

Opinion

Un Sol cuántico

A quantum Sun

Resumen

El Sol es mucho más que nuestra fuente de luz y calor; es un laboratorio cuántico natural donde procesos que van desde la fusión nuclear hasta las interacciones entre radiación y materia tienen lugar en condiciones únicas (ambientes estelares). La mecánica cuántica gobierna los procesos de fusión en el núcleo, el espectro de fotones que emerge de la fotosfera y las ligeras huellas de polarización en la atmósfera solar. Estos efectos no solo sostienen la vida en la Tierra, también proporcionan pruebas fundamentales para la física cuántica. En este artículo exploramos cómo los principios cuánticos moldean el comportamiento del Sol, cómo los estudios solares han impulsado nuestra comprensión de la cuántica y cómo estas ideas inspiran hoy tecnologías que van desde la detección de neutrinos hasta la fotovoltaica y la información cuántica.

Palabras clave: Sol; Mecánica cuántica; Efecto túnel; Espectroscopía; Neutrinos solares; Tecnologías cuánticas.

Abstract

The Sun is far more than our source of light and heat; it is a natural quantum laboratory where processes ranging from nuclear fusion to radiation-matter interactions unfold under unique conditions (stellar ambients). Quantum mechanics governs the processes of fusion in the core, the spectrum of photons emerging from the photosphere, and the subtle polarization signatures imprinted in the solar atmosphere. These effects not only sustain life on Earth but also provide fundamental tests for quantum physics itself. In this article, we explore how quantum principles shape the Sun's behavior, how solar studies have advanced our understanding of quantum mechanics, and how these insights now inspire technologies from neutrino detection to photovoltaics and quantum information science.

Keywords: Sun; Quantum mechanics; Tunneling; Spectroscopy; Solar neutrinos; Quantum technologies.

Introducción

El Sol ha despertado desde siempre la admiración y la curiosidad de la humanidad, primero fue venerado como una deidad, fuente de vida y poder, y más adelante se convirtió en objeto de estudio para la ciencia. Tras siglos de observación, apenas en el siglo XX empezamos a comprender los procesos físicos que ocurren en su interior gracias a los avances de la mecánica cuántica. Hoy entendemos el Sol como un sistema donde la física abarca desde lo microscópico hasta las grandes escalas cósmicas, y donde tienen cabida interacciones atómicas, dinámica de plasmas y campos magnéticos entrettejidos en un solo cuerpo celeste.

La física cuántica ha sido indispensable para descifrar esta complejidad, al explicar, por ejemplo, por qué los protones pueden superar su repulsión mutua y fusionarse, cómo la radiación solar sigue la ley de cuerpo negro de Planck y por qué el espectro solar está lleno de líneas polarizadas a consecuencia de procesos de dispersión (ver, **Wiescher et al.**, 2025). Desde la fusión en el núcleo hasta el magnetismo de la atmósfera, los procesos de naturaleza cuántica están presentes en cada capa del Sol (**Figura 1**).

Tunelamiento cuántico en el núcleo solar

Son varios los modelos evolutivos de atmósfera estelar aplicados al Sol que han determinado que su núcleo se encuentra a unos 15 millones de kelvin, y que es en este núcleo donde convergen las condiciones necesarias para que distintos procesos de fusión nuclear tengan

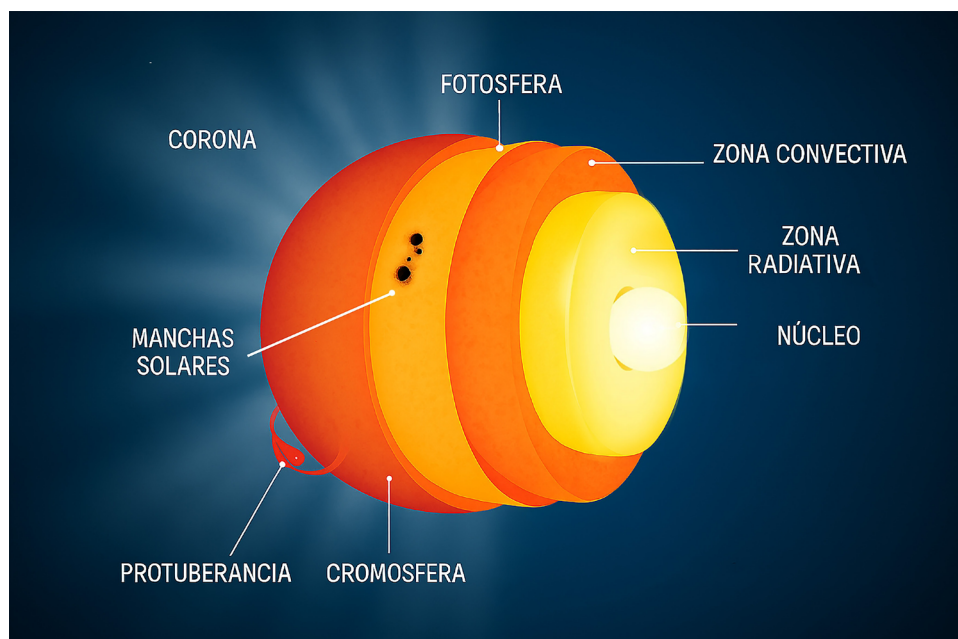


Figura 1. Esquema de la estructura del Sol, incluido el interior solar y las capas de la atmósfera solar alta

lugar (ver, **Elsworth et al.**, 1990; **Basu et al.**, 2009). Clásicamente, la repulsión coulombiana entre protones haría imposible este proceso, y se requeriría una energía de decenas de MeV por par de protones para acercarse lo suficiente, valor este muy superior comparado con los que los modelos de atmósfera estelar aplicados al Sol sugieren que se encuentran en su interior (ver, **Epelbaum et al.**, 2009).

La clave para resolver esta aparente paradoja proviene de la mecánica cuántica, en particular del efecto túnel (**Gamow**, 1928). Los físicos George Gamow (1904-1968) y, posteriormente, Hans Bethe (1906-2005) y Carl Friedrich Freiherr von Weizsäcker (1912-2007) mostraron que, gracias a la naturaleza ondulatoria de la materia, los protones pueden “atravesar” con cierta probabilidad la barrera de Coulomb, cuyo valor clásico ronda 1 MeV. La combinación entre la distribución de Maxwell-Boltzmann y la penetrabilidad cuántica define la llamada ventana de Gamow, que determina las tasas de reacción. De acuerdo a esto, los protones con energías del orden de 3 a 10 keV, comunes en el núcleo solar, pueden atravesar la barrera de Coulomb gracias a la tunelización cuántica o penetración de barrera (ver, **Heil et al.**, 2001). La fusión de hidrógeno en el Sol es, por lo tanto, posible pero infrecuente. La probabilidad de que dos protones atravesasen vía tunelamiento cuántico la barrera de Coulomb es ínfima y, aunque se aproximan lo suficiente, la conversión de los protones en deuterio procede a través de interacción débil, con una sección eficaz diminuta. Esta doble supresión fija el ritmo extraordinariamente lento del consumo de combustible estelar y explica que una estrella como el Sol pueda brillar durante unos diez mil millones de años (ver, **Iben**, 2013). En ese marco, el solapamiento entre la cola de Maxwell-Boltzmann y la penetrabilidad cuántica (ventana de Gamow) gobierna las tasas de reacción y alimenta principalmente la cadena protón-protón (**Figura 2**), con una contribución de segundo orden del ciclo CNO en el Sol actual (ver, **Salpeter**, 1952). Este entendimiento cuántico no solo resuelve la paradoja clásica, sino que también orienta los esfuerzos de fusión controlada en la Tierra, donde se buscan, mediante confinamiento magnético o inercial, condiciones que maximicen la tasa de reacción manteniendo la estabilidad del plasma (ver, **Ongena et al.**, 2016; **Huang & Li**, 2018; **Braams & Stott**, 2002).

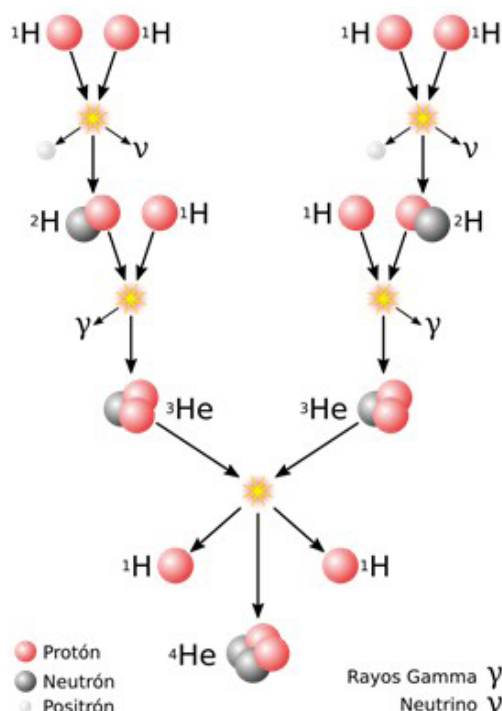


Figura 2. Esquema de la cadena protón–protón, principal fuente de energía en el núcleo solar. Cuatro protones se transforman en un núcleo de helio-4 a través de reacciones intermedias que liberan positrones, neutrinos y radiación gamma. El proceso es posible gracias al efecto de tunelamiento cuántico en el núcleo solar.

Radiación y espectro de cuerpo negro

La energía liberada por fusión en el núcleo se transporta hacia el exterior por difusión radiativa y convección hasta la fotosfera, desde donde el Sol irradia como un cuerpo negro a unos 5.770 kelvin de temperatura efectiva aproximadamente. La ley de Planck, formulada por Max Planck (1848–1947) en 1900 (ver, **Manoukian**, 2020), resolvió la llamada “catástrofe ultravioleta”, es decir, la predicción de las teorías clásicas según la cual un cuerpo negro debía emitir una cantidad infinita de energía en la región ultravioleta del espectro. Las observaciones evidenciaron que esto no ocurría, lo que llevó a Planck a introducir la idea revolucionaria de la cuantización de la energía, marcando el inicio de la mecánica cuántica.

El Sol real, sin embargo, no es un cuerpo negro perfecto. El continuo fotosférico se puede modelar usando la opacidad del hidrógeno ionizado, el oscurecimiento de limbo y la producción de miles de transiciones atómicas (líneas de Fraunhofer) que, en conjunto, producen desviaciones respecto de la curva ideal de una planckiana. Estas configuraciones espectrales (cuantizadas por construcción) no solo nos informan de la termodinámica de la fotosfera, sino que habilitan diagnósticos de campos magnéticos (Zeeman/Hanle) y de condiciones fuera del equilibrio termodinámico local en capas superiores, conectando la física cuántica con observables solares de alta precisión.

En esa misma línea, la cuantización de la luz tuvo una consecuencia directa en la materia según la explicación del efecto fotoeléctrico dada por Albert Einstein (1879-1955) en 1905. Este fenómeno consiste en la emisión de electrones desde una superficie metálica al ser iluminada con luz de frecuencia suficientemente alta, con lo que se demuestra que la energía de la radiación está cuantizada en fotones. Este principio sustenta la fotovoltaica moderna: cuando el espectro solar incide sobre ciertos materiales semiconductores se generan pares electrón–hueco que luego se pueden convertir en una corriente eléctrica (ver,

Parida et al., 2011; **El Chaar & El Zein**, 2011). De este modo, el Sol no solo define las condiciones termodinámicas de su superficie visible, sino que también inspira tecnologías que aprovechan sus fotones para generar electricidad a través de procesos cuánticos.

Dispersión coherente e interferencia cuántica

La luz solar que llega a la Tierra contiene más información de la que revela su espectro electromagnético. Al analizar la polarización de la luz solar, se descubrió un “segundo espectro solar” que contiene un sinnúmero de estructuras finas que emergen de procesos de dispersión coherente (ver, **Stenflo & Keller**, 1997). En este fenómeno, un fotón es absorbido por un átomo y ‘reemitido’ sin pérdida de coherencia cuántica. El resultado son interferencias sutiles entre estados cuánticos que generan patrones de polarización sensibles a condiciones físicas locales del plasma (ver, **Fluri & Stenflo**, 1999; **Stenflo**, 2011).

El efecto Hanle, descubierto por Wilhelm Hanle (1901-1993) en 1924, es una de las aplicaciones más notables. Por este efecto, los campos magnéticos débiles pueden modificar la polarización de la luz a través de procesos de interferencia cuántica, permitiendo detectar campos magnéticos de solo unas decenas de Gauss (ver, **Stenflo**, 1991), invisibles para el efecto Zeeman clásico (responsable de la división de una línea espectral en varios componentes cuando los átomos o iones emisores/absorbentes están inmersos en un campo magnético). Observaciones de líneas como la Sr I 4607 Å (ver, **Smitha et al.**, 2014) han demostrado que el Sol alberga un magnetismo turbulento y oculto, el cual es crucial para comprender la dinámica de su atmósfera y, en última instancia, la actividad solar.

Interacciones cuánticas en la atmósfera solar alta

En la cromosfera y la corona, donde la densidad es baja y los campos magnéticos dominan la dinámica solar, la interacción entre radiación y materia se hace aún más compleja (ver, **Athay**, 2012). Procesos como la absorción resonante, la emisión inducida y la dispersión de Thomson determinan la formación de líneas espectrales, muchas de ellas sensibles a la orientación y magnitud de los campos magnéticos (ver, **Saint-Hilaire et al.**, 2021).

Estos procesos son claves para abordar el enigma del calentamiento coronal, un problema abierto de la heliofísica que se puede condensar en la siguiente pregunta: ¿por qué la atmósfera solar más alta (la corona) alcanza millones de kelvin mientras la fotosfera permanece a tan solo unos cuantos miles de kelvin? (ver, **Klimchuk**, 2015). No es que la cuántica “caliente” directamente la corona, sino que fija la microfísica de emisión y absorción que nos permite diagnosticar los mecanismos macroscópicos de liberación energética. Mientras ondas y reconexión magnética operan a escalas magneto-hidrodinámicas (MHD) y cinéticas, la polarización de las líneas (modulada por los efectos Zeeman y Hanle, la coherencia entre subniveles y la despolarización colisional) codifica la geometría y la fuerza del campo, la anisotropía de la radiación y las tasas de colisión (ver, **Aschwanden**, 2006). Medir y modelar esas características cuánticas en condiciones fuera de equilibrio termodinámico local convierte a la cromosfera y la corona en un “interferómetro cuántico” natural que revela dónde y cómo se deposita la energía.

Fluorescencia y procesos de capa interna en fulguraciones (Fe K α , Auger)

Durante las grandes fulguraciones solares, los rayos X duros (~ 7 keV) fotoionizan electrones de la capa K del Fe en la baja atmósfera/fotosfera (ver, **Phillips**, 2004). La desexcitación del hueco electrónico (ausencia del electrón eyectado) produce la línea de fluorescencia Fe K α a $\sim 6,4$ keV (y, con menor intensidad, K β a $\sim 7,06$ keV), o bien una cascada Auger no radiativa que compite con la emisión de fotones de naturaleza térmica. Estas transiciones de los orbitales interiores del átomo de hierro, intrínsecamente cuánticas, dependen de probabilidades de transición (rendimiento de fluorescencia), acoplamientos espín-órbita y de la mezcla de estados, y su intensidad relativa (ancho equivalente, K β /

K α). Es así que mediante la medida de estas líneas espectrales durante una fulguración solar grande, es posible diagnosticar abundancias, ionización y densidades locales (ver, **Bekker *et al.*, 2021**).

La geometría también queda codificada. La línea fluorescente K α es sensible a parámetros, como la altura de la fuente de rayos X sobre la fotosfera, la distribución angular de los fotones incidentes y el ángulo entre el centro y el borde, de forma que permite la localización de las fuentes emisoras y la determinación del mecanismo de transporte energético. En conjunto con el continuo Compton/albedo y las líneas térmicas (principalmente Fe XXV y Fe XXVI), la línea K α ofrece una forma alternativa de estudiar la deposición de energía, desde escalas atómicas (tasas radiativas/Auger) hasta macroscópicas, enlazando microfísica cuántica con la cinemática de las fulguraciones (ver, **Caspi *et al.*, 2014**; **Duan *et al.*, 2019**).

El magnetismo oculto del Sol

El Sol alberga una vasta red de campos magnéticos en constante evolución, desde estructuras bien definidas, como las manchas solares en la fotosfera solar (**Figura 3**), hasta componentes más difusos y ocultos en capas de su atmósfera (ver, **Parker, 2009**; **Rutten & Schrijver, 2012**). Gran parte de este magnetismo no se detecta con técnicas convencionales basadas en el efecto Zeeman, que responden sobre todo al componente del campo a lo largo de la línea de visión (polarización circular, Stokes V) y, en menor medida, al componente transversal (polarización lineal, Stokes Q/U) solo cuando el campo es suficientemente intenso y ordenado (de cientos a miles de Gauss). En cambio, campos débiles (unas cuantas décimas de Gauss) muy inclinados o mezclados a escalas por debajo de la resolución tienden a cancelarse y permanecen prácticamente invisibles a estas técnicas (ver, **Berdyugina & Solanki, 2002**; **Schad *et al.*, 2024**).

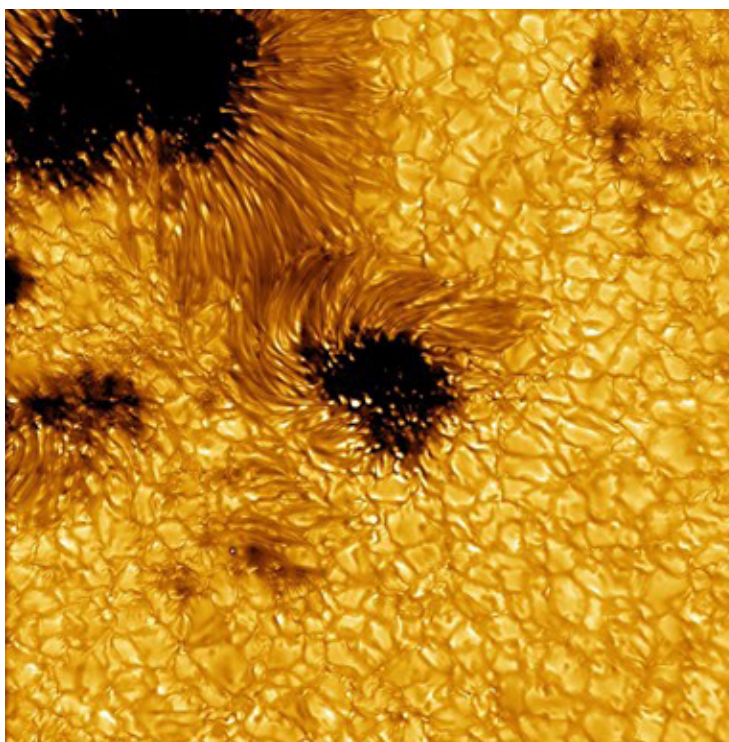


Figura 3. Imagen en alta resolución tomada por el telescopio solar Inouye (DKIST) el 11 de mayo de 2021, que muestra una región activa en la fotosfera solar con presencia de manchas solares y granulación circundante. Crédito: NSO/AURA/NSF.

En su lugar, la espectropolarimetría, basada en la interacción entre la radiación y los estados cuánticos de los átomos, ha abierto una nueva ventana para explorar estos campos magnéticos invisibles (**Figura 4**). Mediante el análisis de la polarización de la luz solar con modelos detallados de dispersión cuántica, se han podido identificar estructuras magnéticas de pequeña escala que antes pasaban desapercibidas (ver, **Del Toro Iniesta, 2003; Iglesias & Feller, 2019**).

Este enfoque ha demostrado ser clave para abordar preguntas fundamentales en la física solar y estelar, como el ya mencionado mecanismo de calentamiento coronal y el acoplamiento magnético entre la fotosfera y la corona. Los modelos más recientes sugieren que la energía magnética almacenada en estos campos ocultos puede desempeñar un papel crucial en la generación de ondas de Alfvén (oscilaciones del plasma guiadas por un campo magnético) y otros procesos que transportan energía desde la superficie solar hasta las capas más externas de la atmósfera (ver, **Centeno *et al.*, 2006**).

El uso de técnicas cuánticas avanzadas para estudiar el magnetismo del Sol está revolucionando nuestra comprensión de cómo el magnetismo influye en la dinámica y la actividad solar. A medida que los modelos teóricos y las capacidades observacionales continúan mejorando, la espectropolarimetría cuántica podría proporcionar respuestas a algunos de los interrogantes más profundos del Sol, incluido el origen del ciclo solar y la naturaleza de los procesos que impulsan las eyecciones de masa coronal y el viento solar.

Neutrinos solares: una confirmación cuántica

Uno de los mayores logros de la física cuántica aplicada al Sol ha sido la detección de neutrinos solares (ver, **Bahcall, 1978; Kirsten, 1999**). Estas partículas, generadas en las reacciones de fusión en el interior solar, atraviesan la materia casi sin interacción. En la segunda mitad del siglo XX la detección de los neutrinos solares reveló un problema, pues los experimentos medían solo un tercio de los neutrinos esperados. El llamado “problema de los neutrinos solares” puso en duda tanto la astrofísica como la física de partículas, y, durante varias décadas, fue uno de los principales interrogantes que involucraban a nuestra estrella (ver, **Bahcall & Bethe, 1990; Dar & Shaviv, 1999**).

La solución llegó con la teoría de las oscilaciones de neutrinos, un fenómeno puramente cuántico (ver, **Kayser, 1981; Schwetz *et al.*, 2008**). Los neutrinos existen como superposiciones de estados de sabor y de masa; al viajar, cambian de familia, de modo que los detectores terrestres solo observaban una fracción de los generados en el Sol. La

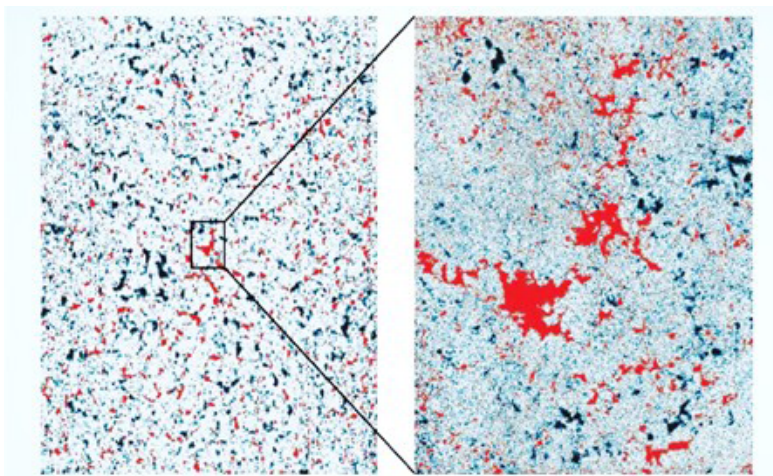


Figura 4. Campos magnéticos solares a pequeña escala (**Stenflo, 2004**). El panel izquierdo muestra un magnetograma de alta resolución en el que las regiones de polaridad opuesta aparecen representadas en rojo y azul. El recuadro amplificado a la derecha revela la complejidad de la estructura magnética, donde abundan campos débiles y altamente entremezclados.

confirmación experimental de este proceso (Kajita, 2006; McDonald *et al.*, 2003), por la que se otorgó el Premio Nobel en 2015 a los investigadores Takaaki Kajita (1959-) y Arthur B. McDonald (1943-), validó simultáneamente la física solar y la cuántica de partículas. La investigación en este campo ha tenido repercusiones en el desarrollo de detectores de neutrinos de alta sensibilidad y en la computación cuántica aplicada a la simulación de sistemas subatómicos (ver, Scholberg, 2012).

Del estudio solar a las tecnologías cuánticas

El estudio del Sol no se ha limitado a ampliar nuestra comprensión del universo, también ha catalizado el desarrollo de tecnologías cuánticas que hoy transforman la ciencia y la ingeniería. Cada avance en la interpretación de la radiación solar, en la detección de partículas elementales o en la modelación de plasmas extremos ha encontrado aplicaciones más allá de la astrofísica.

Un primer ejemplo que ya comentamos es la espectroscopía cuántica, perfeccionada en gran parte gracias al análisis de la luz solar. Las líneas espectrales observadas en el Sol fueron la base sobre la que se construyeron los modelos de estructura atómica y de transición electrónica. Hoy, las mismas técnicas se aplican en sensores cuánticos ultrafinos, como los basados en defectos de vacantes de nitrógeno en diamante, capaces de detectar campos magnéticos minúsculos con una precisión sin precedentes. Estos sensores, inspirados en principios que nacieron en la astrofísica solar, se utilizan en medicina, geofísica y exploración planetaria (ver, Sinha *et al.*, 2023).

El problema de los neutrinos solares llevó al desarrollo de gigantescos detectores subterráneos, como el Homestake, el Super-Kamiokande y el Observatorio de Neutrinos de Sudbury (SNO), los cuales no solo resolvieron el enigma de las oscilaciones de neutrinos, sino que sentaron las bases de la instrumentación para registrar señales cuánticas extremadamente débiles. Este tipo de dispositivos ha inspirado diseños de detectores aplicados en seguridad nuclear, vigilancia de reactores y física de partículas de frontera.

Otro campo directamente impulsado por el Sol es la energía fotovoltaica. La explicación cuántica del efecto fotoeléctrico, basada en la interacción entre fotones solares y electrones en metales o semiconductores, dio lugar a la tecnología de conversión de luz en electricidad. Los estudios sobre eficiencia, espectros de absorción y recombinación electrónica en condiciones solares han orientado el diseño de nuevas generaciones de celdas solares, desde perovskitas hasta estructuras nanofotónicas, que aprovechan fenómenos de confinamiento cuántico para maximizar la producción energética.

Más recientemente, los principios de coherencia e interferencia observados en la polarización solar han inspirado aplicaciones en información cuántica. La forma en que los estados cuánticos de los átomos en la atmósfera solar mantienen o pierden coherencia al interactuar con la radiación se ha convertido en un modelo para comprender cómo preservar la información en sistemas de computación cuántica. Asimismo, conceptos como el entrelazamiento cuántico, fundamentales en protocolos de criptografía cuántica y telecomunicaciones seguras, encuentran paralelismos en el análisis de los estados de superposición en las observaciones solares.

Aplicaciones y diagnósticos

Las observaciones de la polarización en el espectro solar han abierto nuevas oportunidades para el diagnóstico de la atmósfera solar. La polarización revela detalles sobre la estructura atómica y las interacciones cuánticas que no son accesibles a través del espectro de intensidad ordinario. Las mediciones de interferencia cuántica también se aplican en el análisis de materiales para celdas solares, permitiendo la identificación de estados electrónicos que contribuyen a la conversión de fotones en corriente. Esto es crucial para la evaluación y optimización de dispositivos optoelectrónicos.

A pesar de los avances en la teoría y las observaciones, reproducir ciertas estructuras espectrales, como el pico central en la línea Sc II 4247 Å, sigue siendo un desafío, lo que sugiere que algunos aspectos de la física cuántica aún no se comprenden completamente.

La presencia de campos magnéticos de diferentes intensidades y direcciones modifica las firmas de interferencia cuántica, lo que complica el análisis y la interpretación de los datos espectrales. La comprensión de estos efectos es esencial para mejorar los modelos de diagnóstico solar. En definitiva, las interferencias cuánticas en el espectro solar proporcionan una herramienta poderosa para el estudio de la atmósfera solar y la optimización de materiales optoelectrónicos, pero persisten desafíos en la comprensión completa de estos fenómenos, especialmente en la reproducción de ciertas estructuras espectrales y la influencia de los campos magnéticos.

Conclusiones y discusión

El Sol constituye un laboratorio excepcional para explorar la física cuántica en condiciones extremas. Su relación con la cuántica va mucho más allá de la producción de energía por fusión nuclear, en cuanto la mecánica cuántica determina cómo se genera, se propaga y se modula la radiación solar a lo largo de la atmósfera. Fenómenos como la interferencia cuántica, que da forma a las líneas espectrales, o la dispersión coherente, que revela campos magnéticos ocultos, son ejemplos de cómo la cuántica es clave para descifrar la compleja dinámica solar.

Claramente, los procesos cuánticos sustentan mucho más que la física solar. Las mismas reglas de transiciones atómicas, opacidades y transferencia radiativa que se emplean en el entendimiento de los procesos físicos en el Sol permiten diagnosticar temperaturas, densidades y campos en estrellas de todas las masas y edades. En medios fotoionizados, por ejemplo, en regiones H II, nebulosas planetarias y núcleos activos, los coeficientes de fotoionización y recombinación, los niveles finos y las líneas espectrales “prohibidas” tienen un fundamento enteramente cuántico. En objetos compactos, la estadística de Fermi–Dirac fija la presión de degeneración que sostiene a las enanas blancas y el equilibrio de hidrostático en estrellas de neutrones, mientras que en discos y chorros relativistas alrededor de agujeros negros, los procesos de emisión por líneas internas, la producción/aniquilación de pares y la emisión de Compton (también de naturaleza cuántica) determinan los espectros de alta energía. Incluso la química interestelar y la formación de polvo conectan la microfísica con la evolución galáctica. Así, el Sol es en sí un caso específico (pero único por su cercanía) dentro de un universo profundamente cuántico, donde la física atómica y la nuclear organizan desde la vida de las estrellas hasta el brillo de los entornos más extremos.

La intersección entre física solar y mecánica cuántica ha sido un camino de doble vía. Los avances teóricos en la física cuántica permitieron explicar los procesos solares, mientras que la observación del Sol impulsó a su vez la expansión de la cuántica hacia nuevas fronteras. Esta interacción adquirió un significado especial en el 2025, Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuánticas, al recordarnos cómo un astro que brilla desde hace 4.600 millones de años se ha convertido en un motor para el desarrollo de la ciencia más moderna.

El futuro de este campo promete avances notables con telescopios solares de próxima generación y misiones espaciales dedicadas a la espectropolarimetría, que abrirán la posibilidad de responder preguntas aún abiertas relacionadas con la naturaleza de las estructuras de interferencia cuántica, la complejidad de los campos magnéticos entrelazados, o el enigma del calentamiento coronal. A la vez, los experimentos cuánticos en laboratorio se retroalimentarán de estos hallazgos solares, contribuyendo a la comprensión y estabilidad de sistemas cuánticos artificiales.

Así, el estudio del Sol se inscribe en la celebración global de la cuántica como un testimonio de cómo la exploración del cosmos y la investigación fundamental se entrelazan. En las profundidades del plasma solar y en la sutileza de las interacciones cuánticas se esconde no solo la clave de la vida en la Tierra, sino también la inspiración para nuevas tecnologías que marcarán el rumbo de nuestra relación con el universo.

Santiago Vargas-Domínguez¹, Juan Camilo Buitrago-Casas²

¹ Observatorio Astronómico Nacional, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

² Space Sciences Laboratory, UC Berkeley, CA, USA

Agradecimientos

Este trabajo fue patrocinado por el proyecto DynaSun y, por lo tanto, ha recibido financiación en el marco del programa Horizonte Europa de la Unión Europea bajo el acuerdo de subvención n.º 101131534. No obstante, las opiniones y puntos de vista expresados son únicamente de los autores y no reflejan necesariamente los de la Unión Europea, por lo que esta no puede ser considerada responsable de ellos.

Contribución de los autores

Los autores contribuyeron a este trabajo en igual medida, desde la concepción del mismo hasta la documentación, análisis y escritura del texto.

Conflicto de intereses

Los autores expresamos que no tenemos conflictos de intereses.

Referencias

- Aschwanden, M. J. (2006). *Physics of the solar corona: an introduction with problems and solutions*. Springer Berlin Heidelberg.
- Athay, R. G. (2012). *The solar chromosphere and corona: Quiet sun (Vol. 53)*. Springer Science & Business Media.
- Bahcall, J. N. (1978). Solar neutrino experiments. *Reviews of Modern Physics*, 50(4), 881.
- Bahcall, J. N. & Bethe, H. A. (1990). Solution of the solar-neutrino problem. *Physical Review Letters*, 65(18), 2233.
- Bekker, S. Z., Ryakhovsky, I. A., Korsunskaya, J. A. (2021). Modeling of the lower ionosphere during solar X-ray flares of different classes. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126(2), e2020JA028767.
- Basu, S., Chaplin, W. J., Elsworth, Y., New, R., Serenelli, A. M. (2009). Fresh insights on the structure of the solar core. *The Astrophysical Journal*, 699(2), 1403.
- Berdugina, S. V. & Solanki, S. K. (2002). The molecular Zeeman effect and diagnostics of solar and stellar magnetic fields-I. Theoretical spectral patterns in the Zeeman regime. *Astronomy & Astrophysics*, 385(2), 701-715.
- Braams, C. M. & Stott, P. E. (2002). Nuclear Fusion: half a century of magnetic confinement research. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 44(8), 1767-1767.
- Caspi, A., McTiernan, J. M., Warren, H. P. (2014). Constraining solar flare differential emission measures with EVE and RHESSI. *The Astrophysical Journal Letters*, 788(2), L31.
- Centeno, R., Collados, M., Bueno, J. T. (2006). Spectropolarimetric investigation of the propagation of magnetoacoustic waves and shock formation in sunspot atmospheres. *The Astrophysical Journal*, 640(2), 1153.
- Dar, A. & Shaviv, G. (1999). The solar neutrino problem—an update. *Physics reports*, 311(3-5), 115-141.
- Del Toro-Iniesta, J. C. (2003). *Introduction to spectropolarimetry*. Cambridge University Press.
- Duan, Z., Deng, Y., Yu, Y., Chen, S., Qin, J., Wang, H., Ding, X., Peng, L., Schneider, C., Wang, D., Höfling, S., Dowling, J., Lu, C., Pan, J. (2019). Quantum beat between sunlight and single photons. *Nano letters*, 20(1), 152-157. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.9b03512>
- Elsworth, Y., Howe, R., Isaak, G. R., McLeod, C. P., New, R. (1990). Evidence from solar seismology against non-standard solar-core models. *Nature*, 347(6293), 536-539.
- El Chaar, L. & El Zein, N. (2011). Review of photovoltaic technologies. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(5), 2165-2175.
- Epelbaum, E., Hammer, H. W., Meißner, U. G. (2009). Modern theory of nuclear forces. *Reviews of Modern Physics*, 81(4), 1773-1825.
- Fluri, D. M. & Stenflo, J. O. (1999). Continuum polarization in the solar spectrum. *Astronomy and Astrophysics*, 341, 902-911.
- Gamow, G. (1928). Zur Quantentheorie des Atomkernes. *Zeitschrift für Physik*, 51(3-4), 204-212.
- Heil, M., Dillmann, I., Käppeler, F., Plag, R. ESR measurements of proton-induced reaction rates in the Gamow window of the astrophysical p process. Experimental Proposal E, 62.
- Huang, C. & Li, L. (2018). Magnetic confinement fusion: a brief review. *Frontiers in Energy*, 12(2), 305-313.

- Iben, I.** (2013). *Stellar evolution physics*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139047009>
- Iglesias, F. A. & Feller, A.** (2019). Instrumentation for solar spectropolarimetry: state of the art and prospects. *Optical Engineering*, 58(8), 082417-082417.
- Kajita, T.** (2006). Discovery of neutrino oscillations. *Reports on Progress in Physics*, 69(6), 1607.
- Kayser, B.** (1981). On the quantum mechanics of neutrino oscillation. *Physical Review D*, 24(1), 110.
- Kirsten, T. A.** (1999). Solar neutrino experiments: results and implications. *Reviews of Modern Physics*, 71(4), 1213.
- Klimchuk, J. A.** (2015). Key aspects of coronal heating. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 373(2042), 20140256.
- Manoukian, E.B.** (2020). Black Body Radiation: The Planck Law. In: *100 Years of Fundamental Theoretical Physics in the Palm of Your Hand*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51081-7_82
- McDonald, A. B., Klein, J. R., L. Wark, D.** (2003). Solving the solar neutrino problem. *Scientific American*, 288(4), 40-49.
- Ongena, J., Koch, R., Wolf, R., Zohm, H.** (2016). Magnetic-confinement fusion. *Nature Physics*, 12(5), 398-410.
- Parida, B., Iniyan, S., Goic, R.** (2011). A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(3), 1625-1636.
- Parker, E. N.** (2009). Solar magnetism: the state of our knowledge and ignorance. *Space Science Reviews*, 144(1), 15-24.
- Phillips, K. J. H.** (2004). The solar flare 3.8-10 keV X-ray spectrum. *The Astrophysical Journal*, 605(2), 921.
- Rutten, R. J. & Schrijver, C. J.** (Eds.). (2012). *Solar surface magnetism (Vol. 433)*. Springer Science & Business Media.
- Saint-Hilaire, P., Oliveros, J. C. M., Hudson, H. S.** (2021). Thomson Scattering in the Lower Corona in the Presence of Sunspots. *The Astrophysical Journal*, 923(2), 276.
- Salpeter, E. E.** (1952). The Reaction Rate of the Proton-Proton Chain. *Astrophysical Journal*, 116, 649-650.
- Schad, T. A., Petrie, G. J. D., Kuhn, J. R., Fehlmann, A., Rimmele, T., Tritschler, A., Woeger, F., Scholl, I., Williams, R., Harrington, D., Parashiv, A. R., & Szente, J.** (2024). Mapping the Sun's coronal magnetic field using the Zeeman effect. *Science Advances*, 10(37), eadq1604.
- Scholberg, K.** (2012). Supernova neutrino detection. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 62(1), 81-103.
- Schwetz, T., Tórtola, M., Valle, J. W.** (2008). Three-flavour neutrino oscillation update. *New Journal of Physics*, 10(11), 113011.
- Sinha, S., Jeyaseelan, C., Singh, G., Munjal, T., Paul, D.** (2023). Spectroscopy—Principle, types, and applications. In *Basic biotechniques for bioprocess and bioentrepreneurship* (pp. 145-164). Academic Press.
- Stenflo, J. O.** (1991). Applications of the Hanle effect in solar physics. In *The Hanle Effect and Level-Crossing Spectroscopy* (pp. 237-281). Springer US.
- Stenflo, J. & Keller, C.** (1997). The second solar spectrum. A new window for diagnostics of the Sun. *Astronomy and Astrophysics*, 321, 927-934.
- Stenflo, J. O.** (2004). Hidden magnetism. *Nature*, 430(6997), 304-305. <https://doi.org/10.1038/430304a>
- Stenflo, J. O.** (2011). Unsolved problems in solar polarization. In Kuhn, J.R.m, Harrington, D.M., Lin, H., Berdyugina, S.V., Trujillo-Bueno, J., Keil, S.L., Rimmele, T., (Editors). *Solar Polarization 6*. Astronomical Society of the Pacific Conference Series.
- Smitha, H. N., Nagendra, K. N., Stenflo, J. O., Bianda, M., Ramelli, R.** (2014). The quantum interference effects in the Sc II 4247 Å line of the Second Solar Spectrum. *The Astrophysical Journal*, 794(1), 30. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/794/1/30>
- Wiescher, M., Bertulani, C. A., Brune, C. R., deBoer, R. J., Diaz-Torres, A., Gasques, L. R., Langanke, K., Navrátil, P., Nazarewicz, W., Okolowicz, J., Phillips, D. R., Płoszajczak, M., Quaglioni, S., & Tumino, A.** (2025). Quantum physics of stars. *Reviews of Modern Physics*, 97(2), 025003.