

ARTÍCULO ORIGINAL

2025, AÑO INTERNACIONAL DE LA CIENCIA Y TECNOLOGÍA CUÁNTICAS* 2025, International Year of Science and Quantum Technologies

Luis Vázquez Martínez

Académico Correspondiente de la Sección de Ciencias Experimentales de la Real Academia de Doctores de España

lvazquez@fdi.ucm.es

RESUMEN

Se describe una de las tres presentaciones coordinadas por la RADE con motivo del Año Internacional de la Ciencia y Tecnología Cuánticas. Se presentan los experimentos básicos electromagnéticos que contribuyeron al desarrollo de la Mecánica Cuántica junto con la Relatividad Especial. Se considera la convergencia conceptual de las dos teorías a través de la ecuación de Dirac así como aspectos fundamentales asociados a la dinámica cuántica. Finalmente se presentan algunos desarrollos innovadores cuánticos como el Ordenador Cuántico, el Radar Cuántico, así como el Reloj Cuántico y un desarrollo fantástico como es el Tricorder Cuántico de Star Trek.

PALABRAS CLAVE: Estados cuánticos entrelazados, eikonal, antieikonal, ultracuántico.

ABSTRACT

We describe one of the three coordinated contributions by the RADE in the International Year of Science and Quantum Technologies. We present the basic electromagnetic experiments that contributed to the development of Quantum Mechanics and Special Relativity. The conceptual convergence of both theories is presented through the Dirac equation together with fundamental aspects associated with quantum dynamics. Finally, some quantum innovation achievements are presented as the Quantum Computer, Quantum Radar, Quantum Clock and the Quantum Tricorder of Star Trek.

KEYWORDS: Entangled Quantum States, Eikonal, Antieikonal, Ultraquantum.

* Sesión académica de la RADE celebrada el 26-11-2025 con el título *Centenario de la Mecánica Cuántica*.
<https://www.rade.es/pagina.php?item=1976>

1. INTRODUCCIÓN

Nuestra época está marcada científicamente por el desarrollo de dos entornos revolucionarios generados por la Teoría de la Relatividad y la Teoría Cuántica. Todo ello en el contexto de nuevos experimentos asociados a los fenómenos electromagnéticos.

Albert Einstein participó en ambos desarrollos, pero la Relatividad fue casi exclusivamente suyo y supuso un profundo cambio en los conceptos de Espacio, Tiempo y Gravitación. También participó profundamente en el desarrollo de la Teoría Cuántica que ha permitido extender nuestro conocimiento a la estructura de la materia: moléculas, átomos, núcleos, fotones y partículas elementales. Se trata de explicar qué ocurre a niveles cuánticos donde ya la materia, alejada de la que apreciamos en la vida diaria, deja de tener las propiedades a las que estamos acostumbrados. En este contexto solo tienen realidad las leyes de la Física Cuántica. Se ha de recordar que la Física Clásica describe fuerzas y movimientos que podemos imaginar con facilidad, mientras que la Cuántica trabaja con objetos matemáticos muy abstractos. Cuando se quiere pasar esas ideas a imágenes cotidianas, aparecen paradojas como que una partícula sea a la vez onda y corpúsculo o que un fotón o electrón pueda estar en dos sitios a la vez. Este contexto teórico ha permitido explicar algo tan básico como la estabilidad de la materia. Si los electrones se comportasen solo como bolitas que giran alrededor del núcleo, acabarían cayendo sobre él y los átomos colapsarían. Gracias a su naturaleza ondulatoria se mantienen en órbitas estables

La Teoría Cuántica fue el producto de una gran cantidad de científicos, pertenecientes a tres generaciones al menos, uno de los más importantes fue el propio Albert Einstein que obtuvo el Premio Nobel por sus explicaciones sobre el efecto fotoeléctrico en 1921 y no por la Teoría de la Relatividad. Por otra parte es de destacar de forma especial al físico teórico austríaco Erwin Schrödinger cuyo trabajo transformó la comprensión de la materia y sentó las bases de la Mecánica Cuántica. Todo ello hizo posible el desarrollo tecnológico contemporáneo: semiconductores, los láseres y la computación moderna. En 1926 llegó su aportación más decisiva cuando formula la Ecuación de Schrödinger que le llevó a compartir el Premio Nobel de Física con el físico británico Paul Dirac que con su aportación de la Ecuación de Dirac establece la convergencia de la Teoría de la Relatividad Especial y la Mecánica Cuántica.

La velocidad de la luz es una constante, que desde más de un siglo sostiene nuestra forma de entender el espacio, el tiempo y el funcionamiento del universo. Albert Einstein la situó en el centro de su Teoría de la Relatividad Especial, afirmando que la luz viaja siempre a la misma velocidad en el vacío, no dependiendo de quien la emite. Todo ello está ligado independientemente de quién la observe o de cómo se mueva la fuente que la emite. Este principio está ligado a lo conocido como invariancia de Lorentz, una simetría fundamental que describe como las leyes de la física se mantienen iguales para todos los observadores.

2. LA ECUACIÓN DE DIRAC: RELATIVIDAD Y MECÁNICA CUÁNTICA

En 1928 Dirac descubrió la ecuación que ahora lleva su nombre y que permite superar las dificultades asociadas a las densidades de probabilidad negativas de la ecuación de Klein-Gordon así como el carácter no relativista de la ecuación de Schrödinger. La ecuación de Dirac representó el primer gran éxito intento de estudiar la convergencia conceptual de la Relatividad Especial y la Mecánica Cuántica. Su característica fundamental es que es una ecuación de primer orden en el tiempo.

$$\left(i\hbar c \sum_{\mu=0}^3 \gamma^{\mu} \frac{\partial}{\partial x^{\mu}} - mc^2 \right) \psi = 0$$

La ecuación de Dirac describe partículas de spin (1/2) como el electrón y predice la existencia de antimateria. Este es el caso de electrones cargados positivamente, llamados positrones y que fueron descubiertos en 1932. En este contexto la ecuación de Dirac se aplica también a otras partículas de spin 1/2 como los quarks. Se ha de resaltar que el spin representa un grado de libertad interna y como tal está bien modelado a través de la estructura matricial de la ecuación de Dirac.

En todo este contexto aparecen una serie de cuestiones universales comunes a las propagaciones de las ondas asociadas en diferentes medios. Se trata de un tema complejo y con muchas aplicaciones como es el diseño de nuevos materiales+. De todo ello cabe destacar el límite Antieikonal en contraposición al comportamiento Eikonal.

Ambos límites están asociados a la relación entre las longitudes características asociadas al medio y a las ondas que se propagan en dicho medio. Un ejemplo muy simple podemos experimentarlo al caminar sobre una playa. Si esta es baja y arenosa, la longitud del pie es muy grande comparada con el tamaño de los granos de arena (configuración Eikonal). Si al contrario la playa es muy pedregosa nos encontramos con +una configuración Antieikonal.

Otro comportamiento similar es lo que ocurre en función de la relación entre la “h” de Planck y las acciones que aparecen en las fenomenologías asociadas. Podemos estar en el límite clásico o ultracuántico. En este último caso las acciones serían muy pequeñas comparadas con “h”.

3. EL ENTRELAZAMIENTO CUÁNTICO. INNOVACIONES CUÁNTICAS

Cada día están surgiendo nuevas aplicaciones cuánticas, siendo el “Entrelazamiento Cuántico” la base de muchas de las innovaciones. Aquí se trata de dar una idea básica de dicho fenómeno.

Consideremos el fascinante fenómeno del “Entrelazamiento Cuántico” que está en el fundamento de muchas aplicaciones cuánticas. Se trata de uno de los fenómenos más fascinantes y misteriosos de la Física Moderna. Esto corresponde a una propiedad especial de los electrones, fotones y moléculas que les permite estar conectados de manera instantánea independiente de la distancia que las separe. Se trata de un efecto real demostrado en experimentos (los pioneros han sido galardonados con el premio Nobel¹). Esto ha conducido a aplicaciones revolucionarias en tecnología cuántica. Esta dinámica desafía nuestra intuición ya que en la física clásica la información no puede viajar más rápido que la luz. En otras palabras, algunas propiedades de las partículas elementales aparecen como “no locales” no ligadas a un punto del espacio pero compartidas a distancia.

En el entrelazamiento cuántico dos partículas preparadas de cierta manera se comportan como un único Sistema, aunque estén muy lejos una de otra. Sus mediciones aparecen correlacionadas de forma que no puede explicarse con una física de “variables ocultas” al estilo clásico. Los experimentos de Aspect en los años ochenta demostraron que las desigualdades de Bell se violan y que la visión local de Einstein no funciona en ese contexto.

La clave del entrelazamiento está en la “superposición cuántica” de las partículas que antes de ser observadas, las partículas pueden existir en múltiples estados a la vez. Cuando medimos una partícula, su estado se fija y automáticamente la otra también cambia, como si ambas se comunicaran de forma instantánea.

Por otra parte, se describen brevemente algunas de dichas fantásticas innovaciones:

- Radar Cuántico.
- Ordenador cuántico.
- Sensores y relojes Cuánticos.
- Sistema de Diagnostico inspirado en el Tricorder de Star Trek.

3.1. Radar cuántico

El tradicional radar utiliza ondas electromagnéticas clásicas para detectar los objetivos. El radar cuántico generaliza el concepto de radar, siendo la novedad que utiliza un número relativamente pequeño de fotones. En este contexto se permite usar los fenómenos cuánticos para incrementar el sistema de detección. Por otra parte, es fundamental el poder detectar objetivos en zonas con turbulencias, campos magnéticos (Zonas Polares) y nubes.

¹ En el año 2022 Alain Aspect, John Clauser y Anton Zeilinger recibieron el Premio Nobel de Física por haber contribuido a proporcionar una base experimental al “Entrelazamiento”. En este contexto se ha de resaltar que Alain Aspect fue conferenciante en la Catedra de Física del Académico Prof. Manuel García Velarde en el Ateneo de Madrid en 1993.

El radar cuántico es una tecnología que utiliza fotones entrelazados, en vez de ondas electromagnéticas, como método de detección de objetos. El principio de entrelazamiento cuántico indica que dos partículas se pueden unir entre sí de manera que cualquier variación que tenga una de las partículas se manifiesta en la otra sin importar la distancia. Cada par entrelazado cuántico conduce a un proceso llamado "iluminación cuántica" donde la información sobre el entorno de una partícula se puede inferir al estudiar la otra partícula.

En un sistema de radar cuántico el primer fotón se mantiene en el dispositivo mientras que su gemelo se envía con frecuencia de microondas a los posibles objetivos. Cuando el segundo fotón encuentra un obstáculo, el fotón "estático" cambia inmediatamente su estado. Esto implica que cuando algo le sucede al fotón que está viajando, se pueden observar sus variaciones en el fotón retenido.

Como en los radares convencionales, al localizar un blanco algunos fotones vuelven al radar, y los ordenadores del sistema al comparar los fotones "gemelos" pueden calcular las propiedades físicas del objeto reflejado, tales como su tamaño, forma, velocidad, ángulo de ataque y otras características del objeto.

Además, gracias a estas nuevas particularidades de los "fotones entrelazados" los radares cuánticos son resistentes a las interferencias. La inviolabilidad del "entrelazado" sucede porque al intentar manipular o modificar el fotón que está viajando "se pierden las características cuánticas de los fotones y esto se manifiesta en el fotón retenido. Esta particularidad sería detectada por el radar cuántico empleando algoritmos específicos.

3.2. Ordenador cuántico

Un qubit, o bit cuántico, es la unidad fundamental de información en la computación cuántica, funcionando de manera análoga a los bits clásicos pero con capacidades extendidas gracias a los principios de la mecánica cuántica, como la superposición y el entrelazamiento. A diferencia de un bit clásico que solo puede ser 0 o 1, un qubit puede existir simultáneamente como 0, o como 1 o como una combinación de ambos estados. Todo ello permite procesar más información simultáneamente.

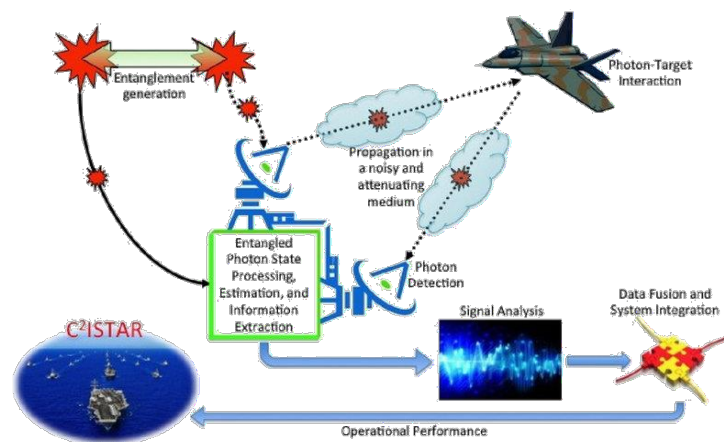
La computación cuántica fue introducida por primera vez en 1982, por Richard Feynman (premio Nobel de Física en 1965), cuando consideró la simulación de sistemas en mecánica cuántica por otros sistemas cuánticos. Su uso principal es resolver problemas complejos en áreas como la financiación, la medicina, la inteligencia artificial y la optimización de rutas, donde los ordenadores tradicionales tardarían miles de años en llegar a una solución.

En este contexto se ha de mencionar al físico español Juan Ignacio Cirac Sasturain (1965), quien ha tenido un papel relevante en el desarrollo del ordenador cuántico. Realizó sus

estudios en la UCM, y es, desde 2001, Director del Instituto Max Planck de Óptica Cuántica en Garching en Alemania.

Uno de los aspectos fundamentales que impulsan el desarrollo de ordenadores cuánticos es su potencial teórico para resolver problemas de enorme complejidad en periodos de tiempo imposibles de alcanzar por los supercomputadores convencionales en base a una capacidad de paralelización muy superior y al aprovechar principios de la física cuántica. Las computadoras cuánticas podrían procesar problemas masivamente complicados a órdenes de magnitud más rápido que las máquinas modernas más potentes.

La clave para ellos es disponer de algoritmos cuánticos. Estos algoritmos funcionan almacenando y manipulando información de una manera inaccesible para los ordenadores convencionales, lo que permite conseguir enormes aceleraciones en la resolución de ciertos problemas de física teórica hasta ahora intratables. Lo que si tienen en común todos los ordenadores cuánticos en desarrollo es que no son máquinas universales. Aunque su diseño implica la universalidad teórica (es decir, poder realizar un conjunto de operaciones que nos permita realizar cualquier operación unitaria), el “ruido” que tienen sus qbits que conlleva tiempos de coherencia limitados impiden utilizar esta universalidad. Cuánto más tiempo se mantenga la coherencia, más tiempo útil existe para ejecutar los algoritmos cuánticos.



3.3. Sensores y relojes cuánticos

Los sensores cuánticos son capaces de medir propiedades físicas con una precisión notablemente superior a la de los sensores tradicionales. Por ejemplo, pueden detectar diferencias mínimas de temperatura o cambios en el campo electromagnético o de presión con una exactitud muy superior a la disponible hoy día por otros sensores.

El reloj cuántico representa un gran avance respecto a los relojes atómicos. (Alrededor de 400 funcionando en el mundo) que se basan en medir la frecuencia resonante de los átomos

mientras que los relojes cuánticos se basan en la medición de fluctuaciones de energía a nivel cuántico lo que incrementa aún más su precisión.

Otro problema en el que la sensorica cuántica puede posibilitar un salto tecnológico revolucionario es en la medición precisa del tiempo. Los relojes cuánticos son mucho más precisos que cualquier reloj convencional. En lugar de tomar la rotación de la Tierra como referencia para medir el tiempo, algo que puede sufrir ligeras variaciones debido a múltiples factores (gravitatorios, geológicos, climáticos...), un reloj cuántico se basa en los átomos.

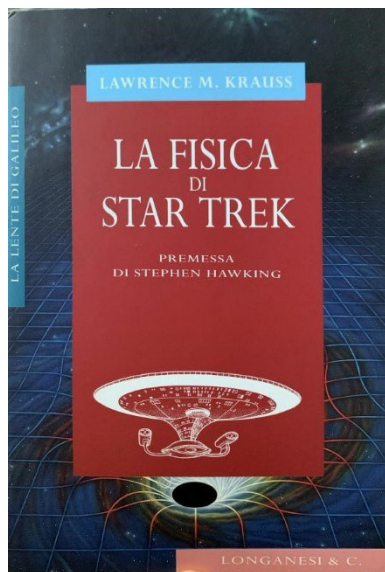
A comienzos de 2025 el gobierno británico anuncio el desarrollo de un reloj cuántico con el fin de mejorar la precisión-seguridad y reducir la dependencia del GPS más susceptible de ser bloqueado (Sistemas de Navegación y Vigilancia. Sincronización temporal extremadamente precisa comunicaciones más seguras y fiables).

Simplificando su funcionamiento, en estos relojes se proyecta luz o radiación electromagnética sobre un átomo y sus niveles de energía cambian en un proceso estable que puede medirse, estableciéndose como una escala de tiempo. El estándar utilizado para ello es el cesio porque es el elemento químico más fiable, puesto que la práctica totalidad de sus átomos responden del mismo modo a la radiación electromagnética. La precisión del prototipo de este reloj, por ahora muy voluminoso, es tal que tendría un retraso de menos de un segundo en miles de millones de años.

3.4. Sistema de diagnóstico inspirado en el Tricorder de Star Trek

En la famosa serie de ciencia ficción *Star Trek* el médico que quería hacer un control médico a un miembro de la tripulación de la nave *Enterprise*, le bastaba con apuntar un dispositivo especial el famoso "tricorder" o "trigrabador", en la dirección del paciente.

En la Universidad de Stanford en 2015 se ha desarrollado un nuevo sistema de diagnóstico inspirado en el anterior de ciencia ficción. Este nuevo instrumento puede ser usado para descubrir tejidos orgánicos de consistencia diferente de los otros como es el caso de las células cancerígenas También puede ser utilizado para detectar explosivos ocultos en la maleta de un terrorista. En ambos casos, un sensor cuántico tiene una precisión mayor que la de los rayos X y sin necesidad de contacto con el material a analizar.



Todo surge a partir de un concurso lanzado por DARPA para detectar explosivos incluso invisibles a los detectores de metales. El funcionamiento básico es el siguiente:

Emisión de microondas hacia el área a examinar. Estas ondas hacen vibrar las moléculas de varios materiales según la frecuencia característica de cada material. Las vibraciones generan ondas ultrasonidos que se difunden en el aire. Estas señales características son recogidas por sensores apropiados lo cual nos permite tener un cuadro detallado de la composición del material analizado.

Este sistema puede ser usado también en Oncología ya que los tejidos enfermos absorben la energía de las microondas de diagnóstico no invasivo en forma diferente de los sanos y vibran de forma diversa.

Se trata de un sistema no invasivo, no es peligroso como los rayos X y muy preciso debido a la combinación de las características de las microondas y los ultrasonidos (¡¡calor + sonido !!).

DARPA, que significa Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados de Defensa (Defense Advanced Research Projects Agency), es una agencia del Departamento de Defensa de Estados Unidos responsable de desarrollar nuevas tecnologías para uso militar. Fue creada en 1958 en respuesta al lanzamiento del Sputnik por la Unión Soviética. Aunque su misión principal es la investigación y el desarrollo tecnológico para la defensa, muchas de sus innovaciones, como la precursora de Internet (ARPANET), el ratón de computadora y el GPS, han tenido un impacto significativo en la tecnología civil.

4. NUEVO RENACIMIENTO MUNDIAL

Finalmente deseo resaltar en el contexto anterior que realmente estamos viviendo un nuevo Renacimiento con la fusión de la Inteligencia Artificial y la Mecánica Cuántica a nivel mundial. Como pinceladas de esta observación:

Un informe de septiembre de 2024 del grupo de expertos estadounidense Information Technology and Innovation Foundation (ITIF) sobre la capacidad de innovación cuántica de China destacó que, a diferencia de Estados Unidos, que se centra en la creación de conocimiento, China pone más énfasis en la implementación de tecnología, con el objetivo de transformar rápidamente las innovaciones en productos tangibles.

En el caso de China, el Gobierno cuenta con el Laboratorio Nacional de Ciencias de la Información Cuántica, dotado con 10.000 millones de dólares, como centro de desarrollo de la tecnología cuántica y coordinador entre la Academia China de Ciencias, institutos gubernamentales de investigación, universidades y empresas. China cuenta con la mayor red de comunicaciones cuánticas del mundo, de 12.000 kilómetros de longitud, que une las principales ciudades con redes seguras. Además, China cuenta desde diciembre de 2024 con un computador cuántico Tianyan-504, dotado con un chip Xiaohong de 504 qbits.

La UE lleva a cabo un esfuerzo cuántico que se ha incluido como un área prioritaria en la convocatoria de 2024. Red de Ordenadores Cuánticos.

La convergencia entre inteligencia artificial y tecnologías cuánticas está generando un nuevo renacimiento científico, con implicaciones estratégicas globales en EE.UU., China y la Unión Europea.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Dirac, P.A. "Principios de Mecánica Cuántica". Ediciones Ariel (1968)
2. Silvan S. Schweber. A. "An Introduction to Relativistic Quantum Field Theory" Harper International Edition (1966).
3. Rañada, A.F. and Vázquez, L. "Kinks and Heisenberg Uncertainty Principle", Physical Review D, Vol. 19 493-495 (1979).
4. Rañada, A.F. and Vázquez, L. "Quantum Mechanics and Nonlinear Classical Fields" Anales de Física, Vol. 76, 139-141 (1989).
5. Vázquez, L., Jiménez, S. and Shvartsburg, A.B. "The wave equation: From Eikonal to Antieikonal Approximation" Modern Electronic Materials Vol 2 51-53 (2016). Este artículo está publicado también en ruso.
6. Vázquez, L., Velasco, M.P., Baleanu, D., Vázquez-Poletti, J.L. and Jiménez, S. "From Eikonal to Antieikonal Approximations: Competition of Scales in the Framework of Schrödinger and Classical Wave Equation" x, Journal of Computational and Nonlinear Dynamics Vol. 17, 1-6 (2022).

7. Vázquez, L. "About the Ultraquantum Limit" *Annales de la Fondation Louis de Broglie* Vol. 12, Nº 4, 487-490 (1987).
8. Lanzagorta, M. 2012 "Quantum Radar". Morgan & Clypool Publishers. Synthesis Lectures on Quantum Computing.
9. Rubio Herranz, S., Carpio López, R., Diaz-Cano Ocaña, A. y López Montes, A. "Computación Cuántica". ISBN: 97884-127903-7-5 . Reproexpres Ediciones (2024).