

MATEMÁTICAS Y FÍSICA

UN EXPERIMENTO EXPLICA LA FORMACIÓN

de elementos pesados en el cosmos

Instituto de Física Corpuscular (IFIC, CSIC-UV)

Un equipo internacional liderado por el IFIC, centro mixto del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y la Universitat de València (UV), ha conseguido un hito en la exploración del origen de la materia del universo. Este equipo ha medido, por primera vez, las propiedades de desintegración de 37 núcleos atómicos extremadamente raros y fugaces, que sólo existen durante fracciones de segundo y no se encuentran de forma natural en la Tierra. El trabajo, publicado en *Physical Review Letters*, aporta nueva información para descifrar uno de los grandes enigmas de la física moderna: ¿cómo se forman los elementos más pesados que el hierro?

La respuesta a este enigma apunta a fenómenos extremos como la fusión de estrellas de neutrones, y el nuevo trabajo del IFIC proporciona datos cruciales para desarrollar los modelos que describen ese proceso. Los 37 núcleos atómicos estudiados se sitúan en una región inexplorada cerca del níquel-78, pieza clave para entender la estructura de los núcleos atómicos pesados. Los elementos más ligeros del universo, como el hidrógeno y el helio, se formaron justo después del Big Bang. Pero los elementos más pesados como la plata, el oro o el uranio, lo hicieron en escenarios mucho más extremos como explosiones de supernova o la fusión de estrellas de neutrones.

El universo como gran fábrica de elementos

Estos fenómenos son muy difíciles de detectar y de estudiar experimentalmente. Un punto de

inflexión llegó en 2017, cuando los experimentos LIGO y VIRGO detectaron por primera vez ondas gravitacionales resultantes de una fusión entre dos estrellas de neutrones, que generan explosiones llamadas kilonovas. Al dirigir sus telescopios a la región del cielo señalada, los astrónomos observaron una señal luminosa cuyo comportamiento coincidía con la teoría: la desintegración radiactiva de elementos pesados recién formados alimentaba esa luz. En análisis posteriores, se identificaron elementos como estroncio, itrio y circonio. Por primera vez, se observaba en directo la síntesis de elementos pesados en un evento cósmico.

El problema es que muchos de los núcleos atómicos que participan en estos procesos no existen de manera estable en la Tierra y duran apenas una fracción de segundo, por lo que nunca se habían podido estudiar... hasta ahora. El equipo científico internacional, liderado por el Grupo de Espectroscopia Gamma y Neutrones del IFIC, ha conseguido un avance significativo: ha logrado medir, por primera vez, propiedades fundamentales de 37 núcleos atómicos exóticos que permiten predecir con más precisión cómo se forman elementos más pesados que el hierro como el itrio, el circonio, el niobio o el molibdeno, con importantes aplicaciones industriales.

El hallazgo combina la producción de núcleos exóticos de la Instalación de Haces Radioactivos del Centro RIKEN-Nishina, en Japón, con la alta eficiencia de un detector de neutrones desarrollado por el grupo de investigación del IFIC y la Universitat Politècnica de Catalunya. Otros



Miembros del equipo de investigación durante la toma de datos en RIKEN (Japón).



equipos de la Universidad Técnica de Darmstadt (Alemania) y la UV colaboran en los cálculos de nucleosíntesis, la formación de elementos.

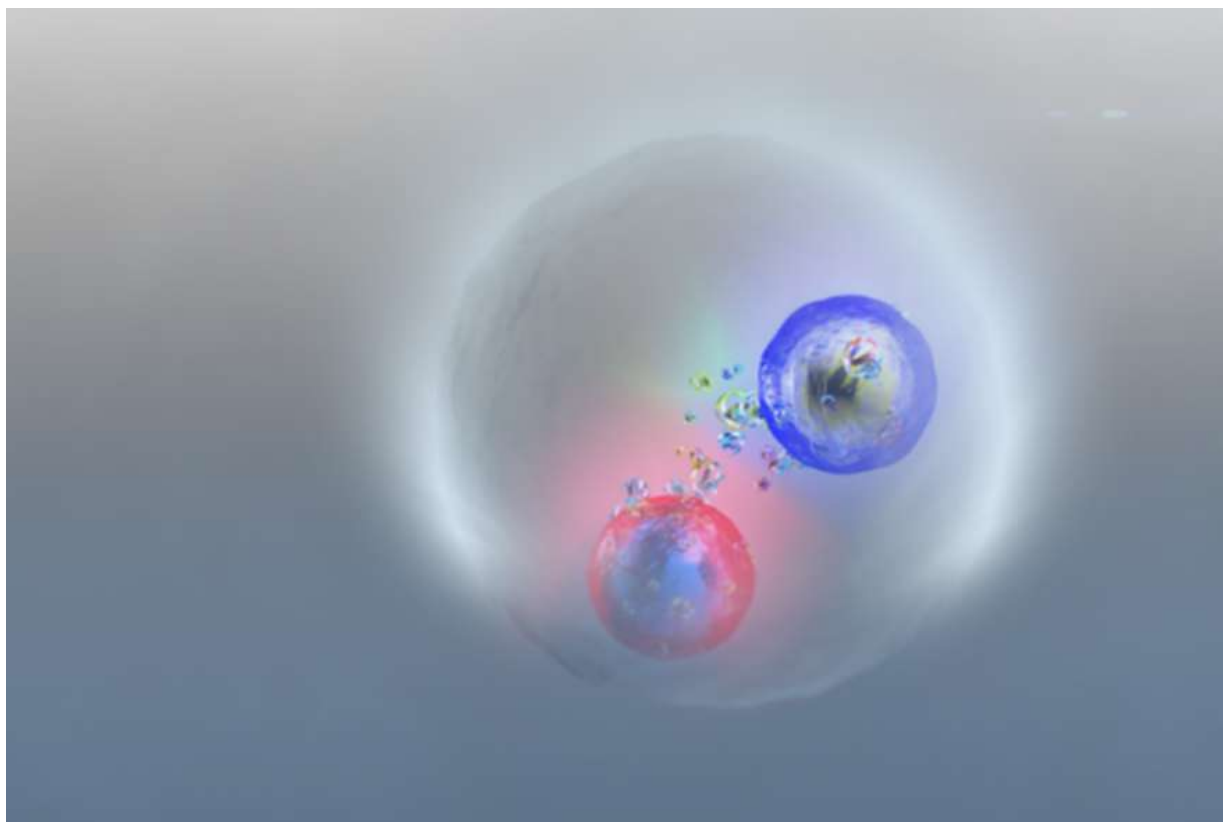
Una producción de hasta un 70% más de elementos de lo que se pensaba

Los resultados del trabajo muestran que el proceso de síntesis y dispersión de elementos pesados, alimentado por el viento de neutrinos, produce los núcleos medidos en este trabajo y ocurre en el breve lapso de tiempo que transcurre antes de que el sistema colapse en un agujero negro. El uso de los nuevos datos nucleares muestra un incremento significativo en la producción de los elementos identificados en el evento de 2017 respecto a estimaciones anteriores. Las nuevas mediciones muestran que estos elementos podrían formarse en una cantidad superior a la que se pensaba anteriormente, alrededor

de un 50 % a 70 % más cantidad de lo que se pensaba.

Álvaro Tolosa Delgado, primer autor del trabajo e investigador del CERN, comenta que «existía la opinión previa de que las propiedades de los núcleos que hemos estudiado tendrían escaso impacto en las abundancias. Esto queda desmentido con nuestro trabajo, que apunta a la necesidad ampliar este tipo de medidas a otros núcleos».

Por su parte, José Luis Taín, investigador del CSIC en el IFIC que lidera el experimento, apunta: «la evolución de la abundancia de elementos químicos en el universo es realmente compleja, con una variedad de procesos contribuyendo al resultado final. Combinando observaciones astronómicas, experimentos de física nuclear y modelos astrofísicos estamos más cerca de resolver el rompecabezas».



OBSERVAN ESTADO CUÁNTICO jamás visto en el Gran Colisionador de Hadrones

La colaboración internacional del experimento ATLAS en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN informó a principios de julio de la observación del toponium, unión de partículas elementales más pesadas, el quark top. En física, es lo que se conoce como un estado cuasi ligado, una unión temporal entre partículas que es inestable y se acaba desintegrando. Durante décadas, se pensó que este estado era imposible de detectar.

Ahora, el experimento ATLAS confirma la observación del toponium realizada por el experimento CMS también en el LHC. Un grupo del Instituto de Física Corpuscular (IFIC), centro mixto del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y la Universitat de València (UV), ha jugado un papel importante en la detección de este nuevo sistema cuántico.

El investigador del CSIC en el IFIC, Marcel Vos, ha contribuido al proceso de revisión de este resultado. Vos también coordina el LHC Top Working Group, el equipo encargado de todos los resultados relacionados con el quark top en el LHC.

«Desde la detección del quark top en 1995, la producción y propiedades de esta partícula y su antipartícula se han estudiado con mucho detalle», explica Vos.

«Durante años, se creía que un estado ligado como el toponium sería indetectable, puesto que los efectos de esta unión eran demasiado sutiles. Pero los análisis de ATLAS y CMS demuestran que el LHC ha sido capaz de detectar esta efímera unión entre un quark top y un antiquark top, lo que resultaría en este nuevo estado cuasi ligado que ya se predijo en 1990, incluso antes del descubrimiento del quark top», afirma el científico del CSIC.

A pesar de la evidencia clara de encontrarse ante un fenómeno inesperado, el origen último de toponium aún debe esclarecerse. Una posible explicación alternativa sería la existencia de una nueva partícula con una masa cercana al doble de la del quark top. Estos resultados muestran que todavía queda mucho por explorar en el Modelo Estándar de la física de partículas, la teoría que mejor describe el universo visible.

DESCUBRIMIENTO DEL objeto interestelar 3I/ATLAS

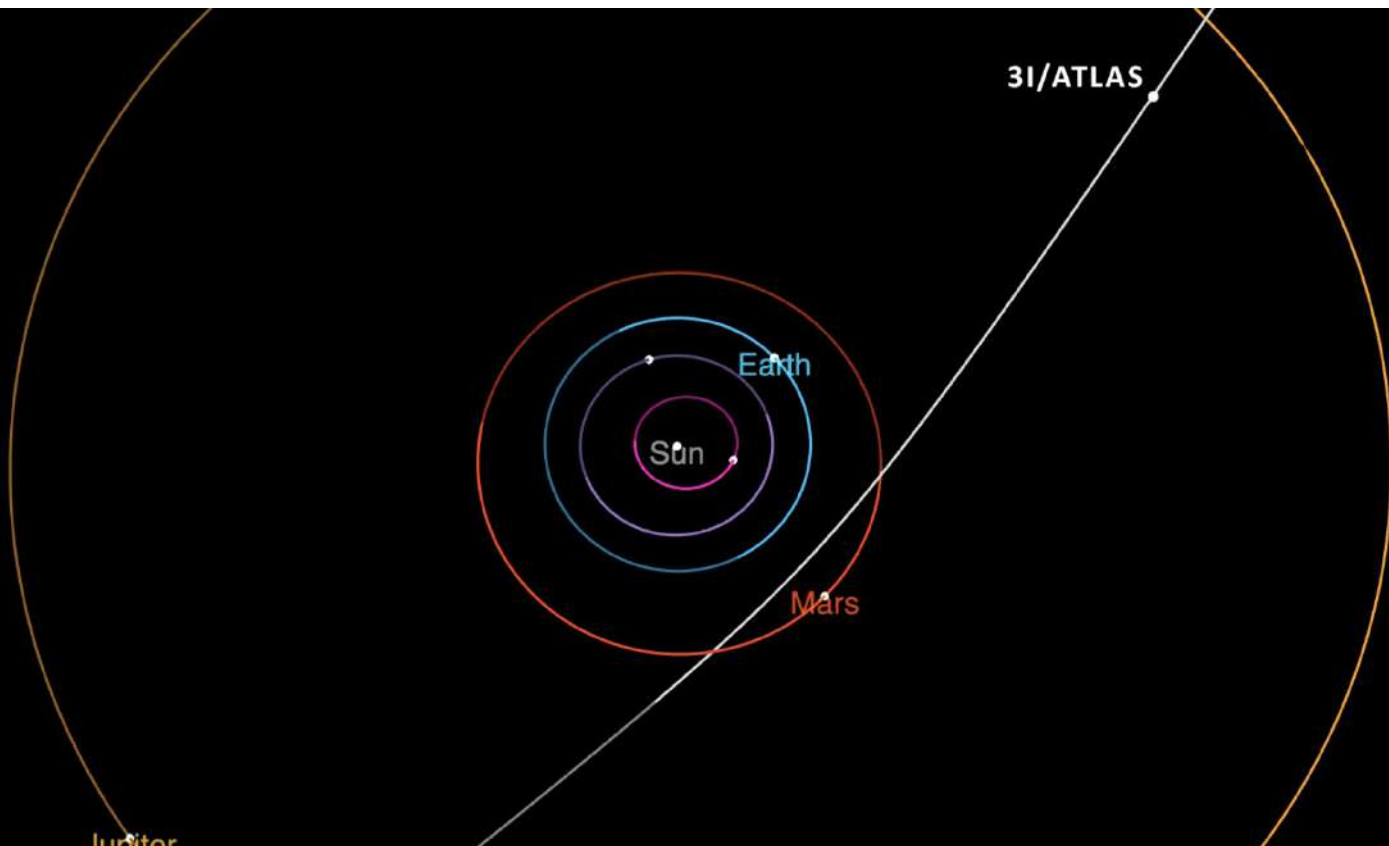
Desde que el 01 de julio de 2025 se lanzó la noticia del descubrimiento de un nuevo objeto interestelar, el tercero de su tipo conocido hasta la fecha, astrónomos de la Universidad Estatal de Michigan (MSU), junto con un equipo de investigadores internacional del que forma parte Toni Santana-Ros, del Instituto de Física Aplicada a las Ciencias y las Tecnologías de la Universidad de Alicante (UA) y el Instituto de Ciencias del Cosmos de la Universitat de Barcelona (ICCUB), enfocaron sus esfuerzos en recopilar datos de este exótico cuerpo. Así, el equipo ha publicado el primer artículo científico sobre lo que se conoce hasta el momento del bautizado como 3I/ATLAS, en honor a la red de telescopios que descubrió el objeto el Sistema de Última Alerta de Impacto Terrestre de Asteroides (ATLAS) de la NASA. ATLAS consta de cuatro telescopios, dos en Hawai, uno en Chile y uno en Sudáfrica, que escanean automáticamente todo el cielo varias veces cada noche en busca de objetos en movimiento.

Según detalla Santana-Ros, «el cuerpo se encuentra lejos de la Tierra, a 3 unidades astronómicas, es decir, unos 500 millones de kilómetros, y su trayectoria no supone ningún riesgo de impacto con este planeta».

Los expertos confirman que 3I/ATLAS es apenas el tercer objeto interestelar detectado pasando por el sistema solar y que es posible, aunque está por confirmar, que emita gas como otras cometas. Entre otros datos, también señalan que se mueve a una velocidad vertiginosa de 216.000 km por hora con respecto al Sol, y sigue una trayectoria orbital con forma de bumerán o hipérbola, con la que abandonará el sistema solar y no regresará.

Los astrónomos esperan que el Telescopio Espacial James Webb y el Telescopio Espacial Hubble revelen más información sobre su tamaño, composición, rotación y cómo reacciona a la creciente radiación solar.

«Estudiar objetos interestelares que provienen de fuera de nuestro sistema solar representa una oportunidad para avanzar en la comprensión de cómo se forman y evolucionan los sistemas planetarios», añade Santana-Ros.



EN BUSCA DE LA MATERIA OSCURA: UN NUEVO ENFOQUE PARA DETECTAR LO INVISIBLE

La materia oscura es uno de los mayores misterios del universo. No emite ni refleja luz, pero su existencia se deduce por los efectos gravitatorios que ejerce sobre la materia visible: influye en la rotación de las galaxias, desvía la luz y condiciona la estructura a gran escala del cosmos. Se estima que representa cerca del 85 % del total de la materia.

Aunque se ha intentado detectarla durante décadas, sus partículas siguen sin identificarse. La mayoría de teorías propone que están formadas por WIMPs (*Weakly Interacting Massive Particles*), que apenas interactúan con la materia normal. Esta naturaleza escurridiza ha llevado a explorar estrategias para analizarlas: producirlas en

colisionadores, captarlas en detectores subterráneos o buscar señales indirectas en el espacio.

La búsqueda no ha dado resultados concluyentes, por lo que se necesitan nuevas ideas y tecnologías más sensibles. Los modelos que predicen partículas como el Higgsino, explorado en un estudio coliderado por José Zurita, del Instituto de Física Corpuscular (IFIC), centro mixto del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y la Universitat de València (UV), ofrecen vías prometedoras para detectar esas sutiles señales que podrían revelar la naturaleza de la materia oscura.

Uno de los grandes retos en la búsqueda de materia



oscura es que, si realmente está formada por partículas como el Higgsino, predicha por algunas extensiones teóricas del Modelo Estándar de la física de partículas, sus señales en los detectores serían extremadamente tenues, hasta el punto de pasar desapercibidas en los experimentos actuales.

En modelos teóricos, se plantea la existencia de varias partículas dentro del llamado sector oscuro, una especie de universo paralelo cuyas componentes interactúan muy débilmente con la materia conocida. Estas partículas podrían estar relacionadas entre sí mediante fuerzas propias, distintas de las del mundo visible.

Una característica común en estos escenarios es que las partículas oscuras tendrían masas muy similares entre sí, lo que complica su detección. Cuando una de ellas, ligeramente más pesada, se desintegra en otra más estable, posible candidata a materia oscura, sólo libera una cantidad mínima de energía, a menudo en forma de una traza tenue o de una partícula ligera como un pión.

Ese tipo de señal es tan débil que, en colisionadores como el Gran Colisionador de Hadrones (LHC), del CERN, suele perderse entre el ruido de otras interacciones, ya que los piones suelen ser productos secundarios comunes en colisiones de partículas más pesadas. En este contexto, pueden ser una de las pocas huellas visibles que delaten la existencia del sector oscuro. Detectar piones de baja energía, aunque complejo, puede ser clave para descubrir nuevas partículas y avanzar en la búsqueda de la materia oscura.

El nuevo trabajo coliderado por el IFIC propone un enfoque innovador: aprovechar las condiciones más limpias y controladas de un posible colisionador de muones, una infraestructura aún en fase de diseño, pero que gana cada vez más apoyo y entusiasmo dentro de la comunidad internacional. Este tipo de colisionador permitiría registrar con mayor precisión esos rastros débiles que hoy resultan invisibles.

«El pure Higgsino ha sido considerado tradicionalmente como un objetivo para futuros aceleradores, como el Future Circular Collider (FCC-hh) o un colisionador de muones. En ambos casos, se espera que esta partícula se manifieste como una traza cargada que desaparece repentinamente al desintegrarse en una partícula neutra, el neutralino, y un pión de baja energía, que normalmente se descarta», explica Zurita.

Los investigadores han demostrado que es posible abordar la existencia del Higgsino mediante el análisis de los productos de su posible desintegración. Una de las partículas involucradas en el proceso, el chargino, se desintegraría en un neutralino más un pión de baja energía. Son estos piones de baja energía los que dejan unas trazas tenues que podrían ser detectados en los colisionadores de muones, más sensibles a partículas de tan baja energía.

Esta búsqueda del Higgsino tiene un gran interés porque podría confirmar un escenario teórico capaz de dar cuenta de la materia oscura. El neutralino, partícula muy estable y con una interacción muy débil con la materia ordinaria, podría ser uno de los ingredientes, si no el único, de la materia oscura que copa el universo.

LA SIMETRÍA DEL UNIVERSO

a prueba

Universitat de València (UV)

Un trabajo liderado por investigadores de la UV, el Instituto Galego de Física de Altas Enerxías (IGFAE), centro mixto de la Universidade de Santiago de Compostela y la Xunta de Galicia, y la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M) investiga la posible existencia de asimetrías en el universo a través del análisis del sentido gíatorio de las fusiones de agujeros negros. El artículo se ha publicado en la revista científica *Physical Review Letters*, una de las más prestigiosas del mundo en el ámbito de la física, y abre una puerta para investigar a fondo la posibilidad de que exista algún desequilibrio en la dirección de giro de estos eventos, uno de los fenómenos más violentos que se producen en el cosmos, causado por una asimetría del universo a gran escala.

El Principio Cosmológico, a prueba

La cosmología moderna postula que, observado a gran escala, el universo debe ser homogéneo e isótropo. Es decir, sus propiedades no dependen ni del punto desde el que lo observemos ni de en qué dirección lo hagamos. Esto implica que tampoco deberían existir un balance entre objetos que giren «a derechas» y «a izquierdas», lo que se conoce como simetría espejo. En los últimos años, numerosas investigaciones en el campo de la cosmología han intentado encontrar grietas en este espejo buscando evidencias de posibles asimetrías y desequilibrios.

En este caso, el trabajo del equipo liderado por Juan Calderón Bustillo, investigador del programa Ramón y Cajal en el IGFAE, ha utilizado

datos de 47 fusiones de agujeros negros observadas por los detectores de ondas gravitacionales LIGO y Virgo. Con estos datos, se ha intentado verificar si las ondas gravitacionales producidas por estas fusiones preservan, o no, la simetría espejo a gran escala.

Golpear con efecto un balón de fútbol

Para explicar el estudio, Juan Calderón recurre a una analogía futbolística: «Cuando golpeas el balón con la parte interior del pie derecho (con rosca), el balón rota en sentido contrario a las agujas del reloj mientras viaja por el aire». Sin embargo, en determinadas ocasiones, se utiliza como recurso el golpeo con la parte exterior del pie (la técnica conocida como trivela que ejecutan con maestría jugadores como Lamine Yamal o Luka Modric). En este caso, el balón comienza a rotar en sentido contrario.

«El golpeo de interior es el más habitual en el fútbol, ya que facilita el control de la trayectoria del balón, lo que hace que haya muchos más balones girando en un sentido que en el otro, creando una asimetría», destaca Calderón.

De modo similar, «si pensamos en un partido de fútbol cósmico en el que los pases que se observan son las fusiones de agujeros negros, podremos ver eventos que giran en el sentido de las agujas del reloj, o en el sentido contrario», comenta Adrián del Río, investigador del programa César Nombela en la UC3M y coautor del artículo. «Pero si el universo es realmente neutral, como sostienen los datos, no debería haber





desequilibrios; es decir, existiría la misma proporción de agujeros negros en el sentido de las agujas del reloj y en sentido contrario».

El estudio apunta que, por ahora, esta simetría se mantiene. «Aunque los datos apoyan la idea de un universo equilibrado, aún es pronto para afirmarlo, ya que nuestra estadística es muy limitada», apunta Nicolás Sanchis, investigador Ramón y Cajal en la UV y coautor del trabajo. En el futuro, a medida que observemos más y más fusiones de agujeros negros, podremos medir con precisión si realmente el Universo es un «árbitro neutral» entre estos dos equipos.

La búsqueda de la asimetría continúa

Sin embargo, la historia de la física ofrece motivos de sobra para dudar. Tal y como recuerda Juan Calderón, el famoso experimento realizado en los años 50 del siglo XX por el equipo de la física Chien-Shiung Wu, a partir de las predicciones teóricas de Tsung-Dao Lee y Chen-

Ning Yang, «descubrió que los electrones procedentes de desintegraciones atómicas mostraban preferencia por una dirección de espín a derechas» lo que reveló una asimetría en la fuerza débil que rige dichas desintegraciones». Este hallazgo, que contradecía las leyes de conservación de la paridad en la interacción débil, supuso uno de los hitos de la física de partículas y nuclear de la segunda mitad del siglo pasado.

En esta misma línea, según apunta Adrián del Río, «las ecuaciones de la gravedad de Einstein, que rigen el cosmos a gran escala, permiten en principio que por cada objeto rotando a derechas haya otro a izquierdas, pero no requieren que el universo contenga exactamente las mismas proporciones. Este trabajo pretende explorar si la gravedad tiene preferencias ocultas». Es, por tanto, sólo el comienzo de un apasionante viaje para poner a prueba una de las propiedades más profundas del universo. «Este partido de fútbol cósmico aún no ha terminado», concluye Calderón.



PLATO COMPLETA UNA FASE en su camino hacia la búsqueda de exoplanetas

La Agencia Espacial Europea (ESA) lanzará la misión PLATO (*PLANetary Transits and Oscillations of stars*) a finales de 2026. A partir de 2027, PLATO comenzará su exploración de planetas más allá del Sistema Solar, con especial atención a aquellos de tamaño similar a la Tierra que orbitan estrellas similares al Sol. El proyecto trata de responder a cuestiones sobre el origen y evolución de posibles planetas similares a la Tierra. La Universitat de València (UV) participa en el estudio.

En los últimos 15 años, las misiones espaciales fotométricas de alta precisión desarrolladas por las principales agencias espaciales del mundo han impulsado avances significativos en física estelar y en ciencia exoplanetaria. La innovadora misión PLATO ha sido diseñada para descubrir planetas potencialmente habitables alrededor de estrellas similares a nuestro Sol. Su objetivo es estudiar en detalle miles de exoplanetas, con especial atención a los de tipo terrestre –rocosos y compuestos principalmente de silicio, oxígeno y metales– en contraste con los gigantes gaseosos como Júpiter o Saturno.

Desde el nodo de la UV, la contribución a la misión PLATO se centra en el desarrollo del *software* encargado de procesar los datos provenientes directamente de las observaciones. Esto significa que el usuario final de las curvas de luz recibirá datos corregidos de efectos físicos indeseados para el análisis estelar. El análisis posterior de estos datos para su uso en Astrosismología incorpora técnicas de análisis no lineal, lo que permite una representación más precisa de la física estelar respecto a los enfoques clásicos lineales. Los implicados en este nodo son los investigadores Andrés Moya y Miriam Rodríguez, del grupo GRACE del Departamento de Astronomía y Astrofísica de la UV.

LA MATERIA OSCURA

uno de los grandes enigmas de la ciencia

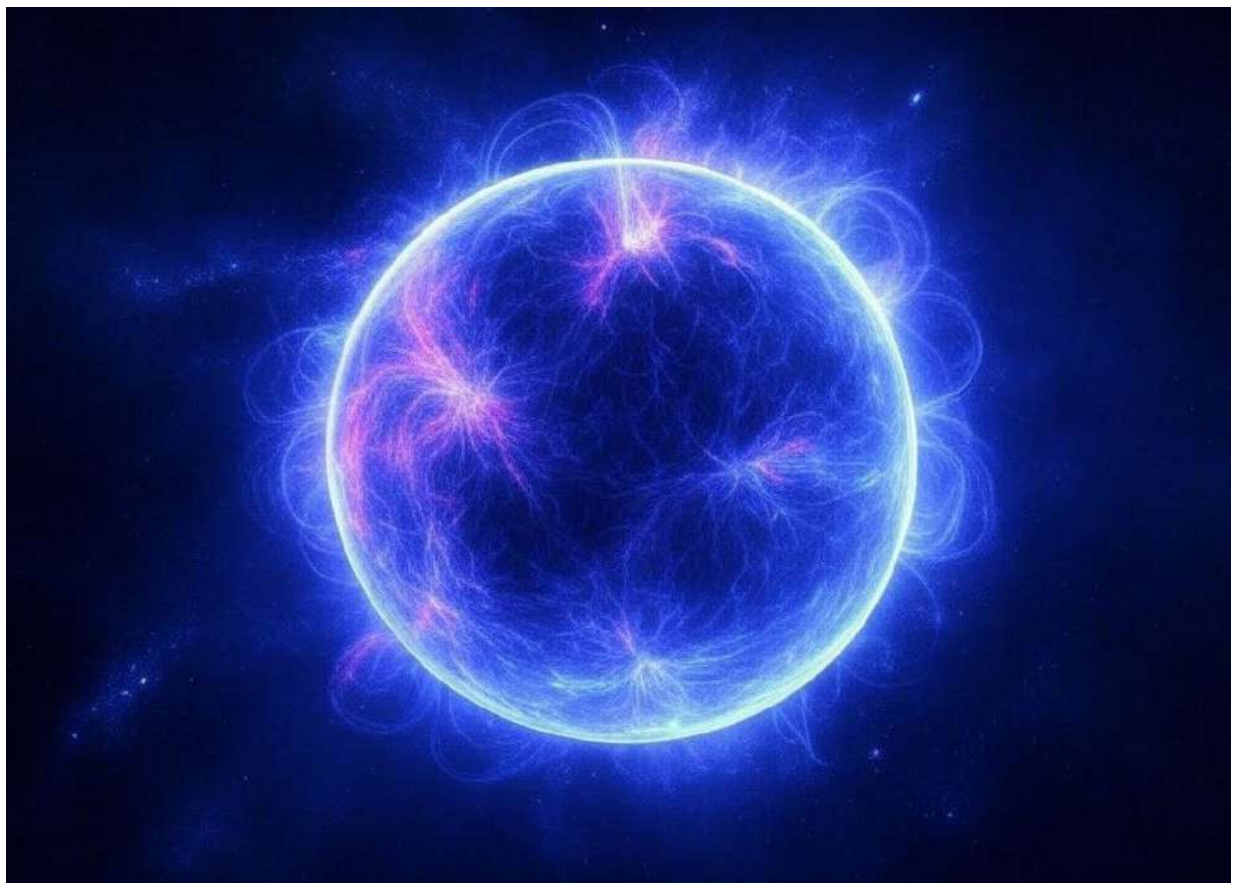
Uno de los grandes desafíos de la ciencia es dar una explicación a la materia oscura, esa misteriosa forma de materia compuesta por partículas que no absorben, reflejan, o emiten luz y, por tanto, invisible para el ser humano. «Sabemos que existe por sus efectos gravitacionales, pero no hemos podido observarla directamente» apuntan los investigadores del Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Alicante (UA), Antonio Gómez-Bañón y José A. Pons, que han publicado un artículo que revela un innovador método de estudio del axión QCD (Quantum Chromo-Dynamics, Cromodinámica Cuántica).

El equipo de investigadores de la UA ha realizado dos contribuciones clave en la búsqueda de este axión: la identificación de una nueva región de exclusión en su espacio de parámetros y el desarrollo de un método innovador para acotar sus propiedades utilizando estrellas de neutrones. «Hemos investigado cómo la hipotética partícula afecta a la energía y presión de la materia nuclear dentro de las estrellas de neutrones», explican.

Las soluciones obtenidas revelan que, para ciertos valores de los parámetros del axión QCD, la capa externa de la estrella de neutrones se vuelve más delgada, reduciendo su aislamiento térmico y acelerando el enfriamiento de la estrella. Por comparación, «esto es equivalente a que un planeta pierda su atmósfera y se anule el efecto invernadero», explican.

Para alcanzar esta conclusión, los investigadores han llevado a cabo simulaciones de la evolución térmica de la estrella a largo plazo. «En etapas avanzadas de la evolución, las simulaciones predijeron estrellas de neutrones más frías que los datos observacionales. Esta diferencia nos ha permitido establecer nuevos límites a los valores de los parámetros del axión QCD», señalan. «Si bien aún no hemos detectado el axión QCD, su posible influencia en los entornos más extremos del universo abre una ventana única para explorar los misterios más profundos de la física», concluyen los investigadores de la UA.

*Ilustración elaborada por ordenador de una estrella de neutrones.
Imagen cedida por Antonio Gómez-Bañón (UA).*





EL SOL, FUENTE DE ONDAS GRAVITACIONALES

Una colaboración científica entre el Instituto de Física Corpuscular (IFIC), centro mixto del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y la Universitat de València (UV), y el Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY) ha logrado la predicción teórica más detallada hasta la fecha de las ondas gravitacionales generadas por el Sol.

Los resultados apuntan a que el Sol emite un espectro continuo de ondas gravitacionales de alta frecuencia. Este tipo de ondas provendrían de eventos cósmicos pequeños y rápidos, mientras que las ondas gravitacionales de baja frecuencia detectadas hasta ahora se producen por eventos cósmicos de gran escala. Aunque la señal generada por el Sol es actualmente indetectable, establece un punto de referencia bien definido para futuros esfuerzos experimentales.

El trabajo desarrollado en el IFIC ha sido liderado por Camilo García, investigador Ramón y Cajal, en colaboración con Andreas Ringwald en DESY. «Nuestra especialidad es el estudio de la materia oscura, en particular de los axiones», explica García. «No obstante, este trabajo nos llevó a explorar en profundidad distintos aspectos de la física solar», añade.

Los detectores actuales de ondas gravitacionales están diseñados para captar señales de baja frecuencia, como las que se generan en la fusión de agujeros negros o estrellas de neutrones. Sin embargo, en los últimos años una comunidad científica en rápido crecimiento ha comenzado a centrarse en el estudio de las ondas gravitacionales de alta frecuencia. De acuerdo con la suposición comúnmente aceptada, esta banda de frecuencia está libre de fondos astrofísicos, lo que la haría



especialmente adecuada para detectar señales procedentes de las etapas iniciales del universo. Los nuevos resultados teóricos cuestionan esta suposición.

«Esta aportación abre una nueva perspectiva sobre las ondas gravitacionales de alta frecuencia, la cual había pasado prácticamente desapercibida», señala García. «Ahora creemos que incluso estrellas ordinarias como el Sol emiten ondas gravitacionales en este rango de frecuencias, en niveles comparables a los esperados de procesos del universo temprano», sostiene.

Asimismo, según apunta Ringwald, «el Sol no emite una cantidad significativa de radiación gravitacional, pero esto podría ser, en realidad, una ventaja. De hecho, deja un amplio margen de exploración para la nueva física. Aún está por verse si esta radiación podrá detectarse,

pero, de ser así, podría convertirse en una herramienta poderosa para estudiar la estructura interna del Sol», subraya el investigador.

El IFIC, bajo el liderazgo de Camilo García, ha desempeñado un papel clave en este campo. Su contribución se enmarca en un proyecto nacional coordinado con otros grupos en España, en el que ejerce como investigador principal. Las predicciones desarrolladas por su equipo resultan especialmente relevantes para las iniciativas que se llevan a cabo en DESY, uno de los principales centros internacionales de investigación en física de partículas. En sus instalaciones se encuentran, o se instalarán próximamente, experimentos como ALPS II, BabyIAXO, MADMAX y MAGO, todos ellos orientados a la detección de axiones o de ondas gravitacionales de alta frecuencia.

VERIFICAN EL TEOREMA DEL ÁREA DE LOS agujeros negros de Stephen Hawking

Universitat de València (UV)

Las colaboraciones internacionales LIGO, Virgo –en la que participa la UV– y KAGRA celebran el décimo aniversario de la primera detección de ondas gravitacionales y anuncian la verificación del Teorema del Área de los Agujeros Negros de Stephen Hawking. En un artículo publicado en la revista *Physical Review Letters* se discute este importante resultado.

Esta última década ha asistido a un espectacular aumento de descubrimientos de ondas gravitacionales por la red LIGO-Virgo-KAGRA (LVK), de forma que se ha llegado a un total de más de 300 fusiones de agujeros negros, la mayoría ya confirmadas. Si bien las señales observadas provienen principalmente de colisiones de agujeros negros de origen estelar, también se han conseguido las primeras observaciones de colisiones de estrellas de neutrones, fusiones entre una estrella de neutrones y un agujero negro, o fusiones asimétricas, en las que un agujero negro es significativamente más masivo que el objeto compacto secundario, entre otras.

«Las múltiples detecciones de ondas gravitatorias realizadas en la última década han revelado la existencia de nuevas poblaciones de sistemas binarios de objetos compactos. Nuestros análisis de fusiones de agujeros negros están permitiendo explorar el régimen de campo gravitatorio fuerte y dinámico y poner a prueba los límites de la teoría de la Relatividad General de Einstein y sus predicciones paradigmáticas», explica José Antonio Font, catedrático del Departamento de Astronomía y Astrofísica de la UV y coordinador del grupo Virgo Valencia.

«Es fascinante que las señales de ondas gravitacionales nos permitan poner a prueba nuestra comprensión de la gravedad. Han sido 10 años maravillosos desde la primera detección directa y el futuro es simplemente brillante», destaca Isabel Cordero, investigadora del Departamento de Matemáticas de la UV y responsable de divulgación de Virgo-Valencia.

El 14 de septiembre de 2015, una señal llegó a la Tierra llevando información sobre un par de agujeros negros lejanos que se habían acercado en espiral hasta fusionarse. La señal había viajado unos 1300 millones de años para alcanzar la velocidad de la luz, pero no estaba hecha de luz. Era una señal de otro tipo: un temblor del espacio-tiempo conocido como ondas gravitacionales, predicho por primera vez por Albert Einstein cien años antes. Aquel día, hace diez años, los dos detectores gemelos del Observatorio de Interferometría Láser de Ondas Gravitacionales (LIGO) realizaron la primera detección directa de ondas gravitacionales. Las colaboraciones LIGO y Virgo lo anunciaron al mundo en febrero de 2016, tras seis meses de análisis y verificación.

El histórico hallazgo quería decir que los investigadores podían empezar a percibir el universo a través de tres canales diferentes. Ya se habían captado antes ondas de luz –rayos X, luz visible, ondas de radio y otras longitudes de onda–, así como partículas de alta energía llamadas rayos cósmicos y neutrinos. Por primera vez, la comunidad científica era testigo de un evento cósmico a través de la deformación gravitatoria del



*Integrantes del grupo Virgo en Valencia, con José Antonio Font e Isabel Cordero.
Foto: EHT Collaboration.*



espacio-tiempo. Por este logro, soñado más de cuarenta años antes, tres de los fundadores de LIGO recibieron el Premio Nobel de Física en 2017: Rainer Weiss, Barry Barish y Kip Thorne.

La mejora en la sensibilidad de los instrumentos ha sido demostrada en un descubrimiento reciente: la fusión de agujeros negros denominada GW250114. Al analizar las frecuencias de las ondas gravitacionales emitidas durante la fusión, la colaboración LVK fue capaz de obtener la mejor evidencia observacional registrada hasta la fecha del llamado teorema del área de los agujeros negros, propuesto por Stephen Hawking en 1971. El teorema establece que la superficie total de los agujeros negros no puede disminuir. Cuando los agujeros negros se fusionan, sus masas se combinan y, por tanto, la superficie crece. Sin embargo, el proceso de fusión también irradia energía en forma de ondas gravitacionales y además puede incrementar la velocidad de rotación del agujero negro resultante, lo que conduciría a reducir su área. El teorema de Hawking afirma que, pese a que estos efectos compiten, el área total debe aumentar en tamaño.

La parte más complicada de este tipo de análisis tenía que ver con determinar la superficie final del agujero negro fusionado. En el nuevo estudio, los investigadores pudieron medir con precisión los detalles de la fase de relajación, lo que les permitió calcular la masa y la velocidad de rotación del agujero negro y, posteriormente, determinar su superficie. Pudieron, por primera vez, identificar con seguridad dos modos distintos de ondas gravitacionales en la fase de relajación. La mejora de los datos de GW250114 permitió al equipo extraer los modos, lo que demostró que la relajación del agujero negro se produjo exactamente como predijeron los modelos matemáticos.

Otro estudio del LVK establece límites a un tercer tono más agudo previsto en la señal GW250114 y realiza algunas de las pruebas más rigurosas hasta la fecha sobre la precisión de la relatividad general a la hora de describir la fusión de agujeros negros.

*Comparación de tamaño entre 1998 KY26 y el VLT.
Foto: ESO.*

EL ASTEROIDE 1998 KY26 ES MÁS PEQUEÑO Y RÁPIDO DE LO QUE SE PENSABA





Un equipo internacional revela que el asteroide 1998 KY26 es casi tres veces más pequeño y gira mucho más rápido de lo que se pensaba, gracias a la utilización de observatorios como el Gran Telescopio de Canarias o el Very Large Telescope del Observatorio Europeo Austral (VLT de ESO).

Este objeto próximo a la Tierra es el objetivo de la misión extendida Hayabusa2 de la Agencia Espacial Japonesa (JAXA) para el año 2031. «Hemos descubierto que la realidad de 1998 KY26 es completamente diferente a lo que se sabía con anterioridad», declara el astrónomo Toni Santana-Ros, investigador del Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal de la Universidad de Alicante (UA), quien dirige el estudio publicado en *Nature Communications*. Las nuevas observaciones, combinadas con datos de radar anteriores, indican que el asteroide tiene solo 11 metros de ancho, lo que significa que podría caber fácilmente dentro de la cúpula de la unidad de telescopio del VLT utilizada para observarlo. Además, gira aproximadamente el doble de rápido: «un día dura solo cinco minutos», afirma el investigador de la UA. Los datos anteriores apuntaban que este asteroide tenía alrededor de 30 metros de diámetro y completaba una rotación en aproximadamente 10 minutos.

«El menor tamaño y la rotación más rápida harán que la visita de Hayabusa2 sea aún más interesante y desafiante», indica el coautor del artículo, Olivier Hainaut, astrónomo de ESO en Alemania. Esto se debe a que la maniobra de contacto, en la que la nave espacial «besa» el asteroide, será más difícil de realizar de lo previsto.

Santana-Ros y su equipo han observado a 1998 KY26 desde tierra para apoyar la preparación de la misión. Debido a que es muy pequeño y, por lo tanto, muy débil, estudiarlo ha requerido esperar un encuentro cercano con la Tierra y usar grandes telescopios como el Gran Telescopio de Canarias (GTC), el VLT de ESO y el Gemini South, ambos situados en Chile. Las observaciones muestran que el objeto tiene una superficie brillante y probablemente se trate de un trozo sólido de roca, que puede haberse originado de un pedazo de un planeta o de otro cuerpo celeste rocoso. Sin embargo, el equipo no ha descartado por completo la posibilidad de que esté formado por montones de escombros que se adhieren libremente.

«Nunca hemos visto un asteroide de diez metros de tamaño *in situ*, por lo que realmente no sabemos qué esperar ni qué aspecto tendrá», declara el investigador de la UA que también está afiliado a la Universitat de Barcelona.

INVENTAN UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN

de nanopartículas con láser

Universitat Jaume I de Castelló (UJI)

Un equipo de personal investigador del Grupo de Óptica de la UJI ha desarrollado un sistema para producir nanopartículas con láser.

La invención tiene potenciales aplicaciones en varios sectores empresariales como, por ejemplo, la industria biomédica (en forma de agentes de contraste en imágenes o transportadores de fármacos), la industria energética (para la fabricación de fluidos térmicos avanzados) o la ingeniería de materiales (para desarrollar nuevos materiales o mejorar las prestaciones de los existentes).

Fabricar nanopartículas con láser destaca por su capacidad para producir nanopartículas de alta pureza, libres de contaminantes químicos, a partir de prácticamente cualquier material sólido y en un proceso ecológico y altamente versátil.

En general, la energía proporcionada por los láseres de alta potencia excede a la óptima requerida para la fabricación de nanopartículas en fluidos.

El sistema desarrollado por el personal de la UJI usa una cámara de ablación (que es una cámara en la que se depositan los materiales y el fluido adecuado) con dos ventanas transparentes, lo que permite la irradiación por las dos caras de un mismo material o de materiales diferentes.

Además, para aprovechar mejor esta energía, se utilizan sistemas de focalización avanzada que cambia la forma en que se deposita la energía

sobre la muestra.

Esto permite un aumento de la productividad y la fabricación simultánea de nanopartículas de diferentes materiales y también hace posible reducir las condiciones extremas del halo que pueden dañar los componentes del sistema.

La unidad de conformado permite generar uno o múltiples focos, y, además, modificar sus perfiles o corregir aberraciones. La incorporación de nanomateriales a otros materiales puede mejorar sus prestaciones, usos, funciones, o, incluso, su durabilidad.

El procedimiento, validado a escala experimental en el entorno de laboratorio y protegido mediante solicitud de patente española, busca la colaboración de empresas para el desarrollo y adaptación de la tecnología a aplicaciones concretas mediante acuerdos específicos y acuerdo de licencia.

La UJI, a través de la Oficina de Cooperación y Desarrollo Tecnológico y el Vicerrectorado de Transferencia, Innovación y Divulgación Científica, facilitan la transferencia científica y tecnológica de su personal investigador con el propósito de avanzar en su vocación de transmisión y difusión del conocimiento científico, técnico, social y humanístico.

La investigación realizada para conseguir este nuevo sistema ha sido financiada por la Agencia Estatal de Investigación a través de los Proyectos de Generación del Conocimiento 2022 y Proyec-



Primero por la derecha, Jesús Lancis, vicerrector de Investigación de la UJI, junto con el equipo de investigadores autores del invento.



tos de Retos de Investigación 2019, y la Conselleria de Innovación, Universidades, Ciencia y Sociedad Digital de la Generalitat Valenciana, a través del Programa para la promoción de la investigación científica, el desarrollo

tecnológico y la innovación en la Comunitat Valenciana /2020/029 y CIPROM/2023/44.

HALLAN PÚLSARES OCULTOS

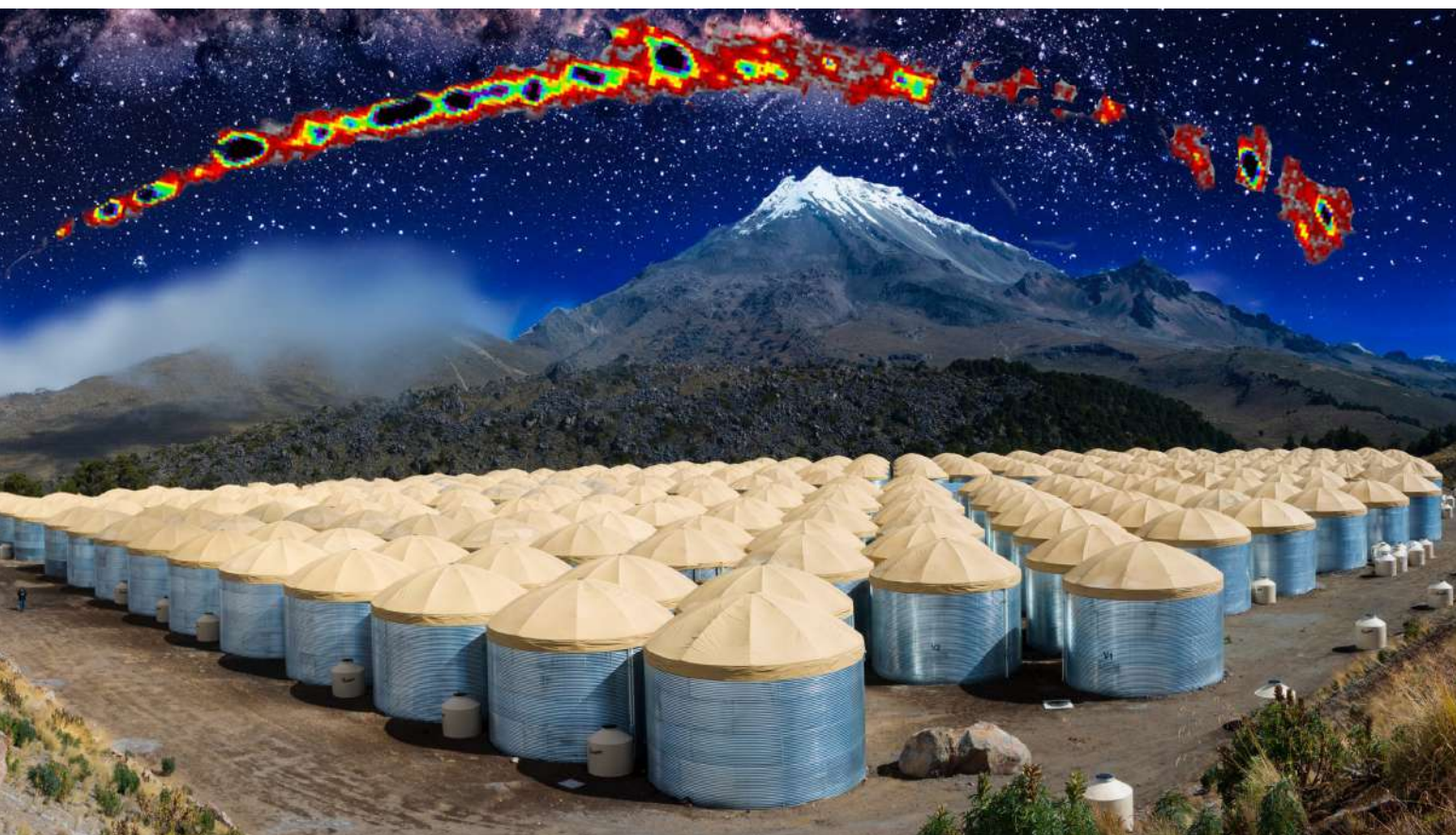
uno de los objetos más densos del universo

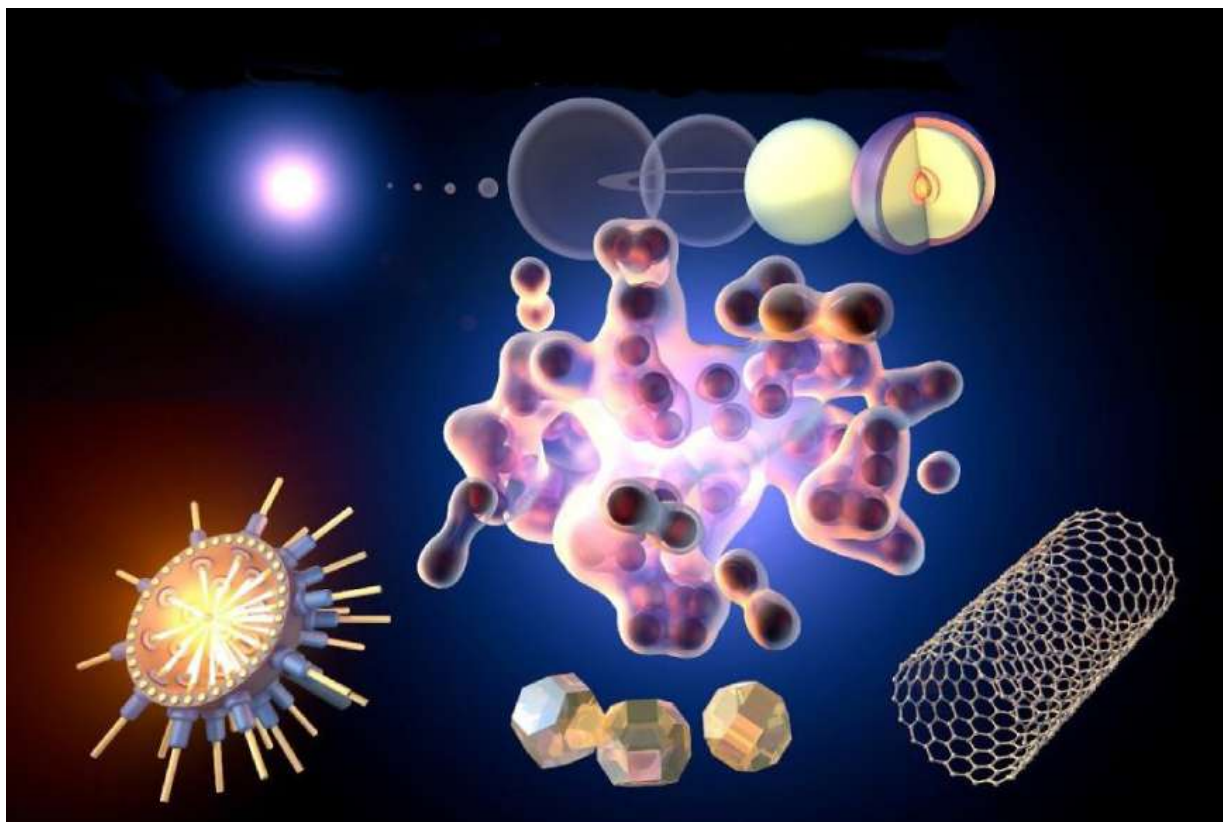
El Instituto de Física Corpuscular (IFIC), centro mixto del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y la Universitat de València (UV), participa en un importante avance para detectar un tipo de estrellas de neutrones, uno de los objetos más densos del universo, mediante sus emisiones extendidas de rayos gamma de muy alta energía.

La investigadora del CSIC en el IFIC, Sara Coutiño, colidera un estudio que ha observado una estructura característica en las señales emitidas por púlsares de mediana edad, un tipo particular de estrella de neutrones. Esta estructura en forma de halos permitiría detectar poblaciones de púlsares que podrían pasar desapercibidos con los métodos tradicionales de observación. El hallazgo se publica en *Physical Review Letters*.

«Los púlsares son aceleradores naturales de partículas que convierten la energía en rotación de una estrella de neutrones en energía cinética de las partículas», explica Sara Coutiño, una de las autoras principales del trabajo. En un púlsar joven, las partículas cargadas que éste acelera quedan atrapadas en su campo magnético. Pero al alcanzar una edad de decenas de miles de años (entre 20.000 y 100.000 años), este campo se debilita y permite que las partículas escapen al medio interestelar. Allí, al interactuar con campos de radiación circundante, producen los llamados rayos gamma, la luz más energética del universo.

«Muchos púlsares de mediana edad no son fácilmente detectables en radio, rayos X o incluso en rayos gamma menos energéticos. Por ello, detectar este tipo de halos permite revelar una población de púlsares ocultos que de otro modo pasarían desapercibidos», resume la investigadora del CSIC. «Aunque el mecanismo físico de la producción de halos aún sigue siendo un tema abierto, los resultados de este trabajo respaldan la hipótesis de que estos halos podrían ser comunes, lo que constituye un paso importante hacia la comprensión de su origen y prevalencia», asegura Coutiño. «Además de su potencial para revelar púlsares ocultos, el estudio de halos de rayos gamma también ofrece una oportunidad única para entender cómo aceleran y propagan los rayos cósmicos en el medio interestelar, un proceso clave en la astrofísica de altas energías», remarca la investigadora.





MIDEN EL CARBONO LÍQUIDO para la investigación en energía de fusión

Un equipo internacional con participación de la Universitat de València (UV) ha conseguido estudiar, utilizando el láser de rayos X más potente del mundo, la estructura del carbono en su estado líquido. Se trata de un logro sin precedentes que no sólo facilitará la comprensión de determinados procesos en planetas gigantes, sino que servirá para mejorar las tecnologías futuras de fusión nuclear. El trabajo aparece publicado en *Nature*.

El carbono líquido, que podría encontrarse en los planetas gigantes, desempeña un papel importante en el desarrollo de tecnologías futuras de fusión nuclear, una fuente de energía limpia y casi ilimitada. Sin embargo, hasta la fecha se sabía muy poco sobre el carbono en su forma líquida, ya que en ese estado era prácticamente imposible estudiarlo en el laboratorio. A presión ambiente, el carbono no se funde, sino que pasa inmediatamente al estado gaseoso, y sólo a elevadas presiones y temperaturas el carbono se vuelve líquido.

Se sabe que la compresión láser es capaz de convertir el carbono sólido en líquido en fracciones de

segundo. «El reto era utilizar estas fracciones de segundo para realizar mediciones y, de una forma antes inimaginable, esto se ha hecho realidad utilizando el DIPOLE 100-X, un láser de alta energía que permite crear condiciones con presiones de hasta 10.000 toneladas por centímetro cuadrado y temperaturas superiores a 10.000 grados en muy poco tiempo», comenta Daniel Errandonea, investigador del Instituto de Ciencia de los Materiales (ICMUV) de la UV y coautor del trabajo.

Según el artículo, en el experimento los pulsos de alta energía del láser crean ondas de compresión a través de una muestra sólida de carbono y licúan el material durante una milmillonésima de segundo. Durante este breve periodo, la muestra se irradia con los rayos X del EuXFEL, y los átomos de carbono dispersan la luz de rayos X de forma similar a como la luz se difracta en una rejilla. De este modo, el patrón de difracción creado permite extraer información valiosa sobre la distribución de los átomos en el carbono líquido, la forma en que se organizan y las interacciones entre ellos.

EL DETECTOR KM₃NET ATRAPA EL NEUTRINO DE MAYOR ENERGÍA JAMÁS OBSERVADO



La colaboración internacional que opera el experimento KM₃NeT, un potente telescopio sumergido en las profundidades del Mediterráneo, publica en *Nature* la detección del neutrino de mayor energía nunca antes captado por un experimento similar. El hallazgo, portada de la prestigiosa revista, proporciona la primera evidencia de que neutrinos de energías tan altas se producen en el universo, aunque su origen aún es una incógnita. En KM₃NeT, participan varios grupos científicos españoles, entre ellos el Instituto de Física Corpuscular (IFIC), centro mixto del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y la Universitat de València (UV), y la Unidad Mixta del Instituto Español de Oceanografía del CSIC y la Universitat Politècnica de València (UPV).

El 13 de febrero de 2023, el detector ARCA del telescopio submarino de neutrinos KM₃NeT detectó un extraordinario evento asociado a un neutrino de una energía estimada en unos 220 PeV (220.000 billones de electronvoltios, mucho mayor que las partículas que produce el LHC del CERN). Llamado KM₃-230213A, es el neutrino más energético jamás observado hasta la fecha, y proporciona la primera evidencia de que neutrinos de energías tan altas se producen en el universo.

El evento detectado se identificó como un muon (una partícula elemental emparentada con el electrón) que atravesó todo el detector, produciendo señal en más de un tercio de los sensores. La inclinación de su trayec-



Neutrinos, las partículas elementales más misteriosas

El universo de alta energía es el reino de eventos colosales como los agujeros negros supermasivos, las explosiones de supernovas y los estallidos de rayos gamma. Estos poderosos aceleradores cósmicos generan flujos de partículas llamadas rayos cósmicos, que pueden interactuar con la materia de alrededor produciendo neutrinos y fotones. Durante su viaje por el universo, los rayos cósmicos más energéticos pueden interactuar con los fotones de la radiación de fondo de microondas, la primera luz tras el origen del cosmos, para producir neutrinos extremadamente energéticos, llamados cosmogénicos. «Los neutrinos son una de las partículas elementales más misteriosas. No tienen carga eléctrica, casi no tienen masa e interactúan débilmente con la materia. Nos proporcionan información única sobre los mecanismos involucrados en los fenómenos más energéticos y nos permiten explorar los confines más lejanos del universo», explica Rosa Coniglione, portavoz adjunta de KM3NeT en el momento de la detección e investigadora en el Instituto Nacional de Física Nuclear (INFN) de Italia.

Aunque son la segunda partícula más abundante del universo después de los fotones que forman la luz, su interacción extremadamente débil con la materia los hace muy difíciles de detectar, y requiere de detectores enormes. El telescopio de neutrinos KM3NeT es una gigantesca infraestructura en el fondo del mar consistente en dos detectores, ARCA y ORCA. KM3NeT utiliza el agua del mar como medio de interacción para detectar los neutrinos. Sus módulos ópticos de alta tecnología detectan la luz Cherenkov, un resplandor azulado que genera la propagación en el agua de partículas ultra-relativistas resultantes de las interacciones con neutrinos.

Este neutrino de ultra alta energía puede tener su origen directamente en un potente acelerador cósmico. Alternativamente, podría ser la primera detección de un neutrino cosmogénico. Sin embargo, basándose en este único neutrino, es difícil llegar a conclusiones sobre su origen, aseguran los científicos de la colaboración. Las futuras observaciones se centrarán en detectar más eventos de este tipo para construir una imagen más clara. La expansión en curso de KM3NeT con unidades de detección adicionales y la adquisición de nuevos datos mejorarán su sensibilidad y aumentarán su capacidad para identificar fuentes de neutrinos cósmicos, convirtiendo a KM3NeT en un actor principal en la astronomía multimensajero.

toria junto con su enorme energía proporciona pruebas convincentes de que el muon se originó a partir de un neutrino cósmico que interactuó en las proximidades del detector.

«KM3NeT ha comenzado a explorar un rango de energía y sensibilidad donde los neutrinos detectados pueden ser producidos en fenómenos astrofísicos extremos. Esta primera detección de un neutrino de cientos de PeV abre un nuevo capítulo en la astronomía de neutrinos y una nueva ventana de observación del universo», comenta Paschal Coyle, portavoz de KM3NeT en el momento de la detección e investigador del Centro de Física de Partículas IN2P3/CNRS de Marsella (Francia).



UN EXPERIMENTO DESAFÍA UNO DE LOS PRINCIPIOS DE LA FÍSICA NUCLEAR

Instalación RIBF en RIKEN (Japón), donde se producen los núcleos exóticos estudiados. Foto: RIKEN.

Uno de los principios que describen el núcleo del átomo, el corazón de la materia que forma todo lo que vemos en el universo, es la simetría de isospín. Este concepto supone que neutrones y protones, las dos partículas que forman el núcleo, se comportan de forma casi idéntica a pesar de tener características distintas. Una colaboración científica internacional liderada por el Instituto de Física Corpuscular (IFIC), centro mixto del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y la Universitat de València (UV), ha realizado un sorprendente hallazgo que cuestiona este principio. Han observado que dos núcleos espejo, núcleos con el mismo número de protones y neutrones pero intercambiados, pueden tener estados fundamentales distintos, algo que atenta contra la simetría de isospín. Los resultados se publican en la revista *Physical Review Letters*.

Desde que en el siglo XX se identificaran el protón y el neutrón como los bloques fundamentales del núcleo atómico, la física nuclear ha evolucionado gracias al desarrollo de modelos cada vez más precisos. Una idea introducida por Werner Heisenberg y refinada por Eugene Wigner, muy útil tanto en física nuclear como en física de partículas, es considerar protones y neutrones como dos estados de una misma partícula, el nucleón. Esta suposición conduce a la simetría de isospín, que predice que los núcleos espejo deberían compartir propiedades cuánticas idénticas, especialmente en sus estados de menor energía o estado fundamental, el modo natural de un núcleo si no está excitado o perturbado por una interacción externa.

Sin embargo, el estudio liderado por el IFIC revela que



esto no siempre es así. En concreto, ha observado que el núcleo del isótopo Kriptón-71 (^{71}Kr) tiene un estado fundamental diferente al de su núcleo espejo, el Bromo-71 (^{71}Br), pese a diferenciarse sólo en un nucleón. «Este es el primer caso documentado en el que se rompe la simetría de isospín en núcleos espejo tan próximos, donde sólo se intercambia un nucleón», explica Alejandro Algora, investigador del CSIC en el IFIC y autor principal del estudio.

Otras rupturas en núcleos más exóticos

El hallazgo se basa en una sutil reorganización de los niveles de energía dentro del núcleo atómico, que el equipo de investigación ha podido explicar mediante cálculos teóricos usando el modelo de capas.

En física nuclear, el modelo de capas es una forma de entender cómo se organizan y comportan los protones y neutrones dentro del núcleo del átomo. Al igual que los electrones se ordenan en capas alrededor del núcleo, los protones y neutrones también se agrupan en niveles o capas dentro del núcleo, como los pisos en un edificio.

El proyecto que ha dado lugar a este sorprendente hallazgo, concebido inicialmente por un grupo de investigación de España e Italia, ha sido desarrollado en el marco de una amplia colaboración internacional en la instalación de haces radiactivos RIBF de RIKEN (Japón), una de las más avanzadas del mundo para el estudio de núcleos exóticos, núcleos radioactivos con una vida extremadamente corta.

UN PORTAMUESTRAS MULTIPLICA POR 20

la eficiencia de los microscopios

Universidad de Alicante (UA)

Investigadores de la UA han desarrollado un innovador portamuestras para microscopios de efecto túnel (STM) que multiplica por 20 su eficacia. El invento ha sido presentado por Carlos Sabater, investigador distinguido CIDEAGENT del Departamento de Física Aplica de la UA, junto a Juan Pablo Cuenca y Enrique Guzmán, ambos investigadores predoctorales.

Su finalidad es la de realizar cambio de muestras en estos instrumentos de precisión, que toman imágenes de superficies a nivel atómico en cuestión de segundos sin que sea necesario desmontar el equipo, ya que esta acción supone, generalmente, tener que recalibrarlo de nuevo.

Esta facilidad de uso simplifica el proceso de tal forma que ya no es necesario contar con técnicos especializados para calibrar el sistema con cada cambio, lo que permite llevar a cabo los barridos (escaneos) de superficies con resolución atómica de una manera mucho más rápida y eficiente.

«Este es el resultado de muchos años de investigación», cuenta Carlos Sabater, quien explica que es fruto de la evolución de un portamuestras y microscopio que él mismo, junto a otra estudiante predoctoral del departamento, Patricia Ferrer, enviaron a patentar y que ahora se encuentra en fase de evaluación de modelo de utilidad.

El actual diseño de esta nueva patente reemplaza la parte fija del portasustratos de un microscopio STM por un sistema compuesto por

una base que se ancla directamente al cuerpo del microscopio a través de unos rieles fijos, de forma que se puede instalar y cambiar la muestra de forma ágil y ofreciendo, al mismo tiempo, una mayor versatilidad.

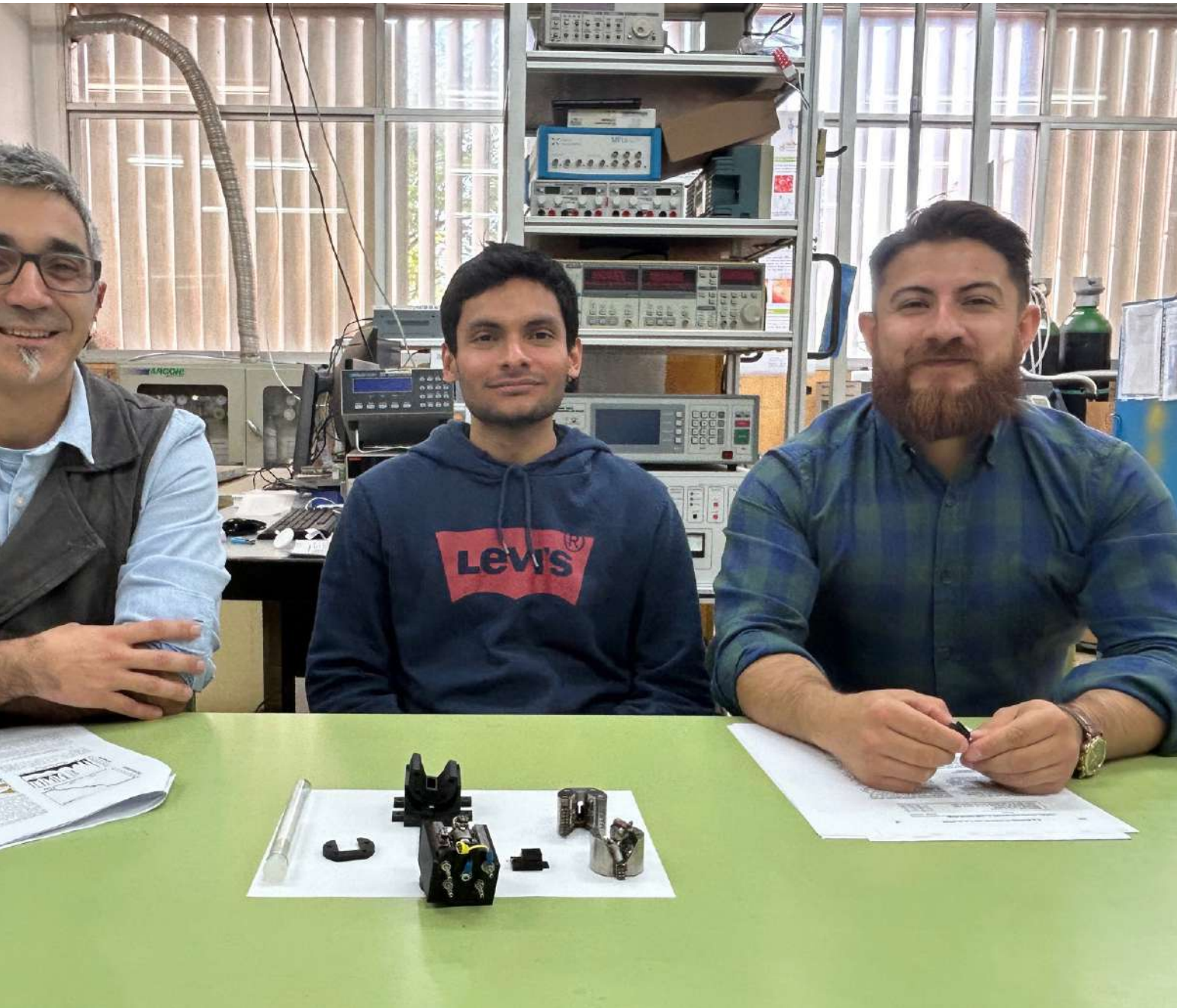
Este nuevo portamuestras posee importantes ventajas con respecto a los ya existentes en el mercado al ser capaz de adaptarse a diversos tamaños y tipos de muestras y permitir también el escaneo de áreas más extensas al ser posible la rotación de la pieza. A todo ello, hay que sumar que con este sistema se obtienen imágenes con resolución atómica ya que las muestras se mantienen limpias gracias a la baja manipulación del microscopista. Además, el sistema de anclado de la muestra, basado en un marco presor conductor eléctrico, tiene una alta estabilidad mecánica, lo que permite resoluciones atómicas en superficie.

«La tecnología es ideal para laboratorios que hagan un uso habitual de este tipo de microscopios», explica Carlos Sabater, quien señala que otra de las ventajas que ofrece el portamuestras es que ha sido creado mediante impresión 3D con filamento PLA (ácido poliláctico), lo que se traduce en bajo coste y fabricación respetuosa con el medio ambiente al tratarse de un polímero biodegradable de fuentes renovables. «El diseño, además, se puede adaptar a las necesidades de los investigadores», asegura Juan Cuenca.

«El sistema está preparado para su escalado a nivel industrial y su puesta en el mercado», in-



Carlos Sabater (primero por la izquierda), junto a Juan Pablo Cuenca y Enrique Guzmán, con el portamuestras que han diseñado.



forma Enrique Guzmán, quien subraya que «es especialmente interesante para las empresas y centros de investigación que hagan uso de estas técnicas de análisis».

Microscopios STM

Los microscopios de efecto túnel (STM) permiten obtener imágenes de alta resolución de superficies a nivel

atómico y estudiar las propiedades electrónicas de los materiales. El STM es un instrumento de medida de uso muy complejo. La dificultad en su manejo se debe, en gran parte, a la operación de cambio de muestras en ciertos modelos, además de que la manipulación por parte del operario del STM aumenta las posibilidades de dañar o contaminar la muestra.

LA PARTÍCULA FANTASMA

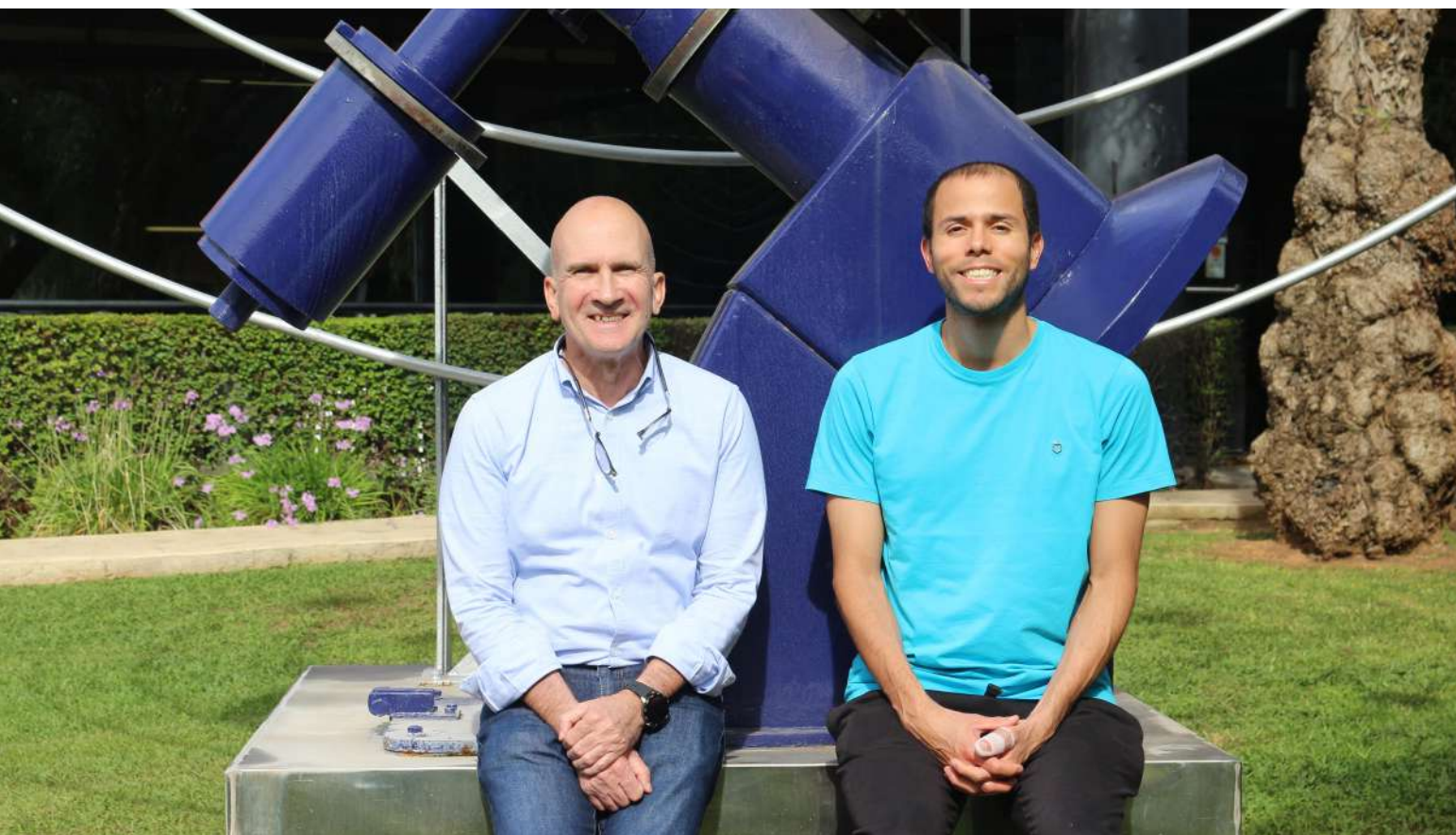
conocida como neutrino

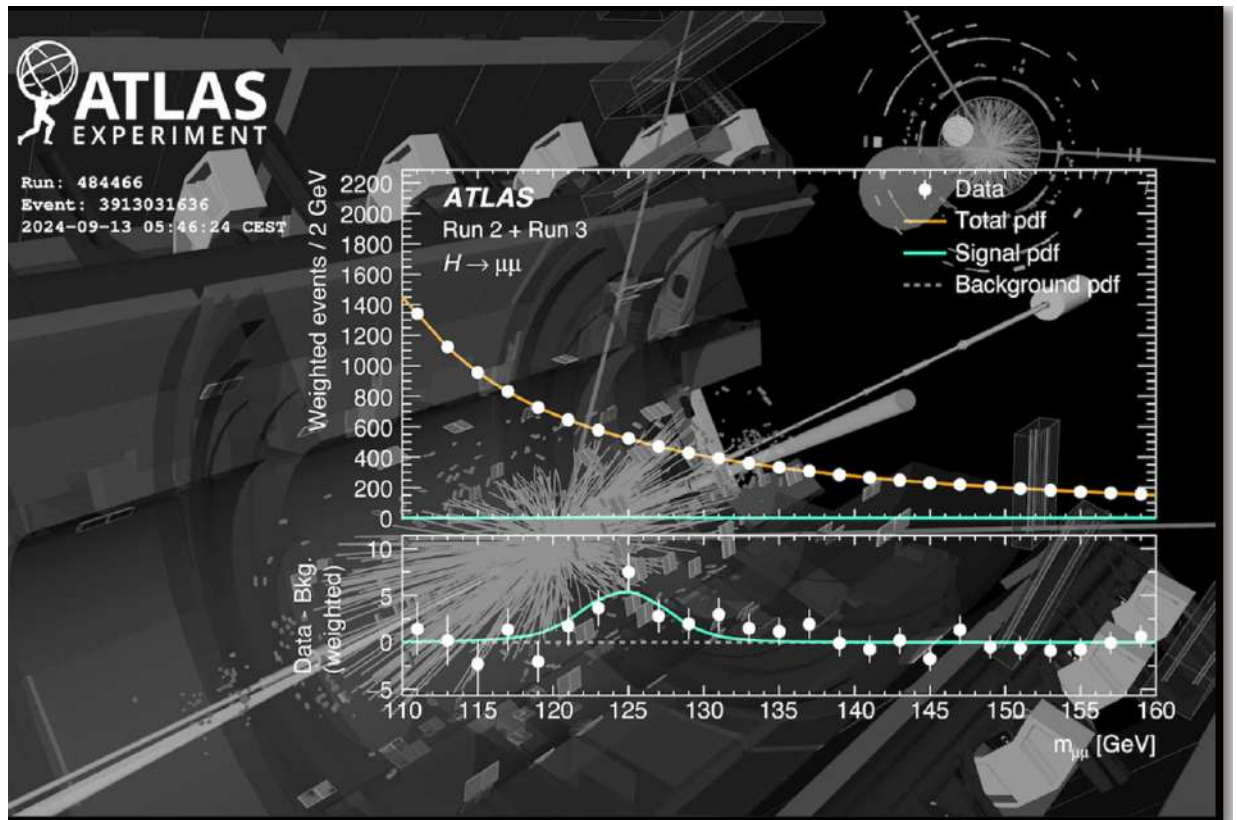
Los investigadores del Instituto de Física Corpuscular (IFIC), centro mixto del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y la Universitat de València (UV), Gustavo Alcalá y Alejandro Algora, del grupo de Espectroscopía Gamma y de Neutrones, han liderado un estudio que ha sido publicado en la revista *Physical Review Letters*. El objetivo de este estudio trata de comprender las propiedades de los antineutrinos emitidos en reactores de fisión nuclear.

Los neutrinos son partículas subatómicas fundamentales con una masa extremadamente pequeña, cercana a cero y carentes de carga eléctrica, lo que los hace invisibles a los campos electromagnéticos. Son las segundas partículas más abundantes del universo, se generan en estrellas y explosiones cósmicas, y son capaces de atravesar la Tierra sin ser percibidos. Por esta razón, se les conoce como «la partícula fantasma».

Ya en 2024, el grupo de Espectroscopía Gamma y de Neutrones del IFIC, junto a equipos científicos de Francia, Inglaterra y Finlandia, anunciaron el desarrollo de un nuevo sistema de detección que pretendía esclarecer algunas de las discrepancias entre los modelos teóricos y las observaciones registradas en los procesos de detección de neutrinos emitidos en reactores nucleares. La clave para entender estas discrepancias podía estar en la medición de los espectros beta de los productos de fisión. Ahora, este nuevo sistema de detección ha dado sus frutos y el grupo ha publicado sus resultados.

El trabajo ha abordado mediciones de la forma del espectro de desintegraciones beta que más contribuyen al espectro de antineutrinos de reactores utilizando haces radiactivos de alta pureza producidos en IGISOL, una instalación experimental finlandesa reconocida internacionalmente. Es muy complejo detectar los neutrinos emitidos para analizar su energía, pero es posible inferirla midiendo la energía de la partícula beta, ya que ambas están relacionadas por el principio de conservación de la energía. Es decir, se pueden medir las partículas beta que se emiten en un reactor y a través de ellas estudiar los antineutrinos.





EXTRAÑA DESINTEGRACIÓN del bosón de Higgs

En 2012, el CERN anunciaba el histórico descubrimiento del bosón de Higgs, la última partícula del Modelo Estándar que faltaba para descubrir. Ahora, se ha publicado en *Physical Review Letters* un estudio de ATLAS del CERN, con participación destacada del Instituto de Física Corpuscular (IFIC), centro mixto del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y la Universitat de València (UV), que identifica una desintegración muy extraña de esta partícula subatómica.

Lo que se ha observado en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) es una desintegración del bosón de Higgs en un muón y un antimuón, es decir, en una pareja compuesta por una partícula y su antipartícula. Lo interesante de esta observación es la bajísima probabilidad de que ocurra: el proceso $H \rightarrow \mu + \mu^-$ tiene solo un 0,022 % de probabilidad de suceder. El estudio de esta desintegración tan rara es especialmente interesante porque nos abre una nueva ventana para ver cómo el Higgs interactúa con los fermiones de la segunda generación (un grupo de partículas que engloba a los muones, a algunos tipos de quarks y al neutrino muónico).

Este modo de desintegración es el más raro de los posibles modos de desintegración del Higgs que se han observado hasta ahora. Anteriormente, la colaboración ATLAS había estudiado el acoplamiento del bosón de Higgs con fermiones (proceso conocido como acoplamiento de Yukawa), pero con fermiones más pesados. Para poder observar el acoplamiento de Yukawa con los muones, se ha tenido que analizar conjuntamente los datos del Run2 y las del Run3 del LHC (los Runs del LHC son sus periodos activos, donde recolecta datos de colisiones, seguidos de paradas técnicas). Este análisis ha sido todo un reto puesto que las condiciones del detector no se han mantenido estables durante toda la toma de datos. En particular, han cambiando la energía (13 y 13.6 TeV) y la intensidad de los flujos.

Por otro lado, la identificación de un fenómeno tan poco frecuente es extremadamente compleja. Hay que extraer una señal débil que está soterrada por un enorme ruido de fondo, que proviene de otros procesos que dan un estado final semejante. Es como encontrar una aguja en un pajar.

EL VACÍO CUÁNTICO MEJORA LA PREDICCIÓN

en física de partículas

Instituto de Física Corpuscular (IFIC, CSIC-UV)

Un equipo internacional liderado por el IFIC, centro mixto del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y la Universitat de València (UV), ha desarrollado un algoritmo que permite predecir con mayor precisión el comportamiento de las partículas elementales en aceleradores como el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN. Basado en las fluctuaciones del vacío cuántico, el método se ha probado por primera vez para predecir el comportamiento del bosón de Higgs en un ordenador cuántico con un detalle sin precedentes en este tipo de máquinas.

El vacío en física cuántica es un concepto tan fascinante como desconcertante, ya que lejos de ser un espacio desprovisto de todo contenido, representa un escenario dinámico donde partículas y antipartículas surgen y se aniquilan de manera constante, guiadas por el principio de incertidumbre de Heisenberg. Estas fluctuaciones del vacío cuántico, aunque breves, dejan una huella indeleble que permite mejorar significativamente las predicciones teóricas sobre el comportamiento de las partículas subatómicas, algo fundamental para interpretar los datos en experimentos como el LHC.

Tradicionalmente, los modelos teóricos que predicen este comportamiento se han basado en los diagramas del premio Nobel Richard Feynman, que rápidamente dan lugar a complicados cálculos teóricos difíciles de resolver.

El trabajo que presenta un equipo científico internacional, liderado por el IFIC, propone

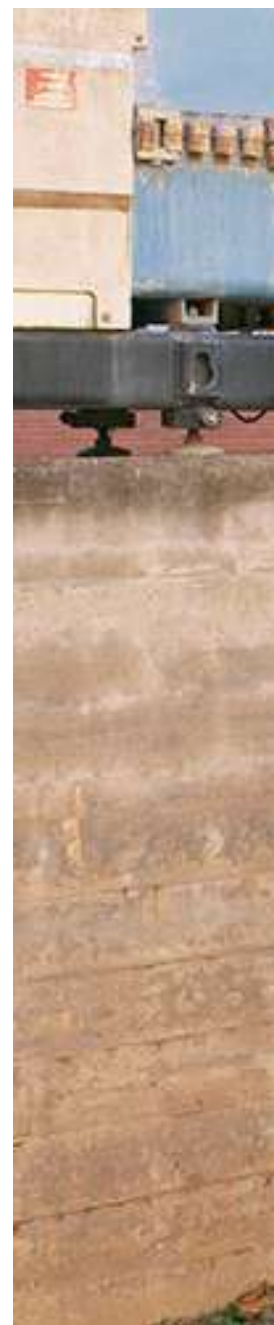
un enfoque innovador que proporciona representaciones matemáticas más precisas de los procesos físicos reales. La ausencia de infinitos, junto con la naturaleza cuántica intrínseca de la física de partículas, ha permitido al equipo científico implementar con éxito su nuevo algoritmo en un ordenador cuántico.

«Cuando un formalismo matemático conduce a complicaciones innecesarias, suele ser una señal de que existe un modo más elegante y directo para obtener el resultado», explica Germán Rodrigo, investigador principal del grupo LHCPHENO en el IFIC y líder de este estudio. «El método que hemos desarrollado incorpora de forma manifiesta el principio físico fundamental de causalidad, o causa-efecto. Además de posibilitar predicciones teóricas más avanzadas, ofrece una nueva perspectiva para entender las enigmáticas propiedades cuánticas del vacío», asegura el físico teórico.

Este método, publicado en la revista científica *Physical Review Letters*, se ha implementado por primera vez en un ordenador cuántico, un avance recogido en otro artículo publicado en la revista *Quantum Science and Technology*.

Aplicaciones en computación cuántica

Este hito ha facilitado la predicción, por primera vez en este tipo de plataformas, de la tasa de desintegración del bosón de Higgs, la partícula elemental responsable de la masa en el universo. Lograr este resultado en un ordenador cuántico, además de validar su capacidad para



De izquierda a derecha., J.J. Martínez de Lejarza, P.K. Dhani, G. Rodrigo, K. Pyretzidis y A.E. Rentería Olivo, miembros del grupo LHCPHENO.



abordar problemas avanzados de física teórica, abre nuevas posibilidades para el uso de la computación cuántica en simulaciones de partículas elementales y otras aplicaciones en física de altas energías.

Jorge Martínez de Lejarza, doctorando en el IFIC y uno de los autores del último trabajo, apunta: «Los ordenadores cuánticos prometen revolucionar la computación en el siglo XXI, superando a los ordenadores clásicos en la resolución de ciertos problemas concretos. En física de partículas, nos enfrentamos a algunos de los mayores desafíos en la ciencia y, en ese sentido, nuestra misión

es reformularlos para permitir su ejecución en ordenadores cuánticos, contribuyendo así a avanzar en una mejor comprensión del universo».

Este avance abre oportunidades para desarrollar aplicaciones en computación cuántica y representa un paso significativo en la exploración de las fronteras de la física de partículas. Los dos trabajos se han realizado en colaboración con personal investigador de la Universidad de Salamanca, la Universidad Autónoma de Sinaloa (México) y la Iniciativa en Tecnologías Cuánticas del CERN.