

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 y sus actores¹

FILMANDO LA MUERTE TÉRMICA DE LOS ELECTRONES EN EL MATERIAL

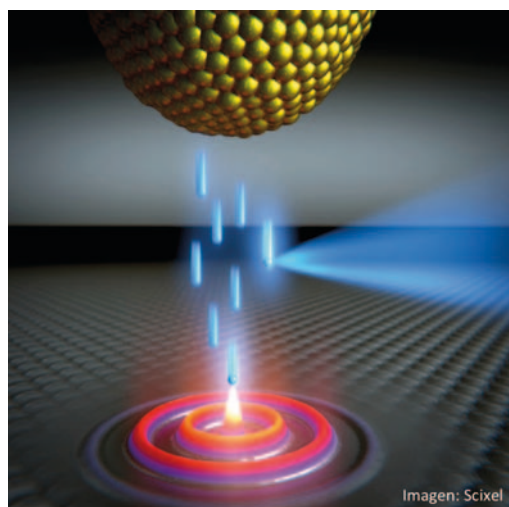
Es bien conocido que el paso de un flujo de electrones a través de un material aumenta la temperatura de este debido al efecto Joule. Este efecto, que se usa cotidianamente en calentadores domésticos e industriales, secadores de pelo, etc., se debe a que los nuevos electrones inyectados no pueden ir a los estados de menor energía, porque ya están ocupados por los electrones propios del material y, por tanto, deben iniciar su andadura con energías relativamente altas. Sin embargo, según van moviéndose a través del material, estos electrones —los portadores calientes— van perdiendo energía mediante colisiones con otros electrones y los átomos del sólido. **El proceso mediante el cual esta energía perdida se traduce en energía térmica y, por tanto, en un aumento de la temperatura, se conoce como termalización de los portadores calientes.**

Hay que notar sin embargo que este efecto tan bien conocido tiene lugar para flujos de electrones muy altos, que pueden llegar a miles de billones de electrones por segundo en dispositivos electrónicos al uso. Cuánto tarda cada uno de ellos en perder su energía es una cuestión generalmente difícil de responder experimentalmente.

En un artículo recientemente publicado en la revista *Nano Letters* (DOI: 10.1021/acs.nanolett.1c00951) un grupo de científicos españoles ha propuesto **un nuevo método para explorar la termalización de portadores calientes con resolución temporal de billonésimas de segundo.** El trabajo, que resulta de una colaboración entre la Universi-

dad Autónoma de Madrid, IFIMAC, el Instituto Madrileño de Estudios Avanzados en Nanociencia (IMDEA), Donostia International Physics Center (DIPC) y la Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea, ha usado un Microscopio Túnel de Barrido para inyectar electrones en una superficie de plata a un ritmo mil veces menor que el correspondiente a corrientes de operación de dispositivos estándar, y ha examinado la distribución energética de la luz que se emite en la unión en respuesta a la inyección de electrones.

Una visión naíf de la ley de Conservación de la Energía implicaría que no deberían emitirse fotones con energías



mayores que el voltaje aplicado a la unión: el experimento, por el contrario, demuestra que, aunque el número de fotones con energías mayores que el voltaje aplicado es muy pequeño, éste no es completamente nulo. En su trabajo, el consorcio liderado por el Prof. Roberto Otero, de IMDEA Nanociencia/UAM, explica este fenómeno como el **resultado de tener en cuenta la temperatura del gas de electrones del sólido, y permite extraer dicha temperatura a partir de la distribución energética de los fotones con energías por encima del voltaje.**

Este análisis demuestra que la temperatura del gas de electrones y la del material en sí coinciden para tempera-



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

turas altas y corrientes bajas; a medida que se aumenta la corriente, sin embargo, la temperatura electrónica estimada aumenta por encima de la temperatura de la muestra. Los autores racionalizan este comportamiento teniendo en cuenta que, al aumentar la corriente, disminuye el tiempo promedio entre la inyección de electrones consecutivos. Cuando este tiempo es menor que el de la termalización de los portadores calientes, el segundo electrón inyectado nota que la temperatura del gas de electrones es mayor que la de la muestra porque la energía del primer electrón aún no se ha disipado completamente. Si la inyección del segundo electrón da lugar a la emisión de luz, la distribución energética de la luz con energías por encima del voltaje reflejará la temperatura del gas de electrones en el momento de la inyección. De esta manera, midiendo la emisión de luz con energías por encima del voltaje a distintas corrientes es posible seguir la rapidez con la que el proceso de termalización tiene lugar.

Como señala el Prof. Otero, la importancia de estos resultados se basa en tres pilares fundamentales: en primer lugar, **aclara la naturaleza de la emisión de fotones por encima del voltaje aplicado** y muestra cómo este hecho es perfectamente consistente con el conocimiento científico actual; en segundo lugar, ofrece una **nueva manera**

¹ Sección preparada por Augusto Beléndez, en colaboración con actores implicados, que anima a proponer contribuciones relevantes para ser consideradas aquí.

de medir la temperatura electrónica de sólidos que, al usar un microscopio túnel de barrido, permitiría el estudio con **resolución espacial atómica**, del orden de las separaciones entre átomos individuales; por último, ofrece **una nueva herramienta para estudiar los procesos de termalización de portadores calientes de uno en uno**. Por todos estos motivos, los autores confían en que este trabajo sea esencial para el diseño y caracterización de dispositivos térmicos y luminiscentes de tamaño nanométrico, y podría tener importantes consecuencias para el diseño de catalizadores nanométricos para distintas reacciones químicas, o para la fabricación de láseres nanométricos que podrían funcionar con potencias de bombeo extraordinariamente bajas.

EL CONFUSO REINO DE LOS AGUJEROS NEGROS MASIVOS

Las observaciones de la red de detectores de ondas gravitatorias Advanced LIGO y Advanced Virgo han desvelado la existencia de una población de agujeros negros masivos de origen estelar, con masas significativamente superiores a las observadas en binarias de rayos X en la Vía Láctea. El 21 de mayo de 2019, Advanced

masa intermedia, es decir, entre 100 y 100.000 masas solares.

GW190521 es, sin embargo, muy diferente a la mayoría de señales de fusiones de agujeros negros previamente observadas, al no mostrar apenas ciclos antes de la propia colisión. Esto da pie a interpretaciones alternativas sobre qué pasó realmente. **Si bien esta morfología puede deberse a modulaciones inducidas por la precesión del plano orbital, también puede aparecer en colisiones no cuasicirculares, como en encuentros hiperbólicos o fusiones con alta excentricidad.** Un artículo publicado recientemente en la revista *Physical Review Letters* (DOI: 10.1103/PhysRevLett.126.201101) por un equipo de investigadores formado por Juan Calderón Bustillo, del Instituto Galego de Física de Altas Enerxías (IGFAE) de la Universidade de Santiago de Compostela, Nicolás Sanchis-Gual, de la Universidade de Aveiro (Portugal), y Alejandro Torres-Forné y José A. Font, de la Universitat de València, cuestiona la interpretación del origen de la señal GW190521. **Combinando simulaciones numéricas y análisis Bayesiano, los investigadores demuestran que colisiones frontales de agujeros negros con una masa total compatible con GW190521 podrían ser identificadas erróneamente como fusiones cuasi-circulares y con precesión situadas a distancias mucho mayores de la real y, por tanto, menos masivas.** Como consecuencia, esta identificación lleva a que la masa del agujero negro primario del sistema resida en el rango de masas “prohibido” en el cual las estrellas muy masivas no producen agujeros negros debido a la “inestabilidad de pares” presente en las explosiones supernova de tales estrellas. Los investigadores afirman que distinguir entre ambos casos será posible cuando se disponga de formas de onda fenomenológicas para colisiones con alta excentricidad y de *priors* apropiados sobre la probabilidad astrofísica de tal tipo de colisiones.

LIMITES CUÁNTICOS A LA VELOCIDAD DE EVOLUCIÓN

La teoría de la información permite adoptar una descripción común para procesos diversos, como la

desnaturalización de una proteína, una transición interatómica, o el borrado de un bit de información en un ordenador. Estos son ejemplos de procesos físicos que conllevan un cambio en la configuración del sistema bajo estudio y muchas aplicaciones requieren cuantificar el tiempo requerido para que se completen dichos procesos, identificando un análogo de la velocidad a la cual ocurren.

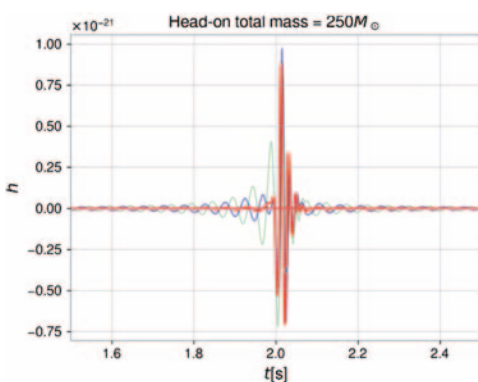
Con este fin, décadas de trabajo han cristalizado en la introducción de unos resultados teóricos fundamentales conocidos como “límites de velocidad”. **Estos constituyen una formulación**



Tiempo requerido para detectar la evolución de un sistema. (Foto de Guy Chenu.)

precisa de la relación de incertidumbre tiempo-energía, según la cual el tiempo para que se complete un proceso disminuye con la energía del sistema. Sin embargo, la noción de “velocidad” involucrada en estos límites no es la convencional en mecánica clásica que asociaríamos a una partícula al variar su posición. Consiste en una abstracción basada en la identificación de los posibles estados del sistema, su interpretación como un espacio generalizado y su geometrización introduciendo una distancia (o de forma más general, una divergencia-alfa en geometría de información). Establecida dicha distancia las ecuaciones de movimiento permiten establecer los límites de velocidad.

El catedrático Adolfo del Campo, de la Universidad de Luxemburgo y el Donostia International Physics Center (San Sebastián), ha realizado contribuciones pioneras a este campo de investigación. En el 2013 introdujo los primeros límites de velocidad para sistemas cuánticos disipativos en colaboración con Íñigo L. Egusquiza, Susana Huelga y Martin B. Plenio. En el 2018 mostró que **los límites de velocidad conocidos hasta la fecha, que se consideraban restringidos al dominio de la**



LIGO y Advanced Virgo observaron GW190521, señal consistente con la fusión de dos agujeros negros en órbita cuasicircular y con precesión del plano orbital. A diferencia de detecciones previas, la fusión que dio origen a GW190521 generó un agujero negro de masa intermedia, de unas 142 veces la masa del Sol, siendo esta la primera observación de un agujero negro de

física cuántica, tenían un análogo en la mecánica clásica y estadística. Este trabajo con Brendan Sanahan, Aurelia Chenu y Norman Margolus catalizó una serie de estudios que permitió la unificación de los límites de velocidad en procesos arbitrarios, bien clásicos, cuánticos, o descritos por termodinámica estadística.

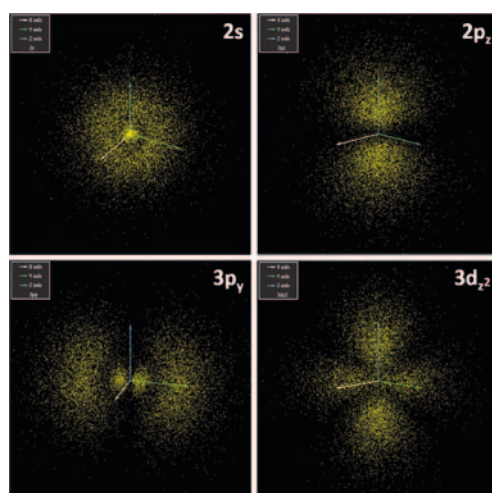
Mientras que estos resultados se aplican con rutina a la caracterización de procesos físicos, su estudio experimental permanece muy limitado. Esta situación podría cambiar gracias a un trabajo reciente publicado en *Physical Review Letters* (DOI: 10.1103/PhysRevLett.126.180603), en el que el Prof. del Campo muestra cómo medirlos en **nubes de gases ultrafríos usadas para la realización de relojes atómicos, simuladores cuánticos, y la realización de condensados de Bose-Einstein en el laboratorio.** En este trabajo, el autor muestra cómo la distancia en el espacio abstracto de estados se puede inferir a partir de fotografías de la distribución espacial del gas. Como indica el Prof. Del Campo, “con ello, se abre la puerta a la medida de estos límites fundamentales en el laboratorio”. El trabajo muestra cómo los límites de evolución restringen las operaciones posibles en estos sistemas y cómo pueden ser utilizados para permitir optimizar su control, minimizando el coste energético para su manipulación.

ORBITALES ATÓMICOS: DEL GLOBO A LA NUBE

El de **orbital atómico** es un concepto clave en cursos introductorios de Física y Mecánica Cuántica en estudios de grado, y también en Bachillerato, principalmente en asignaturas de Química. La resolución de la ecuación de Schrödinger para átomos con un solo electrón proporciona las funciones de onda $\Psi_{n,l,m_l}(x, y, z)$, caracterizadas por los números cuánticos principal, orbital y magnético.

A las funciones de onda (o a determinadas combinaciones lineales de ellas) se les asocia la noción de orbital atómico: **la región del espacio en torno al núcleo donde es más probable encontrar el electrón.**

Como objeto tridimensional, un orbital atómico puede ser complicado de



visualizar para quien se aproxima a él por primera vez, más aún si se tiene en cuenta su naturaleza cuántica, que no es precisamente próxima a la intuición del estudiante. Para informar acerca de la forma, el tamaño, la orientación, los nodos, etc. de los diferentes orbitales atómicos, los libros de texto emplean varias estrategias. Una particularmente popular son los “**diagramas tipo globo**”, en los que las regiones de alta probabilidad de presencia del electrón se representan como objetos de aspecto globular, que los docentes pueden trazar cómodamente en la pizarra.

En un artículo recientemente publicado en la revista *European Journal of Physics* (DOI: 10.1088/1361-6404/ac0103), Manuel I. González, del Departamento de Física de la Universidad de Burgos, **implementa un procedimiento alternativo para representar orbitales atómicos: mediante nubes de puntos cuya densidad es mayor allí donde más elevada es la probabilidad de encontrar al electrón.** Reemplazar las representaciones globulares por nubes otorga al orbital representado un aspecto más realista, sea cual sea la interpretación que le demos a la palabra “realista” en el ámbito de la Mecánica Cuántica.

El procedimiento se articula en torno a tres etapas. En primer lugar, se utiliza una sencilla rutina, basada en el método de Monte Carlo, para generar una nube formada por varios miles de puntos con la misma distribución que la densidad de probabilidad $|\Psi|^2$. En segundo, se utilizan técnicas elementales de álgebra lineal para proyectar los puntos de

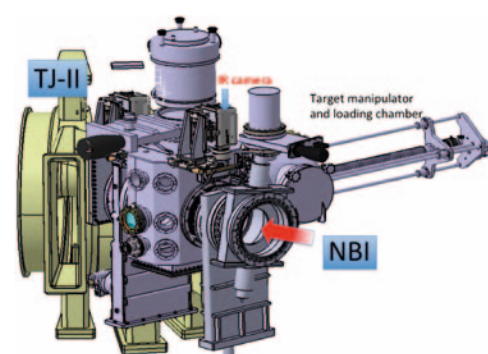
la nube sobre un plano perpendicular a una línea de visión con orientación arbitraria. Por último, se explica cómo elaborar una hoja de cálculo que represente la nube así proyectada.

El Prof. González resalta que la versatilidad de la hoja de cálculo permite modificar rápida y cómodamente la orientación de la línea de visión, lo que le da a la proyección un cierto aire de tridimensionalidad. El artículo aporta como material suplementario **una implementación de la hoja de cálculo descrita.** Para mayor confiabilidad, la hoja no contiene macros ni código susceptible de alojar programas maliciosos.

Una versión modificada de este trabajo, elaborada mediante *software* de modelización en 3D, se puede encontrar en formato vídeo en esta dirección: <https://youtu.be/-2zKvOlJNdo>.

ARRANCA LA INSTALACIÓN OLMAT EN EL LABORATORIO NACIONAL DE FUSIÓN

El pasado 2 de julio se dio por finalizado el arranque de la instalación OLMAT (Optimization of Liquid Metal Advanced Targets [Optimización de blancos avanzados de metal líquido]) en el Laboratorio Nacional de Fusión (LNF) del CIEMAT. La instalación es la única de su especie en España



Esquema de la instalación OLMAT en el Laboratorio Nacional de Fusión.

y de las pocas existentes en Europa y sirve para probar materiales, tanto sólidos como líquidos, en condiciones de flujo de calor extremos, del orden de los que existen en la superficie misma del Sol.

Uno de los mayores retos actuales en el camino hacia un reactor de fusión por confinamiento magnético es la selección de materiales directamen-

te expuestos al plasma en la región de reactor conocida como Divertor. Dichos elementos deben soportar condiciones extremas de flujo de partículas y energía y a su vez producir una contaminación mínima del plasma.

Actualmente, el tungsteno y algunas de sus aleaciones son los candidatos elegidos para el proyecto ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor [Reactor Termonuclear Experimental Internacional]), pero la mayor densidad de potencia, duración del pulso y flujo de neutrones hacen muy cuestionable su uso en un futuro reactor de fusión (DEMO [DEMOstration Power Plant]). Por ello, la comunidad internacional de fusión por confinamiento magnético ha iniciado un ambicioso plan experimental a la búsqueda de conceptos alternativos para los materiales del Divertor de DEMO. Entre dichos conceptos se incluye el uso de los metales líquidos como el litio y el estaño.

Los materiales candidatos se prueban en instalaciones expresamente diseñadas al efecto, ya que su exposición directa en un dispositivo de plasma fusión experimental complica enormemente su manejo y pone en riesgo toda la operación del mismo. Entre las instalaciones europeas más relevantes se encuentran el Magnum PSI, en DIFFER, Eindhoven (Países Bajos), la Judith y PSI-2, en Jülich (Alemania), y la GLADIS en IPP Garching (Alemania). Todas ellas pueden exponer materiales sólidos a densidades de potencia superiores a 20 MW/m², relevantes para DEMO, pero solo la primera ha expuesto también metales líquidos en soporte poroso tipo CPS.

La instalación OLMAT fue concebida en 2016 y presentada al comité de expertos de EuroFusión en diversas ocasiones. Se basa en el uso de los haces de neutros (NBI) usados para el calentamiento del plasma en TJ-II (un *stellarator* flexible de tipo heliac del Laboratorio Nacional de Fusión del CIEMAT) para irradiar materiales a densidades de potencia elevadas en una cámara auxiliar bien diagnosticada. Las muestras pueden ser sólidas o del tipo de metal líquido-CPS y pueden ser calentadas y giradas a vacío. Recientemente se ha procedido a la caracterización exhaustiva de las propiedades de la misma, consiguiéndose los siguientes récords: potencia máxima inyectada en la mues-

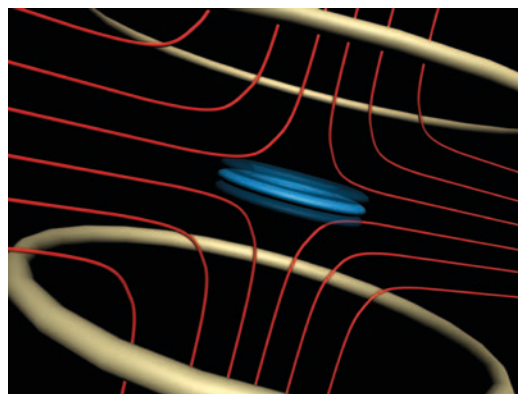
tra: 60 MW/m²; máxima frecuencia de repetición: 2 pulsos por minuto; duración máxima de pulso: 150 ms; número de pulsos consecutivos: 100.

Todo esto hace de OLMAT una nueva instalación europea competitiva y por ello **EuroFusión la ha incorporado al conjunto de instalaciones de prueba de altas cargas térmicas de relevancia para DEMO.**

Próximamente, la instalación contará también con un láser de fibra del kilovatio de alta frecuencia para la simulación de eventos transitorios en el rango del GW/m² (ELMs). La instalación estará abierta para su uso para toda persona interesada en el tratamiento de materiales bajo las condiciones extremas referidas, más allá de su aplicación a Fusión.

ACERCÁNDOSE AL LÍMITE CUÁNTICO CON ANILLOS SUPERCONDUCTORES QUE LEVITAN

Los materiales superconductores desprenden un halo casi mágico. Trenes que levitan sobre los raíles a velocidades nunca vistas en la superficie de la tierra o fantásticos imanes que crean los mayores campos magnéticos en aceleradores de partículas o en experimentos de fusión nuclear se basan en estos materiales. También en escalas más pequeñas la superconductividad juega papeles clave. Varios de los pro-



yectos más avanzados de ordenadores cuánticos llevan como elementos esenciales qubits hechos con materiales superconductores.

Precisamente en el tema de las tecnologías cuánticas, los superconductores están recientemente demostrando

su valor en otro problema de gran importancia. Investigadores de la Universitat Autònoma de Barcelona y de la Universidad de Viena, en un artículo publicado en la revista *Physical Review B* (DOI: 10.1103/PhysRevB.103.174436), han demostrado que **los anillos superconductores puede ser elementos claves en el estudio de la frontera entre el mundo clásico y el cuántico.**

El límite cuántico/clásico es de las fronteras más fructíferas de la física actual. ¿Por qué un objeto macroscópico, como una piedra o una persona, no tiene propiedades cuánticas —como poder estar de alguna manera en dos sitios a la vez o sufrir interferencias como las ondas— y los electrones o protones que forman éstos sí las tienen? Y si ello es así, ¿a qué escala dejan los objetos de comportarse cuánticamente?

Conseguir la coherencia cuántica en objetos macroscópicos (del tamaño de micras, por ejemplo) es actualmente un reto muy importante. Ahora bien, en el mundo macroscópico en que vivimos, mantener un objeto relativamente grande en un estado cuántico es una tarea formidable, ya que cualquier interacción del objeto con el medio circundante (las moléculas de aire que le rodean, la luz que le incide) podría romper el delicado estado cuántico.

La levitación permite aumentar la vida útil de la coherencia cuántica. Un objeto levitando puede aislarse de su entorno mucho más eficientemente que uno que repose en una superficie con la que interacciona física y químicamente. Usando levitación óptica, se han podido enfriar nanoesferas con un diámetro de hasta 100 nm a su estado cuántico fundamental. Sin embargo, allí la coherencia cuántica está limitada en parte por la dispersión de fotones en los haces de luz láser que atrapan las partículas.

“Atrapar superconductores magnéticamente elimina este efecto por completo, ya que el objeto levita en un campo magnético estático sin disipación”, explica Carles Navau, uno de los autores del artículo. El objeto superconductor se desplaza al mínimo del campo magnético para minimizar la energía del sistema y reacciona a los desplazamientos como una masa en un resorte.

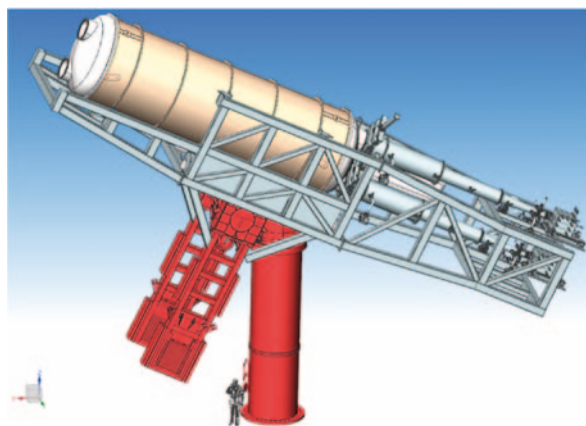
Los autores demuestran que el uso de anillos superconductorer en lugar de objetos compactos, como esferas, agrega un efecto crucial al sistema: la corriente que fluye en el anillo responde al flujo magnético que atraviesa el mismo, creando una fuerza equilibradora adicional. “Este efecto aumenta la fuerza de levitación y permite potenciales de atrapamiento mucho más profundos” comenta Àlvar Sánchez, otro de los autores. **El estudio teórico propociona propuestas de geometrías y dimensiones concretas listas para trasladarlas a experimentos de laboratorio.** La posibilidad de observar efectos cuánticos en objetos de tamaños de hasta $100\ \mu\text{m}$, con las importantes consecuencias que ofrecerían para verificar o falsear teorías actuales de física cuántica a estas escalas, puede convertirse pronto en una realidad.

A LA CAZA DEL AXIÓN CON BABYIAXO

Los axiones son partículas hipotéticas que aparecen en extensiones del Modelo Estándar de Partículas Elementales que incluyen el llamado mecanismo de Peccei-Quinn propuesto para resolver el “problema de la CP-fuerte”, o por qué las interacciones fuertes no parecen violar la simetría de Carga-Paridad (CP), cuando uno esperaría lo contrario. Precisamente en virtud de ese mecanismo, los axiones se producirían en grandes cantidades en una época temprana del Universo, y por eso **son excelentes candidatos a resolver otra de las grandes cuestiones de la física fundamental y cosmología actuales: la naturaleza de la Materia Oscura.**

De existir, los axiones se transformarían en fotones (y viceversa) al atravesar intensos campos electromagnéticos. Esto hace que los núcleos estelares, como el de nuestro Sol, sean potentes emisores de axiones, ofreciendo una oportunidad única para su detección. **Los llamados helioscopios de axiones buscan precisamente la detección de estos axiones solares, a través de su conversión en rayos-X en grandes imanes superconductores.** Es el caso

del experimento CERN Axion Solar Telescope (CAST), actualmente el helioscopio más potente construido hasta la



fecha, que ha operado durante casi dos décadas en el CERN. Sin señal del axión, CAST ha logrado imponer la cota superior más fuerte al acoplo axión-fotón. El sucesor de CAST será el Observatorio Internacional de Axiones (IAXO), un helioscopio de axiones concebido con una sensibilidad diez mil veces mayor que CAST, capaz de explorar un vasto rango de posibles valores de los parámetros de axión. Como primer paso ya se está construyendo una versión de IAXO a escala intermedia, denominado BabyIAXO, ya de dimensiones y potencial imponentes (la sensibilidad de BabyIAXO superará a la de CAST en un factor 100).

La colaboración IAXO cuenta con más de 125 científicos de más de 20 instituciones de todo el mundo. La contribución española es central, en especial la del grupo de la Universidad de Zaragoza, cuyo IP, Igor G. Irastorza, es portavoz científico de la colaboración y receptor de una Advanced Grant del ERC para la construcción y explotación científica de BabyIAXO. Además de éste, participan también grupos españoles del Instituto de Ciencias del Cosmos de la Universidad de Barcelona (ICCUB), del Centro de Física del Cosmos de Aragón en Teruel (CEFCA) y de la Universidad Politécnica de Cartagena.

La colaboración acaba de publicar en la revista *Journal of High Energy Physics* (DOI: 10.1007/JHEP05(2021)137) el diseño conceptual de BabyIAXO, un hito importante para el proyecto, que coincide con los primeros pasos de su construcción. El experimento se alo-

jará en DESY, Hamburgo, como parte del programa de física de axiones que dicha institución está promoviendo desde hace unos años. El imán superconductor de BabyIAXO, el componente central del experimento, ha sido diseñado por expertos del CERN, y su construcción será coordinada también desde este laboratorio. Se espera que BabyIAXO esté listo para empezar a tomar datos en 2024. **Entonces comenzará una nueva etapa en la exploración del axión, con la promesa de un impacto sustancial en el campo, incluido la posibilidad de un descubrimiento, incluso ya con BabyIAXO.**

DESDEBUJANDO “ALFOMBRAS” CUÁNTICAS MEDIANTE DECOHERENCIA

La coherencia es una propiedad fundamental de los sistemas cuánticos, que les permite encontrarse en estados superposición, es decir, en una variedad de posibles estados sin definirse por ninguno de ellos en concreto mientras no se realice una medida. Así, de igual modo que el gato de Schrödinger está vivo y no vivo al mismo tiempo, un bit cuántico o cúbit también puede estar activo y no activo a la vez, a diferencia de un bit clásico, que o está activo o está inactivo. Por esta razón **la coherencia se considera un elemento central en la implementación y desarrollo de las tecnologías cuánticas**, un recurso que conviene preservar para que estas puedan ser operativas y eficientes.

Cuando los sistemas cuánticos interactúan con otros sistemas a su alrededor (un entorno), su coherencia comienza a perderse, dando lugar a comportamientos típicamente clásicos, es decir, el sistema se encuentra en uno de los estados que intervenían en la superposición, pero no en la indefinición en la que se hallaba previamente. Este mecanismo, que denominamos decoherencia, es el que evita que en el mundo ordinario se observen comportamientos cuánticos. Por tanto, con objeto de evitar tales situaciones y, en la medida de lo posible, controlarlas,

es importante contar con modelos que nos permitan describir y evaluar los efectos de la decoherencia.

El sistema cuántico paradigma por excelencia para estudiar la decoherencia es el denominado experimento de

“alfombras cuánticas”, unos patrones espacio-temporales que se originan en cavidades y que surgen de la evolución en el tiempo de densidades asociadas a estados inicialmente localizados dentro de las mismas. Debido a un

complejo proceso interferencial entre modos de la cavidad, se desarrollan a lo largo del tiempo (y el espacio) unas estructuras altamente simétricas, en las que se aprecian recurrencias a diferentes escalas de la señal inicial, pero también resurgimientos fraccionarios de la misma. Como señala el Prof. Sanz, “aprovechando esta propiedad, que mostraría una extremada sensibilidad a cualquier acción de un entorno externo y podría ser replicada en el laboratorio mediante sistemas ópticos en cavidades resonantes, **este sistema puede ser un excelente banco de pruebas para el estudio de la decoherencia, así como de la robustez de tales sistemas cuánticos ante agentes externos**”.

En el estudio, los autores consideran **un sencillo modelo fenomenológico de decoherencia que aúna la acción combinada sobre los modos propios de la cavidad y también sobre las correlaciones espaciales punto a punto dentro de esta,**

generalizando modelos anteriormente empleados en el estudio de las dos rendijas. A pesar de su simplicidad, el estudio muestra, entre otras cosas, cómo, a menos que se consideren condiciones de disipación y, por tanto, redistribución de la energía entre los diferentes modos vibracionales, se consiguen eliminar las propiedades interferenciales, pero no se llega a una localización espacial del sistema, como cabría esperar en un sistema clásico (que no se vería afectado por difracción). Asimismo, también se observa que los términos de decoherencia espacial contribuyen a eliminar simetrías persistentes debidas a las correlaciones entre puntos simétricos dentro de la propia cavidad (simetrías que, por tanto, tienden a preservar cierta coherencia).

El estudio se completa con un análisis del proceso en términos de lo que se conoce como trayectorias bohmianas, **que permiten determinar**

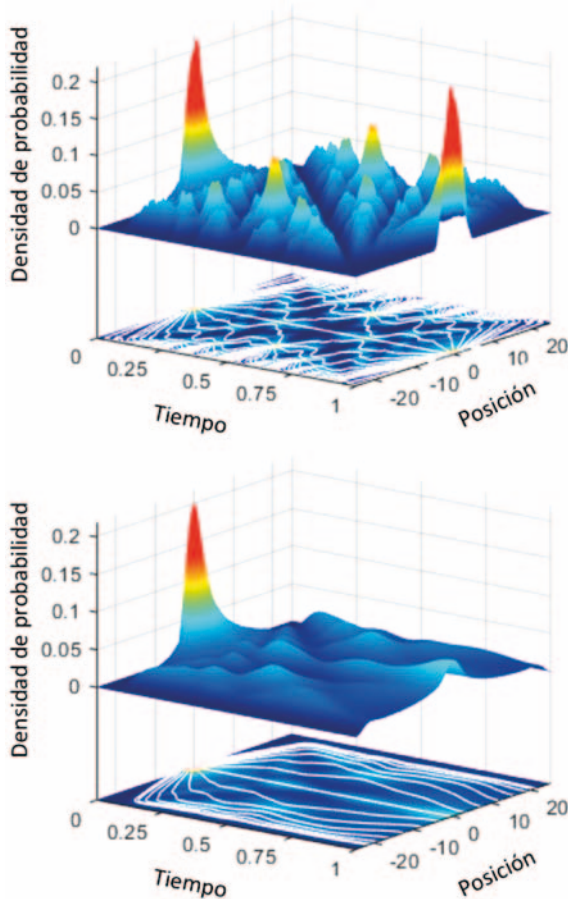
y visualizar los efectos espaciales de la decoherencia a nivel local, es decir, el efecto que tiene esta sobre el degradado de la alfombra en cada punto de la cavidad. Generalmente, cuando se habla de interferencia, siempre se apela a la fase cuántica, que no es un observable en sentido estricto. Mediante estas trayectorias, ligadas a las variaciones espaciales locales de la fase (que se traducen en variaciones de la velocidad de fase), **sí que es posible cuantificar cualquier efecto relacionado con la fase, que ya puede ser medido experimentalmente en el laboratorio a través de lo que se conoce como proceso de medida débil.**

PROPIEDADES DEL CAOS CUÁNTICO EN SISTEMAS DE BOSONES CON INTERACCIÓN

En un sistema clásico, la propiedad definitoria del caos es la sensibilidad exponencial de la dinámica a las condiciones iniciales, lo cual da lugar a grupos de trayectorias itinerantes que exploran el espacio de fases del sistema. El caos está, por tanto, estrechamente relacionado con la ergodicidad, entendida como la capacidad de un sistema de visitar dinámicamente todas las configuraciones compatibles con una energía dada, independientemente de su estado inicial; una propiedad difícil de demostrar, y que solo exhiben unos pocos sistemas.

En sistemas cuánticos con un límite clásico caótico, las propiedades estadísticas del espectro de energías parecen estar descritas por la teoría de matrices aleatorias (RMT), que ha establecido el estándar para certificar caos y ergodicidad en sistemas cuánticos.

En un trabajo publicado en la revista *Physical Review Letters* (DOI: 10.1103/PhysRevLett.126.150601) por investigadores de la Universidad de Friburgo (Alemania) y de la Universidad de Salamanca, se profundiza en el concepto de caos cuántico, y presentamos una **caracterización de la fase caótica en sistemas de bosones con interacción descritos por el hamiltoniano de Bose-Hubbard**, analizando la relación entre las propiedades espectrales y la estructura de los autoestados del sistema.



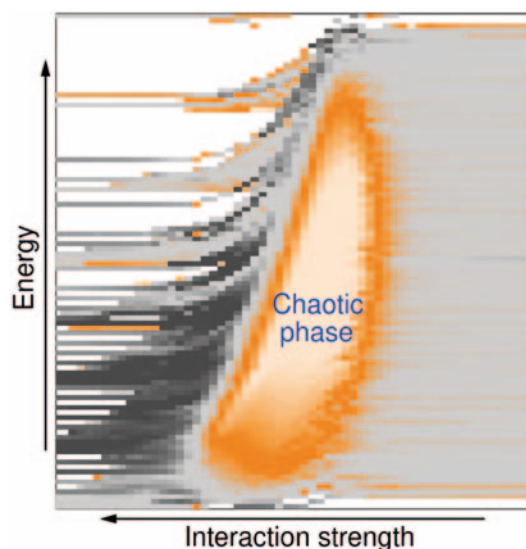
la doble rendija: debido a la coherencia, una partícula cuántica que se enfrenta al dilema de atravesar dos rendijas idénticas solo podrá alcanzar ciertas regiones tras estas, evitando otras. Si se repite el experimento un gran número de veces, se observará una sucesión de regiones donde la partícula tiene alta probabilidad de llegada y otras que le son prácticamente inaccesibles. Sin embargo, basta con que la partícula interactúe con un entorno tras las rendijas para que tal distribución se esfume, emergiendo otra que se asemeja al resultado de lanzar pelotas de tenis a través de dos puertas contiguas.

En un trabajo recientemente publicado en *Physical Review A* (DOI: 10.1103/PhysRevA.103.062210), los investigadores Efrén Honrubia y Ángel S. Sanz, de la Universidad Complutense de Madrid, han considerado un sistema alternativo para la investigación del fenómeno de decoherencia: **las**

Como señala el Prof. Alberto Rodríguez, de la Universidad de Salamanca, “en sistemas cuánticos de muchos cuerpos, los estados propios parecen presentar de manera genérica un carácter multifractal en el espacio de Hilbert”. El análisis de las dimensiones fractales para el sistema bosónico revela una clara **correlación entre el caos espectral, en el sentido RMT, y la presencia de autoestados ergódicos en el espacio de Fock** en el límite termodinámico. El estudio muestra que **la fluctuación de las dimensiones fractales entre autoestados cercanos en energía es una cantidad especialmente eficiente para confirmar la existencia de la fase caótica**.

La comparativa entre los resultados numéricos obtenidos del hamiltonia-

no de Bose-Hubbard y las predicciones analíticas de RMT para el valor esperado y la fluctuación de las dimensiones



fractales arroja un acuerdo sorprendente entre ambos modelos, a pesar

de que la colectividad de RMT considerada no incorpora las correlaciones estructurales en el espacio de Fock de los hamiltonianos de sistemas interactuantes.

El análisis detallado de las distribuciones de dimensiones fractales en la fase caótica, demuestra, no obstante, que, a pesar de la bondad de RMT para describir los dos primeros momentos de la distribución, ambos modelos se alejan estadísticamente de manera inequívoca al aumentar el tamaño del espacio de Hilbert. El Prof. Rodríguez concluye indicando que este resultado establece una conexión con el problema de certificación de características distintivas de sistemas de muchas partículas, y sugiere la interesante **posibilidad de discriminar las particularidades de los sistemas de muchos cuerpos en una fase caótica**, cuyos aspectos fundamentales están, por otra parte, determinados por propiedades universales.

Colección FÍSICA Y CIENCIA PARA TODOS

La colección *Física y Ciencia para todos* pretende ofrecer textos amenos, accesibles y al mismo tiempo científicamente precisos, que informen al lector sobre temas actuales de interés sobre la física y la ciencia en general, incluyendo su enseñanza y su historia.



Real
Sociedad
Española de
Física

R.S.E.F.



FUNDACIÓN
RAMÓN ARECES

<https://rsef.es/publicaciones/coleccion-fisica-y-ciencia-para-todos>

