

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 sus actores¹

CONFINAMIENTO CUÁNTICO DE FERMIONES PESADOS BIDIMENSIONALES

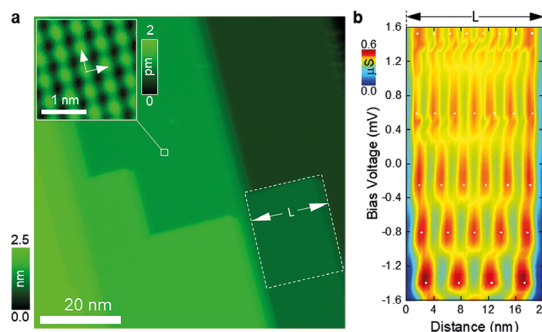
Desde la primera mitad del siglo xx, es sabido que **en la superficie de metales se pueden formar estados electrónicos bidimensionales**. Estos estados producen **patrones que se pueden observar mediante microscopía de efecto túnel e ilustran muy visualmente la naturaleza ondulatoria del electrón**. Las imágenes de la superficie de metales como Au, Ag o Cu muestran a menudo ondas estacionarias en la densidad de estados electrónica que surgen debido a la reflexión parcial de estados electrónicos bidimensionales en terrazas atómicamente planas situadas entre dos escalones. Conocemos bastante bien las propiedades de metales normales como Au, Ag o Cu, en los que los electrones se pueden describir como partículas casi libres. Sin embargo, **todavía no sabemos describir todo lo bien que nos gustaría los fenómenos electrónicos colectivos que se observan en los llamados materiales cuánticos**. Entre estos fenómenos tenemos la superconductividad de alta temperatura, el magnetismo y otros fenómenos exóticos como el efecto Hall cuántico fraccionario o las redes de Kondo.

Las redes de Kondo se encuentran por ejemplo en algunos compuestos que contienen una tierra rara o un actínido en la celda unidad. Estos sistemas se han estudiado por múltiples técnicas, casi siempre macroscópicas, como puede ser calor específico, conductividad térmica o expansión térmica, en las que **se observan comportamientos que son similares a**

los de los electrones libres, pero con electrones cuya masa efectiva es muy elevada, llamados **fermiones pesados**. Una pregunta es si dichos fermiones pesados pueden formar estados electrónicos bidimensionales en la superficie. En un artículo reciente, una colaboración internacional que incluye a los miembros de la RSEF Edwin Herrera, Isabel Guillaumon, Alfredo Levy y Hermann Suderow junto con otros investigadores de Colombia, Francia, Japón y Suecia, **se ha conseguido observar estados de superficie de fermiones pesados**, *Nature* **616, 465-469 (2023)**.

Gracias a un microscopio diseñado y construido enteramente en Madrid, se midió con precisión la red atómica en el compuesto URu_2Si_2 . **Se identificaron terrazas de tamaño atómico donde se observaron fermiones pesados bidimensionales, con una masa efectiva de 17 veces la masa del electrón libre**. Gracias a las aportaciones de grupos teóricos, se ha conseguido identificar el origen de los estados bidimensionales y caracterizar la cuantización de estos cuando están confinados.

Algunos fenómenos siguen sin explicación, como la observación de una rotura de la simetría de la red debido a la formación estados de borde en el escalón o la conexión con una fase de



“orden oculto” que aparece en URu_2Si_2 a bajas temperaturas. Algunos expertos han postulado que este “orden oculto” sería para la física de la materia condensada lo que es la materia oscura para la física de altas energías. Estas cuestiones son el punto de partida para trabajos



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

futuros. Otro sistema de interés es UTe_2 , un superconductor quiral o de onda p. Abordar estos y otros problemas similares desde el punto de vista de la física de superficies es un reto interesante que permitirá aprender muchas cosas nuevas.

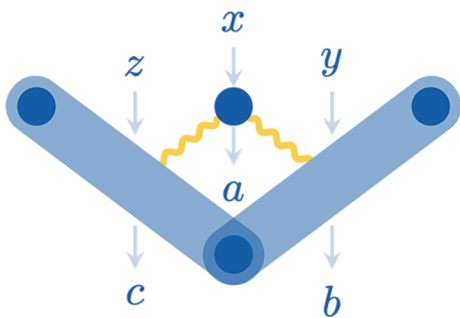
HERRAMIENTAS PARA DETECTAR NO-LOCALIDAD EN ESCENARIOS COMPLEJOS

Uno de los descubrimientos más excitantes de la física moderna, que desafía nuestra concepción de la realidad misma, es la **observación experimental de correlaciones entre los resultados de medir sistemas cuánticos entrelazados que no pueden explicarse a través de un modelo clásico de la realidad**. Brevemente, la conjunción de las afirmaciones “los sistemas físicos tienen propiedades inherentes, y una medida solamente revela estas propiedades” y “un sistema físico es únicamente influido por su entorno más inmediato” es inconsistente con las observaciones producidas en experimentos de física cuántica. La confirmación de este hecho, galardonada con el Premio Nobel de Física de 2022, necesita en primer lugar de una cota a ciertas combinaciones de funciones de correlación bajo la hipótesis de que las afirmaciones ante-

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

riores son ambas correctas. Dichas cotas son conocidas como desigualdades de Bell, en honor a su inventor, y las correlaciones que satisfacen dichas desigualdades son conocidas como “locales”. Por el contrario, las correlaciones que no cumplen dichas desigualdades son “no-locales”.

Además de sus profundas implicaciones filosóficas y fundacionales en la física, la no-localidad tiene diversas aplicaciones en teoría de la información y el sector tecnológico. Las correlaciones no-locales son un recurso valioso



para diferentes tareas relacionadas con el procesamiento y la transmisión de información, siendo, por ejemplo, la base de los protocolos de criptografía cuántica disponibles hoy en día. Normalmente, en estos protocolos cada uno de los participantes tiene un sistema cuántico propio, el cual mide para obtener resultados correlacionados con los de los demás. Pero ¿y si los participantes pudieran medir un sistema común, o enviarse sistemas unos a otros, para establecer las correlaciones? De hecho, IBM ha propuesto este último método para conectar ordenadores cuánticos (DOI:10.1109/tit.2023.3310797).

Para analizar estas situaciones, las herramientas convencionales son de poca ayuda. Científicos del Instituto de Ciencias Matemáticas de Madrid y de la Universidad Jaguelónica de Cracovia trabajan para sobrevenir estas dificultades. Han desarrollado métodos numéricos para obtener test que, de forma análoga a las desigualdades de Bell convencionales, permiten detectar correlaciones no-locales en estos escenarios más generales. Los resultados de la investigación, publicados en *Physical Review Letters* (DOI:10.1103/PhysRevLett.131.080201), muestran que ya en un sistema con tan solo tres componentes, estos nuevos test estadísticos

permiten distinguir correlaciones no-locales en escenarios en los que no era posible con desigualdades de Bell convencionales. Además, las desigualdades desarrolladas permiten detectar cuántos grados de libertad tienen los sistemas de cada componente. Futuros resultados en esta dirección tienen el potencial de impulsar el avance de la información cuántica y su impacto tecnológico.

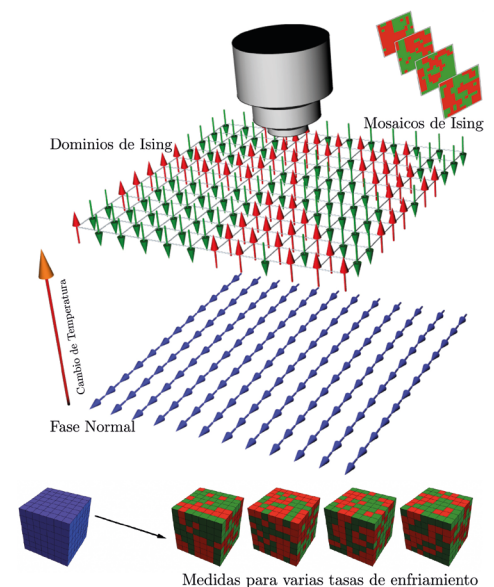
REVELANDO LOS SECRETOS DE ISING: EL MECANISMO KIBBLE-ZUREK EN LA FORMACIÓN DE DOMINIOS

El mecanismo Kibble-Zurek (KZM) es una poderosa teoría que describe la dinámica de no equilibrio de transiciones de fase y predice la densidad de defectos topológicos. T. W. B. Kibble predijo la formación de defectos topológicos en el universo primitivo a escala cosmológica. Independiente, W. H. Zurek derivó la ley de escalado universal que obedece la densidad de defectos en sistemas de materia condensada. Desde la fecha, se han desarrollado una enorme cantidad de esfuerzos teóricos y experimentales para testear, refinar y generalizar el KZM. Se han descubiertos aplicaciones tan diversas como la física de fracturas y la computación cuántica. Sin embargo, estos impresionantes avances no han elucidado si los dominios tipo Ising en sistemas de espines se adhieren a las predicciones del KZM. La falta de evidencia experimental hasta la fecha se puede tratar a la escasez de sistemas materiales apropiados para dicho estudio. Dicho material debe permitir la obtención de imágenes y la comparación de dominios en una amplia gama de velocidades de enfriamiento.

Bordeando todas las barreras, tanto experimentales como teóricas, en un artículo publicado en la revista *Nature Physics* (DOI: 10.1038/s41567-023-02112-5), un grupo de científicos examinaron dos tipos de dominios Ising estructurales tridimensionales. Estudiando los dominios de orden ferro-rotacional en NiTiO_3 y polares en BiTeI . El aporte teórico en esta colaboración internacional con el Center for Emergent Materials (Universidad de Rutgers) corrió por cuenta de dos

científicos de instituciones españolas, el Dr. Fernando J. Gómez-Ruiz (Instituto de Física Fundamental-CSIC) y el catedrático Adolfo del Campo (Donostia International Physics Center y Universidad de Luxemburgo).

Los resultados encontrados fueron intrigantes: Por una parte, el escalado observado en la densidad de dominios con orden ferro-rotacional en NiTiO_3 se alineó bien con la predicción para un modelo de Ising tridimensional, confirmando la validez del KZM para estos dominios. Sin embargo, en el caso de los dominios polares en BiTeI , la pendiente KZM superó con creces el límite teórico. Este sistema constituye un ejemplo exótico en el que las interacciones de largo alcance desempeñan un papel fundamental incrementando el número de defectos no topológicos. El estudio no solo validó el KZM para los dominios de Ising en sistemas de materia condensada, sino que también arrojó luz sobre el comportamiento de estos dominios en relación con el KZM. Reveló un aumento del exponente de la ley de potencia y una posible reducción del exponente crítico dinámico z para las transiciones de fase con interacciones de largo alcance. Mediante el empleo de técnicas

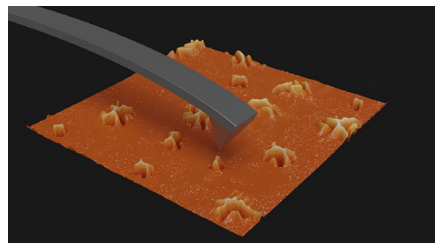


de imagen y métodos analíticos innovadores, los investigadores han establecido con éxito la aplicabilidad del KZM y la universalidad de la dinámica de formación de dominios Ising. Estos hallazgos subrayan el papel importante de las posibles interacciones de largo al-

cance en la determinación la dinámica universal en sistemas no topológicos. Este estudio no solo mejora nuestra comprensión de la dinámica de las transiciones de fase, sino que también abre nuevas vías de exploración de los dominios de Ising, las leyes de universalidad del mecanismo Kibble-Zurek, y el control de defectos para el diseño de materiales funcionales “inteligentes”.

UNA VISIÓN MICROSCÓPICA DE LA TRANSICIÓN VÍTREA EN VIDRIOS ULTRAESTABLES

Los vidrios, pese a ser materiales cotidianos en nuestra vida diaria, poseen una alta complejidad fuertemente ligada a su desorden estructural. La transición de líquido a vidrio que se observa en el laboratorio al disminuir la temperatura es de carácter cinético, pero existe controversia sobre si existe una transición de fase subyacente a una fase termodinámica diferenciada o si, por el contrario, el vidrio es simplemente un estado metaestable, un líquido subenfriado cuyos átomos o moléculas han perdido la movilidad en escalas de



tiempo accesibles experimentalmente. Una de las mayores dificultades para entender la transición líquido ↔ vidrio desde un punto de vista experimental estriba en que sus estructuras son prácticamente indistinguibles, y por ello es extremadamente difícil realizar una “fotografía” del proceso.

En un reciente trabajo, realizado por investigadores del grupo de propiedades térmicas en la nanoescala (UAB/ICN2), en colaboración con colegas del IMB-CNM y UPC, y liderado por el Prof. Javier Rodríguez-Viejo y el Dr. Cristian Rodríguez-Tinoco, se ha desarrollado una nueva metodología que permite visualizar de forma directa la transformación de vidrio a líquido

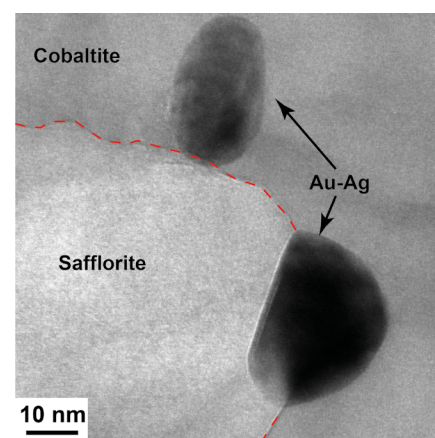
durante un proceso de calentamiento. Para ello han utilizado un vidrio altamente estable obtenido mediante evaporación térmica y crecido en forma de capa fina según una estructura en “sándwich”, entre dos capas más rígidas de otro vidrio con una temperatura de transición vítrea, T_g , superior. De esta manera, cuando la capa intermedia se calienta por encima de su T_g , la aparición de líquido subenfriado induce una inestabilidad mecánica en la capa rígida superior que puede medirse directamente mediante un microscopio de fuerzas atómicas. Así, y por primera vez, se ha observado de manera directa que la desvitrificación del vidrio ultraestable sigue un proceso muy heterogéneo en el que la transformación se inicia de forma local y se expande por crecimiento del líquido consumiendo el vidrio. Las distancias entre los “núcleos” de fase líquida pueden relacionarse con el nivel de heterogeneidad dinámica del sistema. Estas distancias son excepcionalmente grandes en el vidrio ultraestable (μm) en comparación con un vidrio convencional (nm) obtenido directamente enfriando el líquido.

La investigación, publicada recientemente en *Nature Physics* (DOI: 10.1038/s41567-023-02125-0), arroja luz sobre uno de los grandes enigmas de la materia condensada, la transición vítrea, al desarrollar una nueva metodología que permite una visión microscópica en tiempo real de los mecanismos de transformación en vidrios. Una mejor comprensión de la transición vítrea, además de su relevancia conceptual, es importante para mejorar técnicas de criopreservación de proteínas, células y tejidos vivos, la producción de fármacos y dispositivos electrónicos y la fabricación de nuevos materiales desordenados, donde esta transición entre vidrio y líquido juega un papel clave.

FUSIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE ORO POR FLUIDOS HIDROTERMALES EN LA CORTEZA TERRESTRE

El oro, el metal más noble de todos, ha sido históricamente objeto de búsqueda y exploración minera.

Para ello los geólogos han usado distintos modelos para entender la génesis de yacimientos auríferos a lo largo de la historia. Actualmente, la formación de la mayoría de los depósitos de oro se explica por el transporte de este como especie catiónica disuelta dentro de los fluidos hidrotermales (soluciones acuosas con temperaturas entre 50 y 500 °C) responsables de la mineralización. Sin embargo, la caracterización de estos fluidos mineralizantes ha dejado entrever que su capacidad para disolver oro es muy baja y, consecuentemente, las mineralizaciones de oro no pueden ser únicamente producidas por fluidos hidrotermales que transportan el oro disuelto, especialmente aquellas del tipo “Bonanza” (muy ricas en oro). Desde principios de la década de 1990, se detectaron, por primera vez en este tipo de depósitos minerales, nanopartículas de oro. Su presencia originó la hipótesis de que el oro podría ser transportado como nanopartículas suspendidas en el fluido hidrotermal en vez de ser transportado únicamente como especie disuelta. Sin embargo, cómo estas nanopartículas se forman y cómo estas interactúan con el fluido hidrotermal es aún una incógnita. En un artículo publicado en el marco del doctorado de Diego



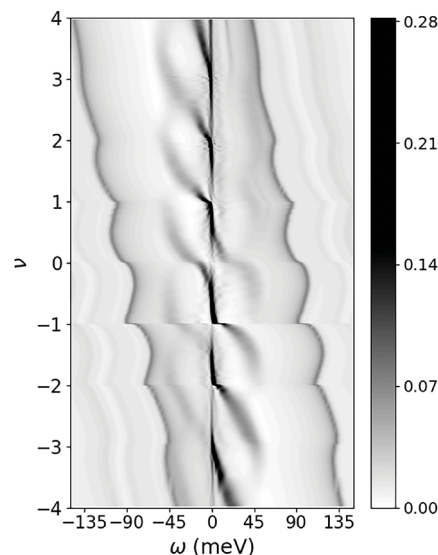
Domínguez Carretero, de la Universitat de Barcelona, en conjunto con investigadores de la Universidad de Granada y del Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra-CSIC (DOI: 10.1038/s41598-023-35066-y), se sugiere cómo nanopartículas de oro, estudiadas mediante microscopía electrónica de transmisión de alta resolución, expuestas a un fluido hidrotermal, tienen la capacidad de

fundirse y producir nanofundidos de oro. Este proceso ha sido “fossilizado” en las muestras estudiadas y permite extraer la conclusión de que las nanopartículas de oro expuestas a fluidos hidrotermales tienen la capacidad de fundirse y producir nanofundidos de oro. En concreto, se muestra la liberación de las nanopartículas del mineral en el que estaban incluidas, la exposición al fluido hidrotermal (cuya temperatura se estima entre 400 y 500 °C) y posterior fusión, y finalmente, la **removilización mediante nanofundidos auríferos inmiscibles con el fluido hidrotermal.** Hasta el momento, la única forma de producir cualquier tipo de nanofundidos ricos en oro requería de otros elementos, como el bismuto, el telurio o el antimonio, los cuales no siempre se concentran junto con el oro en muchos de los depósitos minerales. Consecuentemente, nuestro trabajo detalla la secuencia de transformación de nanopartículas de oro a nanofundidos sin requerir de otros elementos como el Bi, el Te o el Sb. Esta investigación tiene **importantes repercusiones para entender el origen y la evolución de las nanopartículas de oro dentro de los fluidos hidrotermales responsables de la génesis de los depósitos de oro.** Asimismo, este trabajo también tiene implicaciones para la **temperatura de fusión de nanopartículas de oro de tamaños entre alguna decena y algún centenar de nanómetros, ya que sus cambios morfológicos implican que pueden fundir a temperaturas notablemente inferiores a las dictaminadas mediante ecuaciones termodinámicas o técnicas de medición no *in situ*.**

CASCADAS SIN RUPTURA DE SIMETRÍA EN GRAFENO DE ÁNGULO MÁGICO

El descubrimiento de superconductividad y fases correlacionadas en grafeno bicapa de ángulo mágico (dos capas de grafeno rotadas 1° una con respecto a la otra) ha revelado la existencia de una gran variedad de estados electrónicos en multicapas de grafeno y otros materiales bidimensionales. Al rotar una capa de grafeno

con respecto a la otra se forma una heteroestructura de moiré con una celda unidad de miles de átomos y las bandas electrónicas (que nos dicen las energías de los electrones) se hacen muy estrechas (bandas planas). Esto implica que la energía cinética de los electrones es mucho menor que lo habitual en gra-



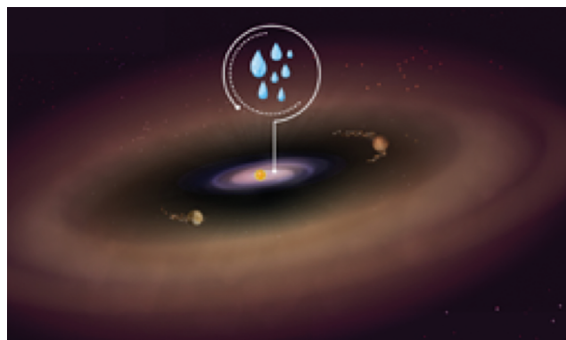
feno y puede competir con la energía de repulsión entre electrones. Es decir, que estas bicapas son sistemas de electrones fuertemente correlacionados, como los superconductores de alta temperatura, los fermiones pesados, etc. Como consecuencia de las correlaciones electrónicas aparecen múltiples estados ordenados, entre los que se han observado estados ferromagnéticos, topológicos, con modulación de carga o coherencia de valle. **De entre los fenómenos detectados experimentalmente el más resiliente en energía, temperatura y ángulo de rotación, es el de las cascadas: una fuerte reorganización de la densidad electrónica** en medidas de microscopía túnel de barrido (STM) que se reinicia a llenados enteros y viene acompañada de picos asimétricos en la compresibilidad. **Las teorías anteriores propuestas para explicar las cascadas involucraban, de una forma u otra, estados con algún tipo de orden (ruptura de simetría),** como el ferromagnetismo o la coherencia de valle, entre otros. Algunos de los órdenes propuestos se habían observado, pero sólo a temperaturas de pocos kelvin, mientras que las cascadas se observan hasta decenas de kelvin. Por otra parte, cuando las correlaciones entre electrones son muy fuertes no solamente

emergen fases ordenadas a baja temperatura, sino que el estado “normal” a mayor temperatura es diferente de lo que esperaríamos en un metal caracterizado por bandas electrónicas bien definidas. Las correlaciones modifican las bandas de energía que además pierden coherencia (se desdibujan). Estos efectos suelen manifestarse de forma más radical cuando las bandas se llenan con un número entero de electrones.

En un trabajo reciente publicado en *Nature Communications* (DOI: 10.1038/s41467-023-40754-4), Leni Bascones y María José Calderón (ICMM-CSIC), en colaboración con Anushree Datta (ICMM-CSIC y U. París) y Alberto Camjayi (U. Buenos Aires), han estudiado la estructura electrónica del grafeno bicapa rotado con la teoría de campo medio dinámico (DMFT por sus siglas en inglés) que trata las interacciones entre electrones de forma no perturbativa. El modelo más simple que incluye las simetrías y topología de las bandas planas recuerda al de los sistemas de fermiones pesados: algunos electrones muy fuertemente correlacionados y tendencia a localizarse acoplados a otros menos correlacionados. **El cálculo, que reproduce la reorganización de la densidad de estados y de la compresibilidad encontrada experimentalmente, demuestra que las cascadas son una propiedad del estado normal del grafeno bicapa de ángulo mágico y no de la formación de estados ordenados.** Las implicaciones del trabajo van más allá de los experimentos descritos. La reorganización de los estados electrónicos afecta a todas las medidas de grafeno de ángulo mágico tanto en el estado normal como en las fases de baja temperatura y debe tenerse en cuenta en los modelos que predicen la aparición de estas fases, incluyendo la superconductividad.

EL AGUA DESCUBIERTA EN LA ZONA DE FORMACIÓN DE PLANETAS ROCOSOS OFRECE PISTAS SOBRE LA HABITABILIDAD

Utilizando el instrumento MIRI (Mid-InfraRed Instrument) a bordo del telescopio espacial James Webb, la colaboración de in-



vestigación MINDS dirigida por MPIA descubrió agua en la región interior de un disco de gas y polvo alrededor de la joven estrella PDS 70, que alberga al menos dos planetas. En el sistema solar, esta es la región en la que los planetas rocosos orbitan alrededor del Sol. Según el análisis, el agua se encuentra en forma de vapor, a una temperatura de unos 330 °C.

PDS 70 es el primer disco relativamente antiguo (~5,4 millones de años) en el que los astrónomos han encontrado agua. Con el tiempo, el contenido de gas y polvo de los discos de formación planetaria disminuye. O bien la radiación o el viento de la estrella central eliminan material como polvo y gas, o bien el polvo crece hasta convertirse en objetos más grandes que acaban formando planetas. Como en estudios anteriores no se detectó agua en las regiones centrales de discos con una evolución similar, se sospechaba que podría no sobrevivir a la dura radiación estelar, dando lugar a entornos secos y rocosos de formación de planetas. **La observación de PDS 70 con el JWST demuestra que los perímetros interiores de los discos evolucionados y sin polvo podrían no ser tan secos después de todo.**

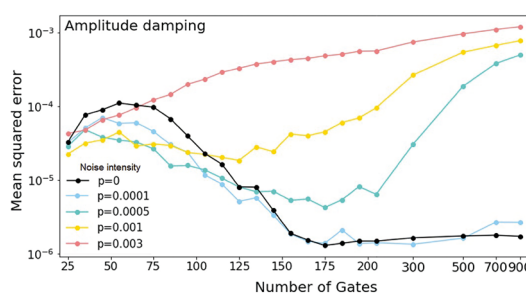
El agua es esencial para la vida en la Tierra. Sin embargo, aún se debate cómo llegó a nuestro planeta y si ese proceso también podría hacer habitables los exoplanetas rocosos en torno a otras estrellas. El mecanismo preferido es el suministro por parte de asteroides portadores de agua que bombardean la superficie de un planeta joven, pero es posible que ahora existan pruebas de que el agua también podría ser uno de los ingredientes iniciales de los planetas rocosos. **Cualquier planeta rocoso producido en el disco interior se beneficiaría de una importante reserva local de agua, lo que mejoraría**

las posibilidades de habitabilidad más adelante.

El origen del agua encontrada es todavía un misterio. Podría ser el remanente de una nebulosa inicialmente rica en agua que precedió a la fase de disco. Al menos, una parte del agua detectada cerca de PDS 70 podría haber sobrevivido. Otra fuente podría ser el gas que entra por los bordes exteriores del disco PDS 70. El trabajo futuro será averiguar qué mecanismo es el decisivo en el mantenimiento de la reserva de agua del disco PDS 70.

EL RUIDO: UN ALIADO INESPERADO PARA LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA

Los ordenadores cuánticos son parte integrante de la llamada segunda revolución cuántica, pero **están fuertemente limitados por el ruido. Un equipo de investigadores de la UAM, compuesto por el Prof. Florentino Borondo (miembro de la RSEF) y la Dra. Laia Domingo, en colaboración con el Dr. Gabriel Carlo, de la CNEA argentina, propone usar el ruido para mejorar los resultados de**



algoritmos cuánticos en un artículo publicado recientemente en la revista *Scientific Reports* (DOI:10.1038/s41598-023-35461-5), lo que abre nuevas posibilidades en el desarrollo de la computación cuántica.

El ruido es el causante de la aparición de errores que se propagan cuando se ejecutan algoritmos complejos, limitando el potencial de la computación cuántica. Multitud de equipos trabajan intensamente para superar esta barrera, concentrando sus esfuerzos principalmente en la corrección o mitigación de errores, y en el diseño de

algoritmos más eficaces. En el artículo citado anteriormente se da una vuelta de tuerca a la cuestión, proponiendo una solución parcial alternativa: usar el ruido para mejorar los resultados de algoritmos cuánticos. **Este trabajo muestra que la presencia de ruido en los ordenadores cuánticos puede ser beneficiosa para los resultados de un importante algoritmo de aprendizaje automático (*machine learning*) conocido como *quantum reservoir computing*.** Este algoritmo realiza predicciones usando sistemas cuánticos compuestos por un conjunto aleatorio optimizado de puertas lógicas, para extraer información del sistema. De este modo, se aplica a la resolución de problemas muy diversos, como cálculos químico-cuánticos, series temporales o diseño de fármacos, como se muestra en otra reciente publicación del mismo grupo de investigación (doi: 10.1038/s41598-023-45269-y).

La idea detrás del *quantum reservoir computing* es utilizar el espacio de Hilbert, donde “viven” los estados cuánticos, para extraer propiedades esenciales de los datos. Así, usando las propiedades cuánticas de superposición y entrelazamiento, se obtiene información útil de los datos, que alimenta un modelo de aprendizaje automático, el cual hace la predicción final.

Este estudio concluye que algunos tipos de ruido, como el llamado *amplitude damping noise*, mejoran la calidad de los resultados del *quantum reservoir computing*. Por tanto, no solo es innecesario corregir este tipo de ruido, sino que podría ser beneficioso para los cálculos cuánticos.

El estudio también proporciona una demostración teórica que explica este fenómeno. Usando matrices de densidad y los canales cuánticos se ilustra cómo el ruido de *amplitude damping* explora de manera más efectiva el espacio de operadores cuánticos. Esto facilita la extracción de las propiedades más complejas y valiosas de los datos.

En resumen, el hallazgo ofrece una nueva perspectiva sobre los mecanismos físicos inherentes en los dispositivos cuánticos. Además, proporciona sólidas pautas prácticas para lograr una implementación exitosa del procesamiento de información cuántica en la tecnología actual.