

Puntos de interés

Descripción breve y sencilla de iniciativas docentes en nuestros colegios e institutos que han de ser resaltadas, de investigaciones relevantes de autores españoles o de extranjeros en instituciones españolas, y de otros hechos interesantes sobre ciencia y enseñanza, políticas educativa y científica, así como sobre sus actores¹

ENTRELAZAMIENTO CUÁNTICO Y COHERENCIA CONTROLADOS MEDIANTE PULSOS LÁSER DE ATTOSEGUNDOS

Los investigadores están ampliando los límites de cómo entendemos y controlamos la materia en su nivel más fundamental. En el centro de este esfuerzo se encuentra la mecánica cuántica, una teoría que describe un mundo donde las partículas pueden existir en múltiples estados al mismo tiempo y permanecer conectadas mediante el entrelazamiento cuántico. Estos efectos son especialmente difíciles de observar y controlar, ya que son frágiles y se pierden al interactuar con el entorno. Ahora, los científicos han logrado controlar el entrelazamiento cuántico entre electrones e iones moleculares en la escala temporal natural del movimiento electrónico: el attosegundo.

En un nuevo estudio, publicado en *Nature* (<https://doi.org/10.1038/s41586-026-10230-2>), investigadores de la Universidad Autónoma de Madrid, el Instituto Max Born y el Instituto IMDEA Nanociencia han demostrado una forma de controlar el entrelazamiento cuántico

en la escala de los attosegundos. Utilizando una secuencia cuidadosamente sincronizada de dos pulsos láser de attosegundos combinados con un pulso infrarrojo ligeramente más largo, lograron ionizar moléculas de hidrógeno y seguir la dinámica del sistema resultante: un ion molecular y un electrón liberado. Ajustando con precisión el retraso entre los pulsos, el equipo pudo regular el grado de entrelazamiento cuántico entre estos dos sistemas.

La coherencia describe hasta qué punto los sistemas muestran interferencias de tipo ondulatorio, mientras que el entrelazamiento conecta pares de sistemas, de modo que, medir uno proporciona información inmediata sobre el otro. El profesor **Fernando Martín (UAM/IMDEA Nano)**, autor principal del estudio, explica: “Descubrimos que las propiedades de coherencia y entrelazamiento son complementarias: al aumentar el entrelazamiento, tiende a disminuir la coherencia, y viceversa”. El profesor **Marc Vrakking (Max Born Institute)** añade: “Podemos pasar de un régimen a otro simplemente cambiando el tiempo entre los pulsos láser”. Este trabajo demuestra la importancia de considerar adecuadamente el entrelazamiento para observar de forma óptima las coherencias electrónicas en experimentos de attosegundos.

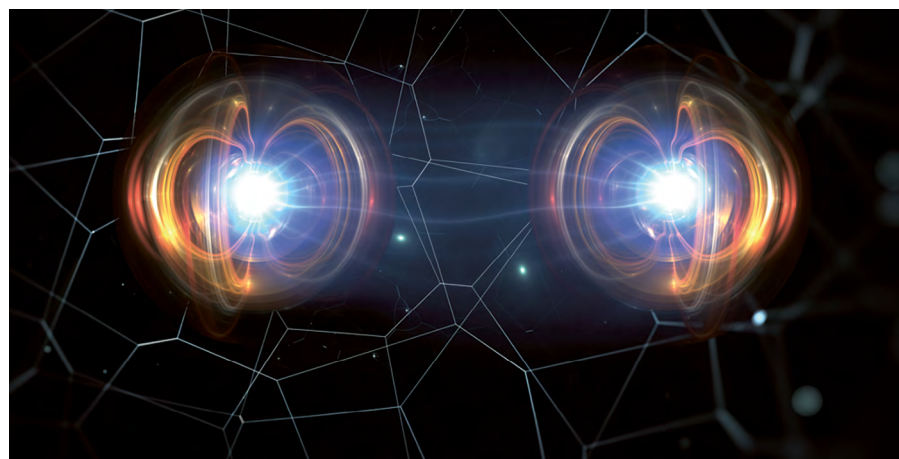


Ilustración por gentileza de Alberto García Gómez (albertogg.com).

también podría tener importantes implicaciones para tecnologías emergentes. Los resultados sugieren nuevas formas de potenciar o, si se desea, suprimir el entrelazamiento cuántico en sistemas moleculares, una capacidad que podría apoyar el desarrollo continuo de tecnologías de información cuántica. Por ejemplo, la computación cuántica depende de estados entrelazados (*cúbits*) que son muy frágiles y fácilmente perturbados por el ruido del entorno. Las estrategias actuales suelen centrarse en corregir errores después de que ocurren. En cambio, esta investigación apuntaría a un nuevo enfoque: controlar activamente los estados cuánticos para preservar o incluso restaurar el entrelazamiento en tiempo real. Aunque todavía se trata de una aplicación muy lejana, la capacidad de manipular la coherencia y el entrelazamiento en escalas de tiempo ultrarrápidas podría abrir nuevas vías para estabilizar los sistemas cuánticos.

EL HIDRÓGENO COMO ACTOR CLAVE EN LA FORMACIÓN DE POLVO CÓSMICO DE CARBURO DE SILICIO EN ESTRELLAS EVOLUCIONADAS

El polvo cósmico es uno de los ingredientes fundamentales del universo. Estas diminutas partículas



¹ Animamos a que los lectores nos hagan llegar noticias documentadas que la redacción pueda considerar y editar para esta sección.

Este estudio revela un aspecto fundamental del comportamiento cuántico. Más allá de su relevancia científica,

sólidas (típicamente de alrededor de 100 nm) desempeñan un papel crucial en la evolución de galaxias, en la formación de estrellas y planetas y en la química del universo, además de modular muchas de las condiciones físicas de los distintos entornos del espacio. Este polvo se origina principalmente en las atmósferas de estrellas evolucionadas, las llamadas estrellas de la rama asintótica gigante (AGB). En las AGB ricas en carbono (con exceso de carbono atómico respecto al oxígeno), el polvo consiste mayoritariamente en granos de carbono amorfo y de carburo de silicio (SiC) de tamaño nanométrico. Sin

El trabajo reproduce en el laboratorio condiciones químicas similares a las presentes en las capas internas de las envolturas circunestelares de estrellas ricas en carbono, **estudiando la interacción entre carbono atómico, silicio atómico e hidrógeno molecular**. Los experimentos se realizaron en la máquina Stardust del grupo ESISNA-ICMM, una instalación única diseñada para producir análogos de polvo cósmico. Mediante una fuente de agregación en fase gas se vaporizan átomos de carbono y silicio en presencia de hidrógeno molecular, generando nanopartículas que simulan las primeras etapas del crecimiento del polvo en estrellas. El análisis mediante microscopía electrónica y espectroscopías IR y XPS revela la formación de nanopartículas de carburo de silicio parcialmente hidrogenado, junto con carbono amorfo y silicio hidrogenado.

El resultado más relevante es la **identificación de la molécula SiC₂ como precursor molecular clave en la formación de granos de carburo de silicio**. Esta especie se detecta en fase gaseosa mediante espectroscopía de emisión óptica cuando la densidad de hidrógeno es elevada, es decir, en condiciones más cercanas a las estelares. **En ausencia de hidrógeno apenas se observa interacción entre carbono y silicio, lo que evidencia el papel esencial del H₂**. Su presencia inicia reacciones que generan hidrocarburos simples como el acetileno (C₂H₂), que posteriormente reaccionan con silicio para formar SiC₂. **La modelización cinética basada en cálculos de química cuántica confirma que las reacciones entre silicio y especies como C₂H₂ o C₂H constituyen rutas eficientes para su formación**.

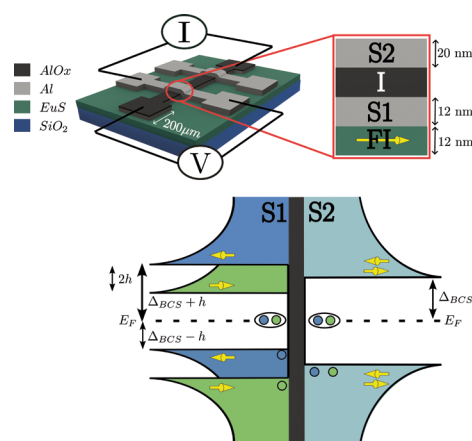
Estos resultados tienen importantes implicaciones astrofísicas. Observaciones han detectado SiC₂ en numerosas estrellas ricas en carbono, y su abundancia disminuye en regiones donde se forman granos de polvo, lo que sugiere su incorporación al sólido. **Los experimentos apoyan esta interpretación al demostrar su papel como precursor**. Más allá de ello, el trabajo ilustra cómo la astroquímica de laboratorio permite conectar procesos nanoscópicos con fenómenos cósmicos, ayudando a comprender el origen del polvo que, con el tiempo, formará planetas y sistemas como el nuestro.

CUANDO EL MAGNETISMO Y LA SUPERCONDUCTIVIDAD DEJAN DE SER ENEMIGOS

La superconductividad —la capacidad de ciertos materiales para conducir electricidad sin resistencia— sigue siendo uno de los fenómenos más fascinantes de la física moderna, como ha vuelto a poner de relieve el Premio Nobel de Física 2025, dedicado a investigaciones pioneras en circuitos superconductores y física cuántica.

Por otro lado, el magnetismo y la superconductividad son fenómenos que difícilmente coexisten en un mismo material, ya que los campos magnéticos tienden a destruir el estado superconductor. Sin embargo, cuando ambos se combinan en estructuras híbridas, emergen nuevos estados cuánticos y una sorprendente variedad de efectos físicos.

Un reciente trabajo publicado en *Physical Review Letters* (<https://doi.org/10.1103/lt7q-6ff3>), fruto de una colaboración entre grupos del Centro de Física de Materiales de San Sebastián, el Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid —ambos pertenecientes al CSIC— y la Universidad Autónoma de Madrid, presenta un avance especialmente relevante sobre esta coexistencia entre magnetismo y superconductividad. El estudio analiza uniones híbridas basadas en aluminio superconductor (Al) y el aislante ferromagnético sulfuro de europio (EuS), sistemas que actualmente se fabrican en San Sebastián y que convirtieron a este laboratorio en el primero de Europa en lograr un desdoblamiento de espín, sin campo magnético externo,



embargo, el mecanismo que conduce a la formación de estos granos sigue siendo en gran medida un problema abierto en astrofísica.

Un reciente trabajo multidisciplinar, desarrollado durante más de cinco años y publicado en *Nature Astronomy* (<https://doi.org/10.1038/s41550-026-02854-1>), aborda este problema mediante una combinación de astroquímica de laboratorio y modelización teórica. Este estudio es fruto de una colaboración entre distintos institutos del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) en España (ICMM, IEM, INMA, ICTF e IFF), junto con el instituto IRAP-CNRS y la Universidad de Toulouse en Francia. En esta investigación participan los investigadores G. Tajuelo, G. Santoro, L. Martínez, P. Merino, J. I. Martínez, P. L. De Andrés, G. J. Ellis, A. Mayoral, R. J. Peláez, I. Tanarro, M. Agúndez, J. Cernicharo y J. A. Martín-Gago.

inducido en superconductores de este tipo. El trabajo demuestra por primera vez la observación experimental del transporte *subgap* en uniones Josephson con superconductores “spin-split”, es decir, superconductores cuya estructura electrónica está modificada por interacciones magnéticas.

Uno de los hallazgos más destacados del trabajo es la observación de **reflexiones múltiples de Andreev (MAR)**, procesos cuánticos mediante los cuales los electrones y huecos rebotan repetidamente entre superconductores antes de atravesar completamente la barrera. Los investigadores comprobaron que los procesos de orden impar aparecen divididos debido al efecto magnético inducido por el EuS, mientras que los procesos pares permanecen inalterados. **Este “efecto par-impar” constituye una firma inequívoca de la coexistencia entre superconductividad y magnetismo en estos sistemas.**

El trabajo combina experimentos de espectroscopía de conductancia con modelos teóricos avanzados basados en transporte cuántico. Gracias a ello, los autores lograron identificar aproximadamente un centenar de canales de alta transmisión responsables del transporte coherente a través de la unión. Además, observaron una corriente Josephson apreciable incluso en presencia de interacción magnética, demostrando que los pares de Cooper conservan su coherencia cuántica en estas condiciones.

Más allá de su relevancia fundamental, estos resultados tienen importantes implicaciones tecnológicas. **La posibilidad de controlar simultáneamente superconductividad y polarización de espín abre nuevas vías para desarrollar dispositivos cuánticos más eficientes y robustos.** Entre las posibles aplicaciones futuras destacan válvulas Josephson, corrientes superconductoras polarizadas y arquitecturas para computación cuántica basadas en estados de Andreev o modos de Majorana. El estudio demuestra también que basta un único superconductor con desdoblamiento de espín para observar este comportamiento, simplificando considerablemente el diseño experimental respecto a propuestas anteriores. Esta simplificación convierte a las heteroestructuras EuS/Al en una plataforma especialmente prometedora para in-

vestigar nuevos fenómenos cuánticos híbridos.

En definitiva, este trabajo representa un paso importante hacia el control de los estados cuánticos en sistemas superconductores magnéticos y consolida el papel de las nanoestructuras híbridas como una de las áreas más activas de la física cuántica contemporánea.

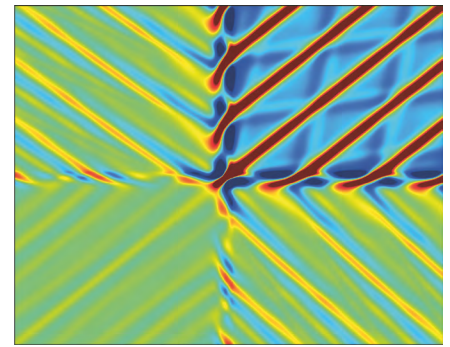
CRISTALES TEMPORALES DE HAWKING

La radiación de Hawking —predicha por Stephen Hawking en los años setenta— es una de las predicciones más fascinantes de la física moderna. Según esta idea, los agujeros negros no son completamente “negros”, sino que emiten espontáneamente radiación de origen cuántico. Aunque detectar este tenue efecto en agujeros negros reales resulta prácticamente imposible, desde hace décadas existe una alternativa: **recrear fenómenos gravitacionales en el laboratorio usando la denominada gravedad analógica.**

En este contexto se enmarca el reciente trabajo publicado en la *Physical Review Letters* (<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.063602>) por investigadores del Grupo de Física Teórica de la Materia Condensada de la Universidad Complutense de Madrid, donde se propone un fenómeno completamente nuevo: **un cristal temporal generado por la amplificación espontánea de la radiación de Hawking en un “láser de agujero negro”.**

“La idea básica es que el sonido en un medio inhomogéneo se comporta de manera análoga a la luz en un campo gravitatorio”, explica Juan Ramón Muñoz de Nova, actualmente investigador Ramón y Cajal en el Instituto de Estructura de la Materia (CSIC). Así, un flujo que pasa de subsónico a supersónico actúa como un agujero negro acústico, pues **el sonido queda atrapado en la región supersónica igual que la luz dentro de un agujero negro.**

El denominado láser de agujero negro corresponde a una configuración con dos horizontes de sucesos acústicos, entre los cuales la radiación de Hawking se refleja repetidamente, amplificándose, en analogía con un láser convencional. **“Esta amplificación de la radiación de Hawking termina gene-**



rando un estado periódico autosostenido”, señala Fernando Sols, miembro del grupo.

Por otro lado, un cristal temporal es un estado de la materia que oscila periódicamente de manera espontánea, sin necesidad de aportar energía externa. La idea fue propuesta en 2012 por el premio Nobel Frank Wilczek y ha generado todo un campo de investigación, con potenciales aplicaciones en relojes y sensores cuánticos.

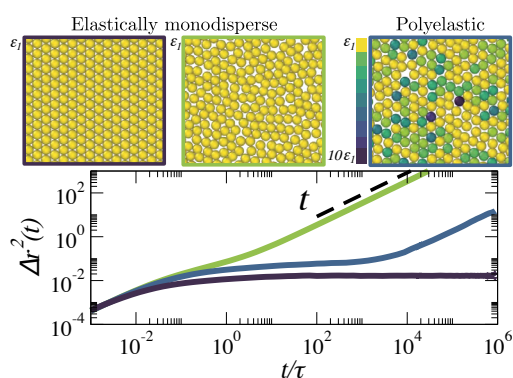
El nuevo trabajo conecta ambos mundos y predice la formación de un “cristal temporal de Hawking”, donde **la autoamplificación de la radiación de Hawking producida en un condensado de Bose-Einstein (gas ultrafrío donde millones de átomos comparten el mismo estado cuántico) acaba resultando en oscilaciones periódicas espontáneas.**

El sistema se comporta como **un péndulo cuántico que oscila en una superposición de todas sus posibles trayectorias y escoge una al azar en cada realización experimental,** como si fuese un gato de Schrödinger. **El cristal temporal emerge así de forma espontánea, sin forzamiento externo.**

El estudio también utiliza de forma pionera dos operadores de tiempo para describir matemáticamente el proceso de cristalización temporal. **“Disponer de operadores de tiempo en un sistema físico tangible abre nuevas posibilidades para investigar la naturaleza cuántica del propio tiempo”,** comenta Muñoz de Nova.

¿PUEDE UN SISTEMA ORDENADO DIFUNDIR COMO UN LÍQUIDO?

La transición de fase líquido-cristal en 2D transcurre en dos etapas. A bajas temperaturas, la fase crista-



lina posee orden algebraico, con parejas de dislocaciones excitadas térmicamente. A temperaturas más altas, estas parejas de dislocaciones se desvinculan, destruyendo el orden traslacional del cristal pero manteniendo el orden algebraico rotacional del mismo; la fase resultante es la denominada **fase hexática**. Aun a temperaturas más altas, las parejas de dislocaciones que forman cada dislocación se desvinculan, ocasionando la pérdida de orden orientacional y dando lugar a la **fase líquido isótropo**. Tanto en la fase cristalina como en la fase hexática, la dinámica de las partículas se reduce a **pequeñas fluctuaciones alrededor de sus posiciones de equilibrio**. Esto es cierto tanto para sistemas atómicos y moleculares, como

para sistemas coloidales convencionales. En este último caso, sin embargo, se puede modificar las propiedades de las partículas de manera controlada. En particular, es posible diseñar **partículas coloidales más o menos rígidas ajustando su estructura interna**.

Hasta la fecha, la mayor parte de los estudios realizados se centran en sistemas formados por partículas con propiedades elásticas idénticas o muy similares. En este contexto, los investigadores granadinos Dr. José Ruiz-Franco y Prof. ICREA Alberto Fernández-Nieves, del Soft Condensed Matter Laboratory de la Universidad de Barcelona, han ido un paso más allá estudiando sistemas bidimensionales formados por partículas monodispersas en tamaño con **distinta rigidez, una propiedad definida como polielasticidad**. Mediante simulaciones numéricas, el trabajo publicado en la revista *Physical Review Letters* (<https://doi.org/10.1103/v62d-g9vz>) muestra cómo la heterogeneidad elástica controla de forma decisiva el comportamiento estructural y dinámico del sistema.

Partiendo de una configuración triangular ordenada en 2D, el sistema tiende a desordenarse y evoluciona hacia una fase líquida en la que las partículas difunden libremente, cuando estas

poseen una rigidez baja y uniforme. Sin embargo, al introducir una amplia distribución de módulos elásticos, el sistema estabiliza estados altamente ordenados en los que los grados de libertad traslacionales quedan fuertemente restringidos. Sorprendentemente, y a pesar de que la polielasticidad favorece estados estructuralmente ordenados, **la presencia de partículas más blandas permite que el sistema permanezca dinámicamente activo a tiempos largos, alcanzando eventualmente un régimen difusivo**. Esta difusión emerge mediante **mecanismos de intercambio** en los que las partículas pueden permutar sus posiciones sin destruir la integridad local formada por sus primeros vecinos. Así, mientras las partículas más rígidas tienden a estabilizar el orden cristalino, **las partículas blandas permiten que el sistema continúe evolucionando dinámicamente**.

Este trabajo propone el uso de la polielasticidad como una nueva estrategia para diseñar materiales con propiedades de mecánicas y de transporte poco convencionales, poniendo de manifiesto la importancia de la **heterogeneidad elástica** en aspectos fundamentales como la estabilidad estructural y la dinámica colectiva.

