y experimentales (calibración, eficiencia y resolución de los detectores). También se tomaron en cuenta las incertidumbres estadísticas, relacionadas

directamente con el tamaño y fluctuaciones de los datos. El valor medido fue [4], lo que confirma el entrelazamiento entre pares de quarks cima-anticima.

El estudio del entrelazamiento cuántico en el LHC también abre una ventana a la exploración de física más allá del modelo estándar [4], [15]. En [15] se menciona que esta posible nueva física modificaría el entrelazamiento cuántico conocido en situaciones previstas por las teorías actuales.

### Conclusión

El estudio de la mecánica cuántica ha permitido entender el comportamiento de las partículas a escalas microscópicas y también ha hecho posible el desarrollo de la tecnología actual como transistores y láseres. La investigación sobre el entrelazamiento cuántico ha permitido explorar los alcances de nuestras teorías sobre la naturaleza, desafiando las intuiciones de la física clásica. El entrelazamiento no solo es interesante teóricamente, sino que brinda la promesa de futuras aplicaciones, como la criptografía y computación cuántica.

Los experimentos recientes en el LHC demuestran que los quarks cima y anticima pueden estar entrelazados. Los resultados confirman las predicciones cuánticas incluso en entornos de muy alta energía, abriendo la posibilidad de explorar los límites del modelo estándar. Estas investigaciones sientan la base teórica para las futuras aplicaciones tecnológicas. Aunque los quarks no se utilizan directamente en computación cuántica, el estudio de su entrelazamiento permite realizar simulaciones cuánticas para mejorar nuestro entendimiento de las propiedades de estos sistemas.

Desde que Heisenberg y Schrödinger formularon la teoría cuántica en 1925, sus conceptos han despertado un interés no solo en la comunidad científica, sino también en el público general, debido a su naturaleza contraintuitiva. Un ejemplo es la

no-localidad del entrelazamiento cuántico, donde una modificación en el estado de una partícula afecta instantáneamente a otra, independientemente de la distancia que las separe, siempre y cuando no se haya roto el entrelazamiento por algún agente externo.

En 2022, el Premio Nobel de Física fue otorgado a Alain Aspect, John F. Clauser y Anton Zeilinger por sus “experimentos con fotones entrelazados, que establecieron la violación de las desigualdades de Bell y abrieron el camino para la ciencia de la información cuántica.” Su trabajo impulsó avances en información cuántica.

## Referencias

- [1] ATLAS Experiment, “First direct observation of top quark pair production in proton collisions,” CERN, Dec. 15, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://atlas.cern/Updates/Briefing/Top-En-entanglement>. [Acceso: Sep. 30, 2024].
- [2] D. Garisto, “Quantum Entanglement in Quarks Observed for the First Time,” Scientific American, Sep. 25, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.scientificamerican.com/article/quantum-entanglement-in-quarks-observed-for-the-first-time/>. [Acceso: Sep. 30, 2024].
- [3] “Quantum code simulations track entangled particles,” Phys.org, Mar. 15, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://phys.org/news/2024-03-quantum-code-simulations-track-entangled.html>. [Acceso: Oct. 1, 2024].
- [4] The ATLAS Collaboration, “Observation of quantum entanglement with top quarks at the ATLAS detector,” Nature, vol. 633, pp. 542-547, Sept. 2024. doi: 10.1038/s41586-024-07824-z.
- [5] K. Byrum, “Scientists measure entanglement at the LHC,” Symmetry Magazine, Mar. 30, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.symmetrymagazine.org/article/scientists-measure-entanglement-at-the-lhc>. [Acceso: Oct. 1, 2024].
- [6] A. Florio, D. Frenklakh, K. Ikeda, D. Kharzeev, V. Korepin, S. Shi, and K. Yu, “Real-time nonperturbative dynamics of jet production in Schwinger model: Quantum entanglement and vacuum modification,” Physical Review Letters, vol. 131, no. 2, p. 021902, 2023. doi: 10.1103/PhysRevLett.131.021902.
- [7] ATLAS Collaboration, “Search for pair-produced vector-like top partners in final states with two leptons with the ATLAS detector,” CERN, ATLAS-CONF-2023-069, Aug. 25, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/CONFNOTES/ALAS-CONF-2023-069/>. [Acceso: Sep. 30, 2024].
- [8] CMS Collaboration, “Watching the top quark mass run,” CERN, Sept. 25, 2023. [En línea]. Disponible es: <https://cms.cern/news/watching-top-quark-mass-run>. [Acceso: Oct. 01, 2024].
- [9] CERN, “The Standard Model,” [En línea]. Disponible en: <https://home.cern/science/physics/standard-model>. [Acceso: Sep. 30, 2024].
- [10] “Standard Model of Elementary Particles,” Wikipedia, Jun. 15, 2022. [En línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Modelo\\_estandar\\_de\\_la\\_fisica\\_de\\_particulas#/media/Archivo:Standard\\_Model\\_of\\_Elementary\\_Particles.svg](https://es.wikipedia.org/wiki/Modelo_estandar_de_la_fisica_de_particulas#/media/Archivo:Standard_Model_of_Elementary_Particles.svg). [Acceso: Sep. 30, 2024].
- [11] “Átomo de Rutherford con neutrones,” Wikipedia, Feb. 11, 2013. [En línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Atomo\\_de\\_Rutherford\\_con\\_neutrones.png#file](https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Atomo_de_Rutherford_con_neutrones.png#file). [Acceso: Sep. 30, 2024].
- [12] “Estructura interna del átomo,” Wikimedia Commons, Nov. 20, 2006. [En línea]. Disponible en: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Estructura\\_interna\\_atomo\\_es.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Estructura_interna_atomo_es.jpg). [Acceso: Sep. 30, 2024].
- [13] A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen, “Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?,” Physical Review, vol. 47, pp. 777-780, May. 1935. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.47.777>
- [14] J. S. Bell, “On the Einstein Podolsky Rosen paradox,” Physics, vol. 1, no. 3, pp. 195-200, 1964.
- [15] M. Fabbrihesi, R. Floreanini, and E. Gabrielli, “Constraining new physics in entangled two-qubit systems: top-quark, tau-lepton and photon pairs,” Eur. Phys. J. C, vol. 83, no. 162, 2023. doi: <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-023-11307-2>
- [16] R. Aoude, E. Madge, F. Maltoni, and L. Mantani, “Probing new physics through entanglement in diboson production,” of High Energy Physics, vol. 2023, no. 12, Dic. 2023,  017. doi: [https://doi.org/10.1007/JHEP12\(2023\)017](https://doi.org/10.1007/JHEP12(2023)017)