



MATEMÁTICAS Y FÍSICA

NUEVO MÉTODO PARA MEDIR Y DETECTAR

la materia oscura en el universo

Universitat de València (UV)

El grupo de investigación en Cosmología Computacional del Departamento de Astronomía y Astrofísica de la UV aporta nuevas pistas para la observación y cuantificación de la materia oscura en el universo. El trabajo sienta las bases teóricas para la búsqueda de un nuevo efecto observacional: la relación entre la intensidad de los choques de acreción y la cantidad de materia oscura.

La idea propuesta supone, según el artículo publicado por este equipo científico en *Nature Astronomy*, una nueva restricción al modelo cosmológico actual.

La materia oscura es una pieza clave del modelo cosmológico para la comprensión del universo. Dentro del paradigma actualmente aceptado, la naturaleza física del 85 % de la materia del universo es un misterio, ya que no es posible verla ni detectarla de manera directa. De ahí que se denomine «materia oscura». Entretanto, los métodos indirectos de detección vigentes presentan importantes incertidumbres. Hoy por hoy, la materia oscura se identifica a partir de la fuerza gravitatoria que esta ejerce sobre la materia ordinaria, que se observa y se mide con telescopios y otras herramientas de la astrofísica.

El nuevo método propuesto parte del análisis de una simulación computacional que abarca gran volumen del universo, incluyendo los cúmulos de galaxias y las gigantescas ondas de choque producidas durante su formación, es decir, los llamados «choques de acreción». Concreta-

mente, el trabajo demuestra que la masa total de los cúmulos, el radio del choque de acreción y la intensidad de este se encuentran estrechamente relacionados.

«Estas ondas de choque son consecuencia de la fuerte deceleración y subsiguiente calentamiento de la materia ordinaria, que alcanza velocidades supersónicas debido a la acción gravitatoria generada por la materia oscura», explica el físico David Vallés, investigador del programa *Atracció de Talent* de la UV, en el Departamento de Astronomía y Astrofísica, y primer autor del artículo. «El método que proponemos permitirá medir la masa total del cúmulo, un 85 % de la cual sabemos que corresponde a materia oscura», añade Vallés.

El resultado de este trabajo abre las puertas al establecimiento de un nuevo método científico, más preciso y confiable, para el estudio de la materia oscura, un factor fundamental para el modelo cosmológico del Big Bang. «A pesar del reto que supone medir las propiedades del gas alrededor de las ondas de choque más externas, algunos datos preliminares permiten esperar que, en los próximos años, diferentes proyectos observacionales en rayos X y ondas milimétricas consigan medir el radio y la intensidad de los choques de acreción para un gran número de cúmulos de galaxias», comenta Susana Planelles, profesora titular del Departamento de Astronomía y Astrofísica, codirectora del estudio y cofirmante del *paper*. «Y estas medidas directas permitirán aplicar el método que proponemos para estimar el contenido de





materia oscura en los cúmulos», añade la investigadora perteneciente al grupo de Cosmología Computacional responsable de la investigación.

Para desarrollar este estudio, el equipo se ha servido del supercomputador Lluís Vives, un sistema híbrido de memoria compartida y distribuida con más de diez mil núcleos de cálculo, que forma parte de la red de supercomputación de la UV. «Las simulaciones cosmológicas juegan el papel de grandes laboratorios virtuales en los que recrear y estudiar los distintos procesos físicos que determinan la formación y evolución del universo. En este sentido, las simulaciones han sido una herramienta clave para el avance de nuestra visión del cosmos», ex-

plica Vicent Quilis, catedrático de Astronomía y Astrofísica, responsable del grupo de Cosmología Computacional y cofirmante del trabajo.

Los resultados de este estudio supondrán una restricción al modelo cosmológico actual, que estima en un 85 % la cantidad de materia oscura del universo. «Esperamos que la aplicación del método que describimos permita utilizar toda una nueva generación de datos observacionales muy útiles para determinar los componentes del universo y contribuir, por consiguiente, a mejorar el modelo cosmológico que nos ayuda a entender la formación y evolución del cosmos», concluye Vicent Quilis.

Impresión artística de una estrella de neutrones, mostrada como una esfera azul y roja brillante con rasgos parecidos a chispas que salen volando de ella.
Foto: ICE-CSIC/D. Futselaar/Marino et al.

DESCUBREN TRES ESTRELLAS DE NEUTRONES DEMASIADO FRÍAS PARA SU EDAD

Los observatorios de rayos X XMM-Newton de la Agencia Espacial Europea (ESA) y Chandra de la NASA han detectado tres estrellas de neutrones jóvenes inusualmente frías para su edad. Al comparar sus propiedades con diferentes modelos de estrellas de neutrones, un equipo de astrónomos del Institut d'Estudis Espacials de Catalunya en el Instituto de Ciencias del Espacio (ICE-Consejo Superior de Investigaciones Científicas) y la Universidad de Alicante (UA), ha concluido en un estudio publicado en *Nature Astronomy* que las bajas temperaturas de estas descalifican alrededor del 75 % de los modelos conocidos. Este es un gran paso hacia el descubrimiento de la llamada ecuación de estado que describa

a todas las estrellas de neutrones, con importantes implicaciones para las leyes fundamentales del universo.

El trabajo ha contado con la participación del investigador del Departamento de Física Aplicada de la UA, José A. Pons, como colíder del estudio, y con la investigadora posdoctoral de esta misma institución, Clara Dehman.

Después de los agujeros negros estelares, las estrellas de neutrones son los objetos más densos del universo. Cada estrella de neutrones es el núcleo comprimido de una estrella gigante que quedó después de que la estrella explotara en una supernova. Tras quedarse sin combus-



tible, el núcleo de la estrella implosiona bajo la fuerza de la gravedad mientras sus capas exteriores son lanzadas al espacio.

La materia en el centro de una estrella de neutrones está tan comprimida que la comunidad científica aún no sabe qué forma adopta. Las estrellas de neutrones reciben su nombre por el hecho de que, bajo esta inmensa presión, incluso los átomos colapsan: los electrones se fusionan con los núcleos atómicos, convirtiendo los protones en neutrones. No obstante, podría ser todavía más extraño, ya que el calor y la presión extremos pueden estabilizar partículas más exóticas que no sobreviven en ningún otro

lugar o, posiblemente, fundir partículas en una especie de sopa de sus quarks constituyentes girando en espiral.

Lo que ocurre en el interior de una estrella de neutrones se describe por la ecuación de estado, un modelo teórico que describe procesos físicos que pueden ocurrir dentro de una estrella de neutrones. El problema es que todavía se desconoce cuál de los cientos de modelos de ecuaciones de estado posibles es correcto. Mientras que el comportamiento de las estrellas de neutrones a nivel individual puede depender de propiedades como su masa o la velocidad de giro, todas las estrellas de neutrones deben regirse por la misma ecuación de estado.

Demasiado frías

Al analizar los datos de las misiones, el equipo ha descubierto tres estrellas de neutrones excepcionalmente jóvenes y frías que son entre 10 y 100 veces más frías que otras de su misma edad. Comparando sus propiedades con las velocidades de enfriamiento predichas por diferentes modelos, el equipo concluye que la existencia de estas tres estrellas de neutrones descarta la mayoría de las ecuaciones de estado propuestas.

Sin embargo, las medidas fueron sólo el primer paso para sacar conclusiones sobre lo que estos «bichos raros» significan para la ecuación de estado de las estrellas de neutrones. Para ello, el equipo de investigación de Nanda Rea, en el ICE-CSIC, combinó la experiencia de Alessio Marino, Clara Dehman y Konstantinos Kowlakas, así como de Daniele Viganò, coautor del código de simulaciones de campos magnéticos.

En concreto, Clara Dehman lideró el cálculo de las «curvas de enfriamiento» de las estrellas de neutrones para las ecuaciones de estado que incorporan diferentes mecanismos de enfriamiento. Esto implica representar lo que predice cada modelo sobre cómo cambia con el tiempo la luminosidad de una estrella de neutrones, una característica directamente relacionada con su temperatura. La forma de estas curvas depende de varias propiedades diferentes de una estrella de neutrones, y no todas pueden determinarse con precisión a partir de observaciones.

«Como las estrellas de neutrones más masivas tienen más partículas, podrían desencadenarse procesos especiales que hacen que las estrellas de neutrones se enfríen más rápidamente. Es como tener algunas de las respuestas de un crucigrama ya disponibles: hace que completar el resto de las respuestas sea más fácil», concluye Dehman.

TRES MONSTRUOS ROJOS Y 36 GALAXIAS MASIVAS

ocultas entre polvo interestelar

Universitat de València (UV)

Un estudio internacional en el que participa la UV revela una abundancia de galaxias masivas –un total de 36– oscurecidas por su propio polvo interestelar e identificadas espectroscópicamente, es decir, a través de líneas en el espectro originadas por los elementos químicos más abundantes –hidrógeno y oxígeno– en el universo lejano.

Dirigido por la Universidad de Ginebra (UNIGE) y publicado en la revista *Nature*, el estudio indica que tres de estas galaxias están formadas por 100.000 millones de estrellas. Son galaxias ultramasivas, casi tan masivas como la Vía Láctea, y el hecho de haberlas encontrado en un área pequeña del cielo sugiere que pudieron existir en cantidades considerables hace apenas 1000 millones de años después del Big Bang. Esto refuerza la hipótesis de que las galaxias en el universo temprano formaron sus estrellas de forma mucho más eficiente de lo que se pensaba.

«Gracias a la sensibilidad sin precedentes del telescopio James Webb, estas han sido identificadas de forma inmediata», comenta Mauro Stefanon, investigador CIDEAGENT del Departamento de Astronomía de la UV y coautor del artículo. «La confirmación espectroscópica de estas galaxias no sólo confirma su existencia en esas épocas, sino que nos permite medir sus masas estelares con mucha confianza. La combinación entre el gran número de galaxias identificadas en un área muy pequeña del cielo y sus elevadas masas estelares indica que, casi la mitad del gas contenido en ellas se ha transformado en nuevas estrellas. La proporción es muy alta y esto

denota una formación estelar tan sumamente eficiente en esa época que desafía los modelos cosmológicos actuales», explica Stefanon.

Con todo, no se trata de las primeras galaxias masivas en el universo primitivo observadas por el James Webb. En 2022, un equipo internacional identificó cuatro galaxias que probablemente se fusionaron a partir de gas alrededor de 350 millones de años después del Big Bang, las más antiguas detectadas hasta la actualidad. Y en 2023, el proyecto en el que participa la UV identificó una población de seis galaxias observadas en una época de entre 500 y 800 millones desde la formación del universo.

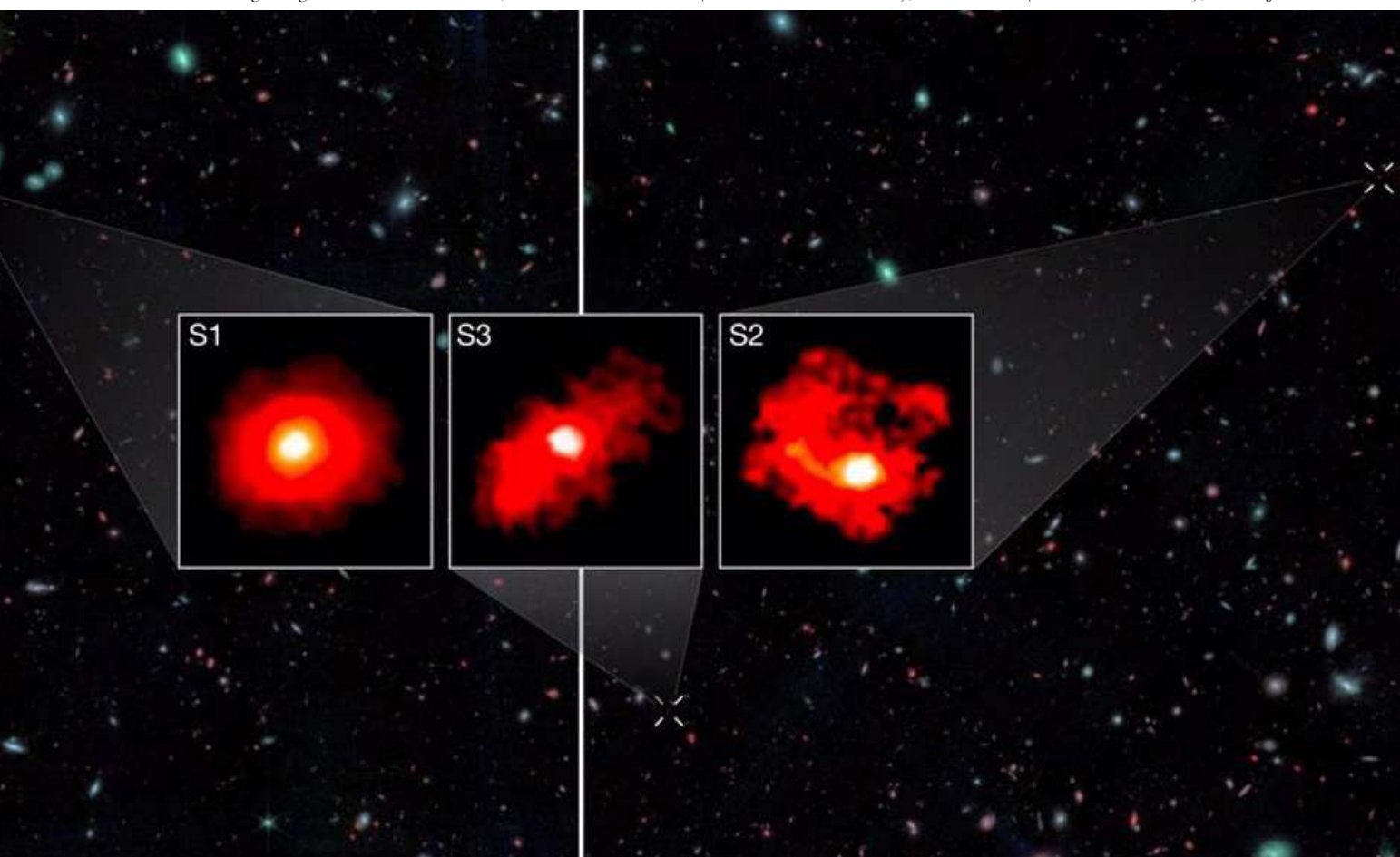
«Además de tener masas elevadas, las observaciones indican que estas galaxias están formando estrellas muy intensamente, entre 600 y 1000 nuevas cada año. Se trata de una tasa de formación estelar que corresponde aproximadamente al 20 % del total de la tasa de formación estelar cósmica, y se produce en los primeros mil millones de años de historia del universo. Todo esto que ahora vemos se hallaba escondido detrás del polvo», explica el científico de la UV.

Este descubrimiento ha sido posible gracias al programa FRESCO del telescopio espacial James Webb, que utiliza el espectrógrafo NIR-Cam/grism para medir con precisión las distancias y las masas estelares de las galaxias.

Descubrimiento de «monstruos rojos»



Imagen tomada por James Webb. Los tres monstruos rojos representan galaxias extremadamente masivas y polvorientas en los primeros mil millones de años tras el Big Bang. Foto: NASA/CSA/ESA, M. Xiao & P. A. Oesch (Universidad de Ginebra), G. Brammer (Instituto Niels Bohr), Dawn JWST.



Al analizar las galaxias del sondeo de FRESCO, se ha comprobado que las tres galaxias ultramasivas halladas –que han sido bautizadas como «los tres monstruos rojos» por el aspecto que les confiere su alto contenido en polvo en las imágenes del telescopio espacial James Webb– están formando estrellas con casi el doble de eficiencia que sus homólogas de menor masa y que las galaxias de épocas posteriores.

Aunque estos hallazgos no entran en conflicto con el modelo cosmológico estándar, sí que plantean nuevos interrogantes a las teorías existentes sobre formación de galaxias.

De este modo, tal como argumenta el artículo, es posible que los modelos actuales tengan que considerar procesos únicos que permitieron a ciertas galaxias masivas tempranas lograr una formación estelar tan eficiente y, por tanto, formarse muy rápidamente y en una época tan temprana en el universo.

Futuras observaciones con el telescopio espacial James Webb y el Atacama Large Millimeter Array (ALMA) proporcionarán más información sobre estos monstruos rojos ultramasivos y revelarán muestras más amplias de este tipo de fuentes.



LA MISIÓN DART REVELA QUE EL SATÉLITE DIDYMOS NO TIENE FORMA DE PEONZA

La revista *Nature Communications* ha publicado un artículo que tiene al profesor Adriano Campo, del equipo de Ciencias Planetarias de la Universidad de Alicante (UA), como autor principal. En él, se explica cómo, tras llevarse a cabo la misión DART de la NASA, las imágenes tomadas han revelado que el satélite Didymos no tenía la típica forma de «peonza» esperada para este tipo de cuerpos, sino más bien la de una peonza degradada, con muestras de desmoronamientos laterales muy pronunciados.

Según los investigadores, a menudo estas características se achacan a la acción de la radiación solar, que es absorbida por el cuerpo y posteriormente reemitida (como pasa con el asfalto de una carretera, que absorbe de día la luz solar y la reemite como calor horas más tarde). «Pero esto ocurre de manera asimétrica, provocando

una lenta, pero constante aceleración en la rotación del cuerpo, que finalmente provocaría avalanchas por acumulación de tensiones en la superficie (un poco como el mecanismo que produce terremotos en nuestro planeta)», señala el profesor Campo.

El artículo explica que es más probable que los desmoronamientos mostrados en las imágenes de DART se deban a colisiones más que al efecto de aceleración mencionado (se denomina efecto YORP) y que, en efecto, Didymos, aunque es un asteroide cercano a la Tierra, tiene una órbita achatada y termina pasando la tercera parte de su tiempo metida en el cinturón de asteroides, donde es grande la probabilidad de colisionar con pequeños cuerpos rocosos. El intervalo de tiempo entre esas colisiones resulta ser más corto que el tiempo que necesitaría la aceleración debida al efecto YORP



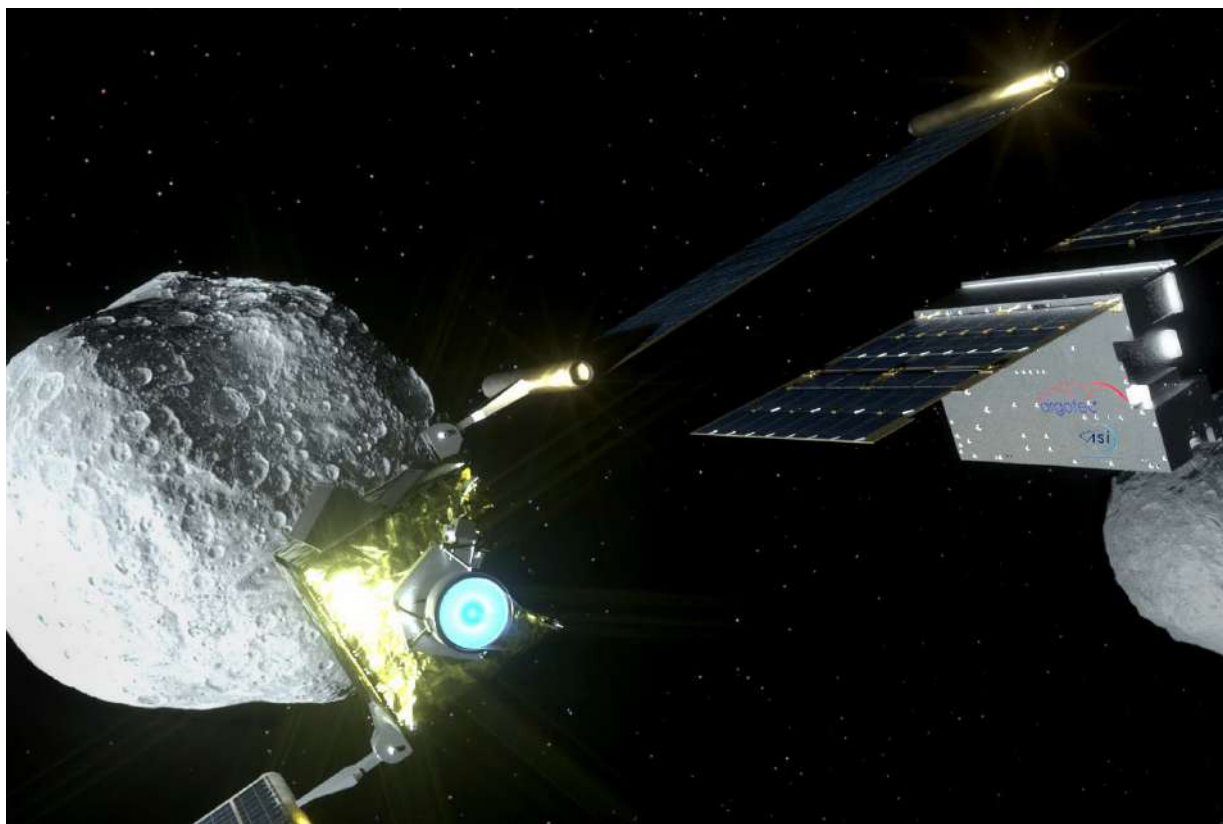
para acumular en la superficie la tensión necesaria para, finalmente, desencadenar los desmoronamientos. Al contrario, las frecuentes pequeñas colisiones liberan esas tensiones y evitan grandes avalanchas. Finalmente, el estudio muestra que son las colisiones algo mayores las que provocan las características superficiales que se observan.

Adriano Campo señala que, en 2026, cuando la sonda europea Hera visite también Didymos, se obtendrán imágenes de mayor resolución que permitirán afinar los detalles de la historia de la colisión reciente de este peculiar asteroide e intentar aclarar de qué manera se formó su satélite. Además, se podrán responder cuestiones como si se trató de una colisión o de una lenta aceleración debida a la acción de la radiación solar.

Antecedentes

El 27 de septiembre de 2022 la nave DART colisionó a una velocidad de 23.400 kilómetros por hora con el sistema de asteroides binario Didymos, un ambicioso proyecto internacional cuyo objetivo es comprobar si es posible cambiar la órbita de un asteroide si este supusiera una amenaza para la Tierra.

Adriano Campo es coordinador de equipo de Ciencias Planetarias (grupo de Astronomía y Astrofísica de la UA), en el Instituto Universitario de Física Aplicada a las Ciencias y las Tecnologías (IUFACyT) de la UA. El equipo se encarga de estudiar las consecuencias de la colisión sobre el asteroide, a partir de las imágenes recibidas tras la colisión.



EL ASTEROIDE DIMORPHOS y la estructura del material expulsado tras DART

Un artículo publicado en la revista *Nature* analiza la estructura de la nube de escombros y polvo (llamada penacho) expulsada por el asteroide Dimorphos tras el impacto de la nave espacial DART (*Double Asteroid Redirection Test*), la prueba de defensa planetaria de la NASA en la que colabora el equipo de Ciencias Planetarias del Grupo de Investigación de Astronomía y Astrofísica de la Universidad de Alicante (UA). La misión DART dirigió, el 26 de septiembre de 2022, una nave espacial de media tonelada disparada a 22 mil km/h hacia Dimorphos, el satélite del asteroide Didymos cercano a la Tierra, en el primer experimento de defensa planetaria intentado en la historia, cambiando su trayectoria con éxito.

Tras un año y medio, y bajo la atenta mirada del dispositivo espacial LICIACube (*Light Italian Cubesat for Imaging of Asteroids*) de la Agencia Espacial Italiana (ASI), un equipo internacional de investigadores, dirigido por el Istituto Nazionale di Astrofisica- INAF (Italia), y en el que participa el catedrático de Física de la UA, Adriano Campo, ofrece otra instantánea de lo ocurrido en los se-

gundos posteriores al impacto. Según se detalla en el artículo, el material expulsado del cráter de impacto formaba un cono con un ángulo de apertura de unos 140 grados y una estructura compleja y heterogénea, caracterizada por filamentos, granos de polvo y fragmentos individuales o agrupados, incluso del tamaño de unos metros, expulsados como consecuencia del impacto de DART.

Las imágenes muestran que la parte más interna del cono tiene un color azulado que se vuelve gradualmente más rojizo a medida que aumenta la distancia a Dimorphos. La velocidad del material expulsado varía de unas pocas decenas de m/s a unos 500 m/s, aunque hay evidencia de que también ha sido expulsado mucho material a pocas decenas de cm/s. «Se trata de las únicas imágenes recogidas *in situ* de la primera misión de defensa planetaria realizada hasta la fecha. En este momento, estamos colaborando en la interpretación física de algunas características mostradas por las imágenes que todavía no han sido explicadas de manera satisfactoria», destaca el investigador Adriano Campo.

CAMPOS MAGNÉTICOS ESPIRALES

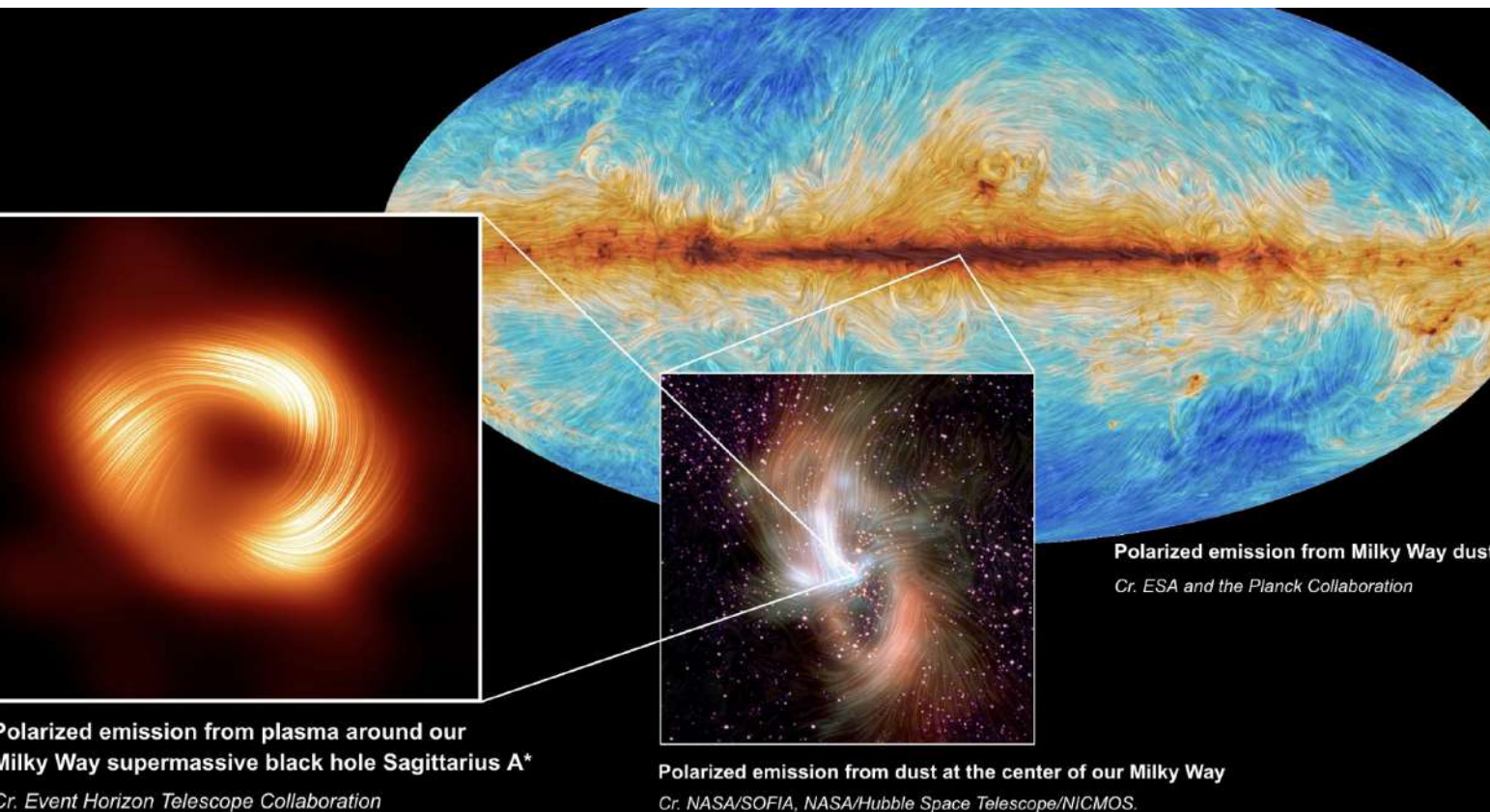
en el agujero negro del centro de nuestra galaxia

La colaboración del Telescopio Horizonte de Sucesos (EHT, por sus siglas en inglés) ha presentado la primera imagen en luz polarizada de SgrA*, el agujero negro supermasivo situado en el centro de nuestra galaxia. Esta imagen revela la presencia de intensos y organizados campos magnéticos que emergen en forma de espiral desde el borde mismo del agujero negro. Esta estructura es similar a la observada en el agujero negro central de la galaxia M87, lo que sugiere que estos campos magnéticos intensos pueden ser comunes a todos los agujeros negros y apunta a la posible existencia de un chorro oculto en SgrA*, como el existente en M87*. Estos resultados han sido publicados en *The Astrophysical Journal Letters*.

«Obtener imágenes de agujeros negros con luz polarizada no es tan fácil como ponerse unas gafas de sol polarizadas. La tecnología que hay detrás lleva décadas desarrollándose y, por fin, en esta década estamos empezando a recoger sus frutos. Hemos tenido que desarrollar algoritmos pioneros para recuperar la débil señal polarizada de estos agujeros negros. Desde la Universitat de València (UV), hemos aportado datos de calibración fundamentales para el análisis de estas observaciones; datos que también nos han servido para detectar el reflejo polarizado de materia orbitando el agujero negro», declara Iván Martí-Vidal, profesor titular del Departamento de Astronomía y Astrofísica de la UV y miembro del EHT.

Contar con imágenes y datos de ambos agujeros negros supermasivos en luz no polarizada abre nuevas oportunidades para comparar y contrastar agujeros negros de distintos tamaños y masas. A medida que la tecnología avance, es probable que estas imágenes revelen aún más secretos sobre los agujeros negros y sus posibles similitudes o diferencias.

«Hace mucho tiempo que estamos buscando el posible chorro de materia emanando de nuestro centro galáctico. Esta nueva imagen polarizada nos dice que el chorro debería estar ahí, pero aún no lo vemos. Es una cuestión intrigante que aún nos queda por esclarecer», declara Alejandro Mus, doctor en Física por la UV y miembro del EHT.



Polarized emission from plasma around our Milky Way supermassive black hole Sagittarius A*

Cr. Event Horizon Telescope Collaboration

Polarized emission from dust at the center of our Milky Way

Cr. NASA/SOFIA, NASA/Hubble Space Telescope/NICMOS.

Polarized emission from Milky Way dust

Cr. ESA and the Planck Collaboration

NUEVAS IMÁGENES DEL AGUJERO NEGRO DEL M87

de su sombra central y de su anillo de luz

Universitat de València (UV)

La Colaboración del Telescopio de Horizonte de Sucesos (EHT) publica, en la revista *Astronomy & Astrophysics*, una nueva imagen del agujero negro de la galaxia M87, a partir de datos tomados en abril de 2018 (un año después de los de la primera imagen). La nueva instantánea de M87 confirma la presencia de una sombra central rodeada por un anillo de luz donde, no obstante, la parte más brillante ha cambiado su posición respecto a la de 2017.

Gracias a la participación del Telescopio de Groenlandia (GLT) en estas nuevas observaciones, el EHT ha conseguido una sensibilidad y fidelidad mayores que las de 2017, confirmando, sin lugar a dudas, los principales hallazgos que se publicaron a partir de aquellos primeros datos. El EHT presenta la nueva imagen, donde se ve la sombra central del agujero negro envuelta en un anillo de luz del mismo tamaño que el observado en 2017.

«La reproducibilidad de resultados es un requerimiento indispensable en la ciencia», ha destacado Keiichi Asada, investigador del Instituto de Astronomía y Astrofísica de la Academia Sinica en Taiwan. «Confirmar la presencia del anillo con datos nuevos e independientes es un gran logro y una fuerte evidencia en favor de nuestras conclusiones originales», ha añadido.

En 2017, el EHT publicó la primera imagen de este agujero negro, situado en el centro de la galaxia elíptica gigante M87, a unos 55 millones de años-luz de la Tierra. «Aquellas primeras observaciones de 2017 nos proporcionaron muchí-

sima información», ha declarado Iván Martí-Vidal, investigador de la UV. «Pudimos explorar, incluso, la naturaleza del plasma y la geometría de los campos magnéticos que rodean el horizonte de sucesos, a partir de la luz polarizada de la imagen», ha matizado Martí-Vidal.

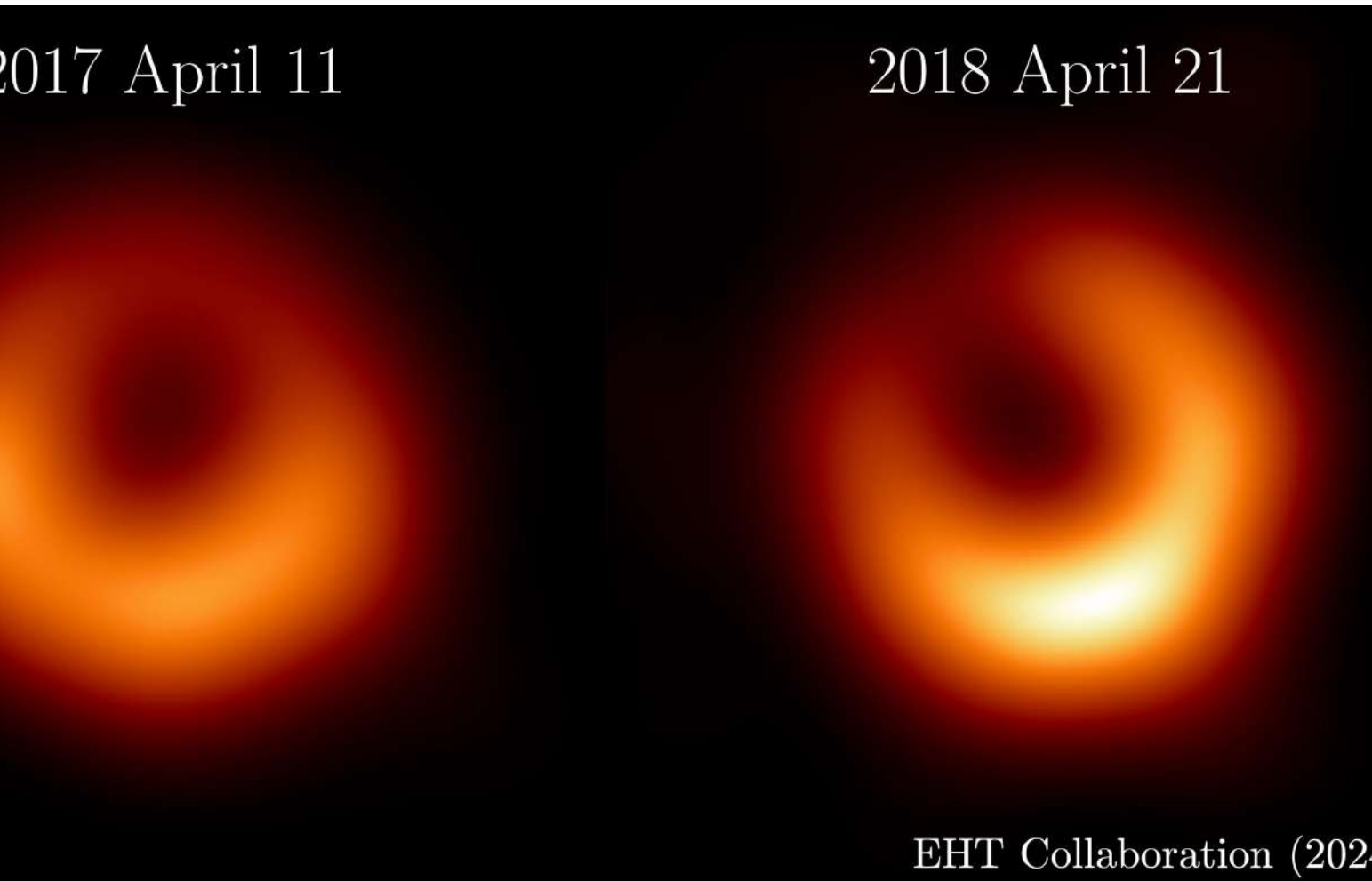
El EHT es un instrumento formado por distintos radiotelescopios distribuidos por la Tierra, y está en continuo desarrollo. En estas nuevas observaciones, es de resaltar la participación del GLT, que no formaba parte del EHT en 2017. Haber obtenido, con esta versión ampliada del EHT, resultados compatibles a los de aquel año es de suma importancia, ya que se confirman de forma muy robusta las conclusiones publicadas originalmente.

«Avanzar en esta ciencia tan puntera requiere el desarrollo continuo de técnicas de análisis y de evaluación de la calidad de los datos», ha declarado Rohan Dahale, del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), quien ha añadido: «Incluir al GLT ha permitido mejorar mucho la cobertura de nuestro telescopio. En este y otros aspectos, el EHT ha continuado mejorando durante sus campañas de observación de 2021, 2022 y 2024; algo que nos entusiasma y que ayudará a ampliar nuestros conocimientos sobre la astrofísica de los agujeros negros».

«Una de las propiedades más remarcables de un agujero negro es que su tamaño depende muy fuertemente de un único parámetro: la masa», ha recalcado Nikita Yadlapalli Yurk, investigadora del Jet Propulsion Laboratory (California).

2017 April 11

2018 April 21



EHT Collaboration (202

«Como M87 está engullendo materia de forma muy lenta, podemos considerar que su masa permanece constante a escalas de siglos o incluso milenios. Es muy excitante ver que, efectivamente, la nueva imagen de 2018 confirma esta predicción».

En cuanto al cambio observado en la posición del pico de brillo del anillo, los modelos de Astrofísica Relativista (que ayudan a explicar las imágenes de M87) predicen que la distribución del material que rodea al agujero negro (y que afecta al brillo del anillo) debería haber cambiado entre 2017 y 2018. Y esto es, efectivamente, lo que muestran los nuevos datos. «El cambio en la posición del pico de brillo es algo que ya predijimos cuando publicamos la primera imagen», ha manifestado Britt Jetter, investigador en la Academia Sinica de Taiwan. «Estudiar cómo este pico va cambiando con el tiempo nos permite, de hecho, poner a prueba nuestras teorías sobre el comportamiento del plasma y los campos magnéticos que rodean al agujero negro».

«Trabajar con este tipo de observaciones no es tarea sencilla; el EHT no es una simple cámara de fotos», ha matizado Iván Martí-Vidal. Por otra parte, Ezequiel Al-bentosa, investigador en la UV y miembro del EHT, ha aclarado: «Desde la Universitat estamos contribuyendo de forma notable al desarrollo de algoritmos que nos permitan extraer la máxima información posible de estos valiosos datos».

Mirando hacia el futuro, Alejandro Mus, investigador de la UV, ha afirmado: «No hemos de olvidar el otro agujero negro del que el EHT es capaz de obtener imágenes: nuestro centro galáctico, SgrA. Tampoco hemos de olvidar a otros cuásares y blázares que hemos ido observado en todas y cada una de las campañas del EHT. La ciencia que aún nos queda por hacer con todos estos datos será formidable. Lo mejor aún está por venir», ha concluido Mus.

*Adrià Casanovas en el dispositivo de medida de reacciones con neutrones en la instalación CERN n_TOF
Foto: Julien Marius Ordan. CERN*

RECREAN EN EL CERN UNA REACCIÓN NUCLEAR CLAVE PARA CONOCER LA EVOLUCIÓN QUÍMICA DE NUESTRA GALAXIA Y DEL SISTEMA SOLAR





Un grupo de investigación del Instituto de Física Corpuscular (IFIC), centro mixto del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y de la Universitat de València (UV), y la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), gracias a una colaboración con el Paul-Scherrer Institute (PSI) en Suiza y con el reactor de alto flujo de Grenoble en el Institut Laue-Langevin (ILL) en Francia, han conseguido producir una muestra de Talio-204 suficientemente grande como para trabajar con ella en el laboratorio de experimentación con neutrones n_TOF del CERN, ubicado en Ginebra (Suiza).

Tras sintetizar y caracterizar esta muestra, el equipo de investigación midió por primera vez la reacción de un haz de neutrones sobre este isótopo. A continuación, realizaron cálculos con expertos en astrofísica en el marco de NuGrid, una colaboración internacional que desarrolla herramientas para simulaciones de nucleosíntesis a gran escala con aplicaciones en física nuclear.

Los resultados obtenidos han permitido cuantificar de manera precisa, por primera vez, la cantidad de Plomo-204 que se produce en estrellas gigantes rojas de tipo AGB. Este tipo de estrellas tiene un papel fundamental en la evolución de la composición química de los elementos en nuestra galaxia y el sistema solar, siendo las responsables de la creación de la mitad de los elementos más pesados que el hierro existente en la naturaleza. El ciclo de vida de estas estrellas contribuye al enriquecimiento químico de las galaxias en el universo.

«El resultado muestra un excelente acuerdo con abundancias de Plomo-204 medidas en condritas carbonáceas de tipo Ivuna (CI), meteoritos que preservan la composición química del sistema solar», explica César Domingo, investigador del CSIC que lidera el estudio en el IFIC. «No sería necesario recurrir a hipótesis alternativas de nucleosíntesis de Pb204, como supernovas o posibles mecanismos de fraccionamiento que pudieran haber ocurrido en el sistema solar temprano», puntualiza.

«A pesar de que este experimento ha supuesto un avance significativo, necesitamos nuevas ideas disruptivas para poder acceder en el laboratorio a muchos más núcleos de gran interés como este, pero que se producen en entornos estelares explosivos como supernovas o sistemas binarios de estrellas de neutrones», finaliza el investigador.

OBSERVAN EL ENTRELAZAMIENTO CUÁNTICO A LA MAYOR ENERGÍA LOGRADA HASTA AHORA



Los experimentos ATLAS y CMS del Gran Colisionador de Hadrones (LHC, por sus siglas en inglés) en el Laboratorio Europeo de Física de Partículas (CERN) de Ginebra (Suiza) han observado, por primera vez y de forma independiente, el entrelazamiento cuántico entre dos quarks top, la partícula elemental más pesada que se conoce. Este fenómeno permite que dos partículas estén vinculadas sin importar la distancia a la que se encuentren. Esta observación se ha realizado a la mayor energía alcanzada hasta la fecha en un experimento, abriendo una nueva perspectiva en el complejo mundo de la física cuántica. En el hallazgo, participa el Instituto de Física Corpuscular (IFIC), centro mixto del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y la Universitat de València (UV).

El entrelazamiento cuántico es, quizás, la característica más genuina y fascinante de la física cuántica, la teoría de lo muy pequeño. Si dos partículas están entrelazadas cuánticamente, el estado de una partícula está vinculado al de la otra, sin importar lo alejadas estén. Este asombroso fenómeno, que no tiene análogo en la física clásica, ha sido observado en una amplia variedad de sistemas y ha encontrado varias aplicaciones importantes, como la criptografía cuántica y la computación cuántica. En 2022, el Premio Nobel de Física fue otorgado a Alain Aspect, John F. Clauser y Anton Zeilinger por sus experimentos pioneros con fotones entrelazados. Estos experimentos confirmaron las predicciones sobre la manifestación del entrelazamiento hechas por el físico teórico John Bell, y dieron origen a la ciencia de



la información cuántica.

El entrelazamiento ha permanecido, en gran medida, inexplorado a altas energías, accesibles únicamente en grandes colisionadores de partículas como el LHC. En un artículo publicado en *Nature*, la colaboración ATLAS informó de cómo logró observar el entrelazamiento cuántico en el LHC, por primera vez, entre las partículas elementales llamadas quarks top y a la mayor energía hasta ahora: 13 teraelectronvoltios (TeV). Observado por primera vez por ATLAS en septiembre de 2023 y, posteriormente, confirmado en observaciones independientes realizadas por la colaboración CMS, este resultado ha abierto una nueva perspectiva en el complejo mundo de la física cuántica.

«Si bien la física de partículas está profundamente arraigada en la mecánica cuántica, la observación del entrelazamiento cuántico en un nuevo sistema de partículas y a la mayor energía lograda hasta ahora es un hito notable», afirma el portavoz de ATLAS, Andreas Hoecker. «Abre el camino a nuevas investigaciones sobre este fascinante fenómeno, ofreciendo un rico menú de exploración a medida que nuestro volumen de datos continúa creciendo».

Los equipos de ATLAS y CMS observaron el entrelazamiento cuántico entre un quark top y un antiquark top, su antipartícula. Las observaciones se basan en un método para utilizar pares de quarks top producidos en el LHC como un nuevo sistema para estudiar el entrelazamiento. Normalmente, el quark top se desintegra en otras partículas antes de que tenga tiempo de combinarse con otros quarks, transfiriendo sus propiedades a las partículas a las que se desintegra. Es precisamente una de esas propiedades, el espín, la que permite estudiar el entrelazamiento entre dos partículas.

Para observar el entrelazamiento entre quarks top, las colaboraciones de ATLAS y CMS seleccionaron pares de quarks top a partir de datos de colisiones protón-protón que tuvieron lugar durante el segundo periodo de toma de datos del LHC, llamado Run2, entre 2015 y 2018. Los equipos de ATLAS y CMS observaron entrelazamiento del espín entre quarks top con una significancia estadística superior a cinco desviaciones estándar.

Participación del IFIC

El IFIC participa en el experimento ATLAS del LHC desde sus comienzos, un detector del tamaño de una catedral donde participan más de 3000 físicos e ingenieros de todo el mundo. En concreto, dos investigadores del CSIC en el IFIC, Carlos Escobar y Marcel Vos, han participado en el proceso de revisión de todos los aspectos del análisis que publica *Nature*.

«Como es normal con un resultado rompedor, ha sido un proceso de revisión intenso, tanto dentro de la colaboración como con la revista. Después de tres años de trabajo, estamos muy contentos de ver este resultado publicado en *Nature*», comenta Carlos Escobar, investigador Ramón y Cajal del CSIC en el IFIC. «Esta medida de ATLAS y la confirmación de CMS marcan el inicio de una nueva forma de estudiar los fundamentos de la mecánica cuántica. Hay muchas ideas nuevas explorando el potencial del LHC para aclarar la interpretación de la física cuántica», finaliza Marcel Vos.

ENTENDIENDO LA TURBULENCIA

mediante inteligencia artificial

Universitat Politècnica de València (UPV)

Cuando uno oye la palabra turbulencia, siempre piensa en los incómodos movimientos que sufrimos cuando viajamos en un avión. Sin embargo, la turbulencia es mucho más y está presente de forma continua en nuestras vidas.

Para situarnos en contexto, por turbulencia nos referimos al estado irregular y caótico que presenta el movimiento de los fluidos, gases y líquidos, en la mayoría de situaciones. Algunos ejemplo de flujos turbulentos son el movimiento del aire en nuestras ciudades o del agua en mares y ríos, pero también el que se produce dentro de los motores o alrededor de coches, barcos y aviones. De hecho, la turbulencia es uno de los responsables de la pérdida de energía en estos medios de transporte, siendo culpable de hasta un 15 % del CO₂ vertido por la humanidad anualmente.

Un equipo internacional formado por científicos de la UPV y las universidades de Edimburgo y Melbourne, y liderado por el investigador Ricardo Vinuesa, del Instituto Flow del Royal Institute of Technology (KTH), ha desarrollado una nueva técnica que nos permite estudiar la turbulencia de una forma completamente diferente a la usada en los últimos 100 años. Su trabajo ha sido publicado en *Nature Communications*.

La Inteligencia Artificial, fundamental

La principal dificultad de la mecánica de fluidos es que «aunque las ecuaciones de la mecánica de fluidos tienen cerca de 180 años, el proble-

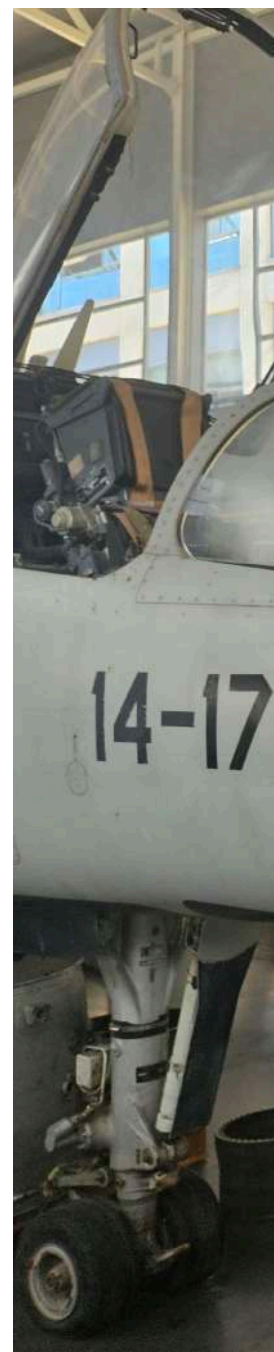
ma sigue abierto. Este tipo de ecuaciones siguen siendo irresolubles de forma algebraica o numérica para casos prácticos, incluso para los mayores ordenadores del mundo. Para un avión comercial típico, necesitaríamos una memoria equivalente a un mes de internet sólo para poder configurar la simulación», indica Sergio Hoyas, profesor de ingeniería aeroespacial de la UPV e investigador del Instituto Universitario de Matemática Pura y Aplicada de la UPV.

«Necesitamos comprender la turbulencia para poder mejorar los modelos simplificados que se usan en el día a día. Y hay una nueva herramienta: la Inteligencia Artificial», añade Ricardo Vinuesa, ingeniero industrial por la UPV y profesor asociado en KTH.

Aunque ya hay varios trabajos que aplican la inteligencia artificial a la mecánica de fluidos, la gran novedad de este estudio es que permite, por primera vez, no simular o predecir, sino entender la turbulencia.

A partir de una base de datos de cerca de 1 terabyte, el equipo de investigadores ha entrenado una red neuronal con la que se puede predecir el movimiento de un flujo turbulento. Usando esta red ha conseguido seguir la evolución del flujo eliminando pequeñas estructuras individualmente, evaluando posteriormente el efecto de estas estructuras mediante el algoritmo SHAP.

Tal y como señala Andrés Cremades, investigador del KTH y primer autor del artículo, «lo más importante es que los resultados de este

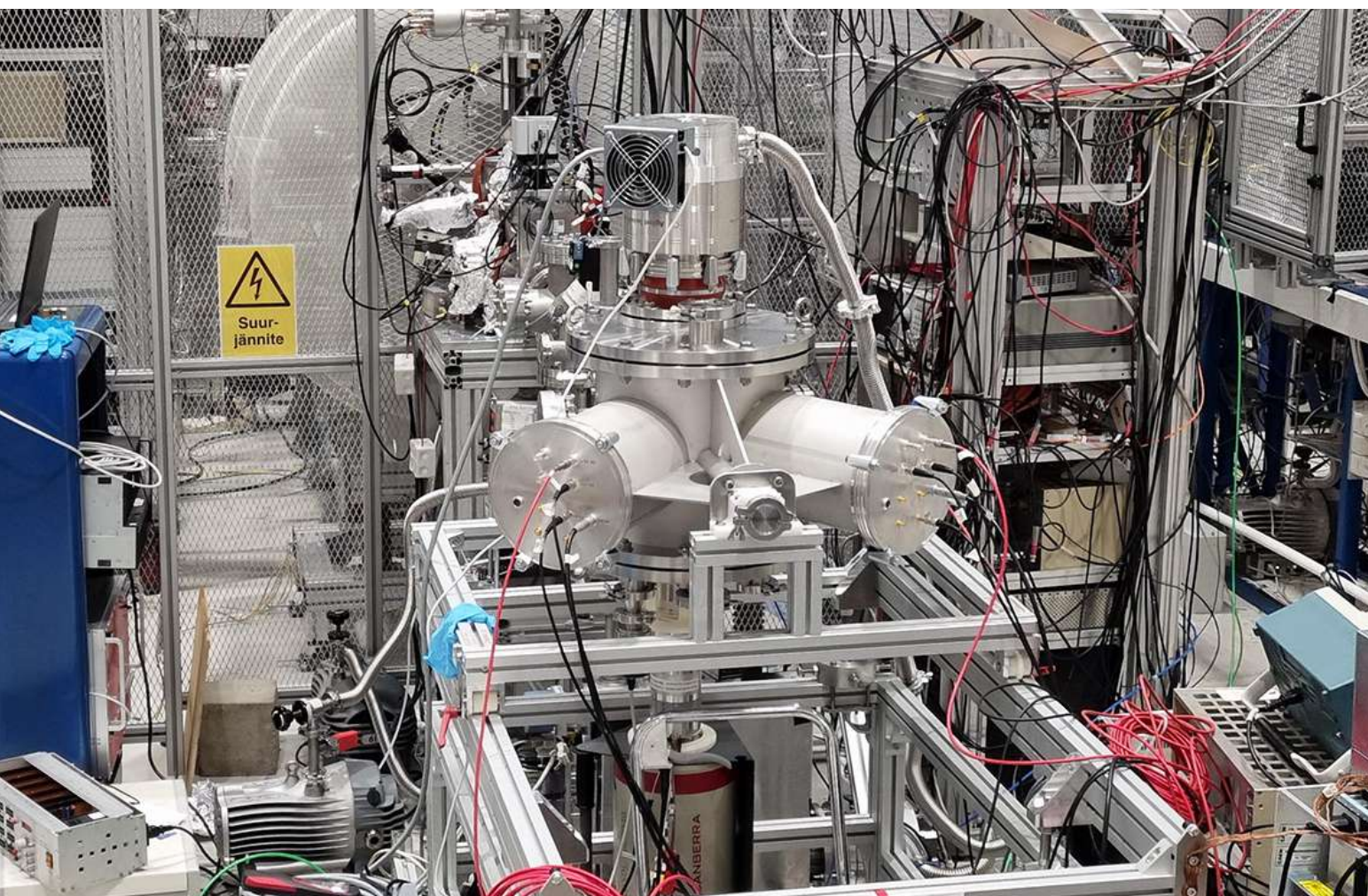


De izquierda a derecha, Andrés Cremades y Sergio Hoyas.



análisis coinciden exactamente con el conocimiento adquirido en los últimos 40 años y lo amplían. Nuestro método ha conseguido reproducir este conocimiento sin que la red neuronal sepa nada de física».

«La validación experimental con los datos de la Universidad de Melbourne indica que nuestro método es aplicable a flujos realistas y abre un camino totalmente novedoso para entender la turbulencia», termina Vinuesa.



AVANCES EN NEUTRINOS

emitidos en reactores nucleares

El grupo de Espectroscopía Gamma y de Neutrones del Instituto de Física Corpuscular (IFIC), centro mixto del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y la Universitat de València (UV), junto a equipos científicos de Francia, Inglaterra y Finlandia, ha desarrollado un nuevo sistema de detección que pretende esclarecer algunas de las actuales discrepancias entre los modelos teóricos y las observaciones registradas en los procesos de detección de neutrinos emitidos en reactores nucleares.

Los reactores nucleares constituyen la mayor fuente de neutrinos pacífica que conocemos hoy en día. Cada fisión nuclear producida es seguida por aproximadamente seis desintegraciones beta, y en cada una de estas se emite un antineutrino. Con ello, un reactor nuclear convencional produce del orden de 1020 neutrinos por segundo. Estas cifras dan una idea de la relevancia de los reactores nucleares en el estudio de la física de neutrinos, las partículas elementales más abundantes del universo que, a su vez, son extremadamente difíciles de detectar debido a que no tienen carga eléctrica ni apenas masa. Gracias al uso de reactores nucleares se pudo identificar por primera vez esta elusiva partícula y, actualmente, la comunidad investigadora puede estudiar las propiedades de los neutrinos a través de detectores situados a diferentes distancias de un reactor nuclear.

Alejandro Algora, investigador científico del CSIC en el IFIC, investigador principal del grupo y portavoz del experimento, señala que «la ventaja es que, en instalaciones como la de Finlandia, es posible producir haces de gran pureza de los isótopos de interés, lo que permite tener un mayor control sobre las posibles contaminaciones de estas medidas, algo que no se podía realizar anteriormente. También, nuestras medidas se benefician del desarrollo ocurrido en las últimas décadas en las técnicas de instrumentación y análisis».

ESTUDIO DE NEUTRONES

y su comportamiento en nuevo material sintético

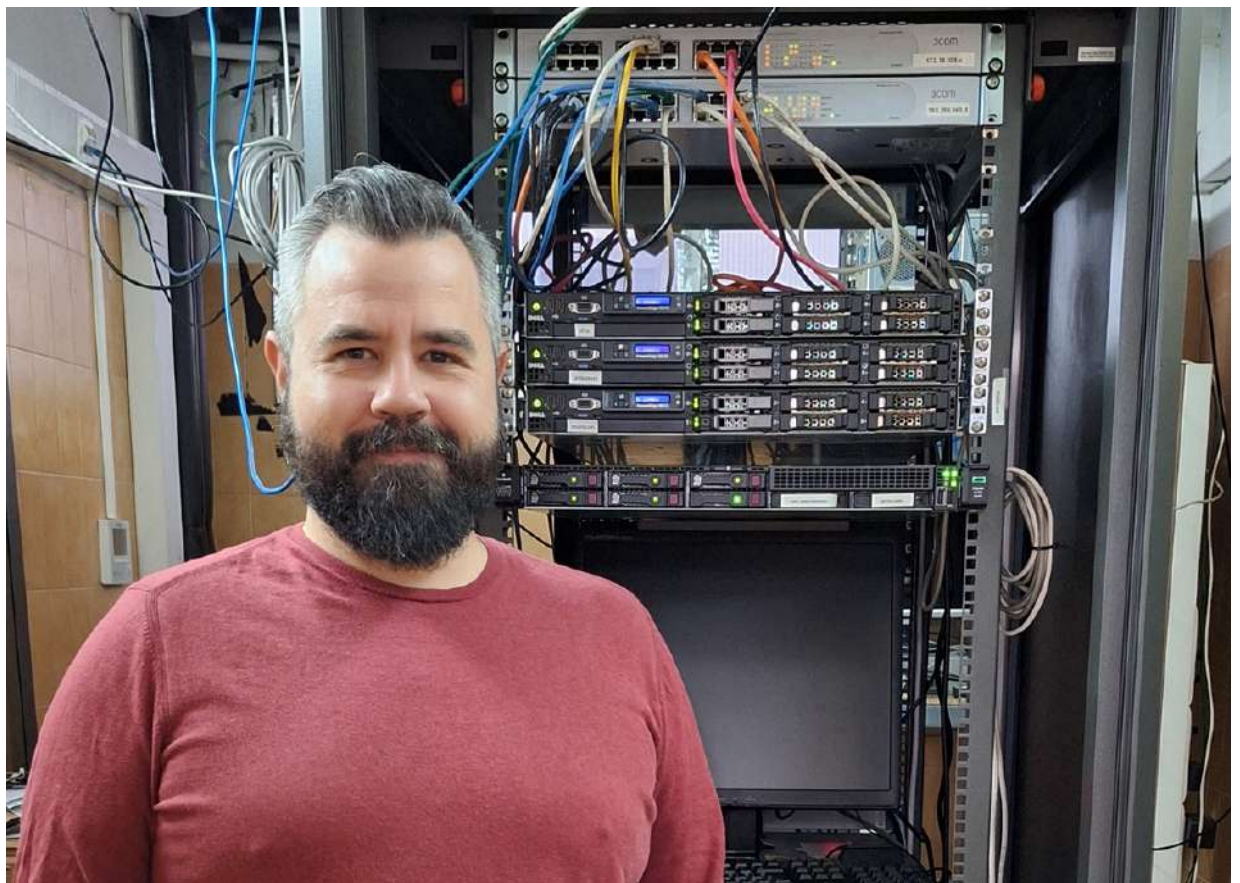
La revista *Nature* ha publicado un artículo en el que ha participado Daniel Gosálbez, investigador distinguido María Zambrano en el Departamento de Física Aplicada y el Instituto de Materiales de la Universidad de Alicante (UA). Esta publicación recoge los descubrimientos realizados sobre el comportamiento de electrones en este nuevo material sintético.

«La fraccionalización de la carga del electrón en sistemas de estado sólido es un fenómeno fascinante. En lugar de comportarse como partículas indivisibles, los electrones pueden dividirse en fracciones más pequeñas de carga, desafiando nuestra comprensión convencional de la electricidad», asegura el investigador, quien continúa con la explicación: «Imagina los electrones en un material sólido como pequeñas partículas con carga eléctrica negativa. En condiciones normales, esperaríamos que estos electrones se comporten como entidades completas e indivisibles. Sin embargo, en algunos casos, cuando la interacción en-

tre los electrones es lo suficientemente relevante, los electrones pueden dividirse en fragmentos más pequeños, cada uno llevando una fracción de la carga electrónica total».

Tal y como señala Daniel Gosálbez, «las interacciones entre electrones en un material se vuelven especialmente relevantes cuando estos apenas poseen velocidad. Esto ocurre cuando las energías de los electrones apenas varían con su momento cristalino, es decir, que son bandas planas. Cuando estas bandas coexisten cerca del nivel de Fermi, que es la energía de referencia para los electrones en un material, se generan condiciones propicias para la fraccionalización de la carga».

El descubrimiento de estas nuevas propiedades podría abrir una ruta a futuras aplicaciones en dispositivos electrónicos. «Estamos cimentando las bases del uso de este material», asegura el investigador.



Daniel Gosálbez, investigador distinguido María Zambrano.



UNA INNOVADORA METASUPERFICIE FAVORECE LA MINIATURIZACIÓN DE LOS CIRCUITOS DE LOS DISPOSITIVOS FOTÓNICOS

Los investigadores Luis M Máñez-Espina y Ana Díaz.

Un equipo del Centro de Tecnología Nanofotónica (NTC) de la Universitat Politècnica de València (UPV) ha diseñado una nueva metasuperficie capaz de actuar como un aislador óptico y manipular con gran precisión la luz que incide sobre ellas, mediante la amplificación de las propiedades de los materiales magnéticos. Entre sus ventajas, haría posible el desarrollo de aisladores ópticos muy pequeños en comparación con los actuales, contribuyendo así a la miniaturización de los circuitos de los dispositivos fotónicos. El trabajo ha sido publicado en la revista *Advanced Optical Materials*.

Las metasuperficies son estructuras periódicas bidimensionales formadas por átomos artificiales que simulan el comportamiento de los átomos que forman la materia, pero diseñados para actuar de un modo deter-

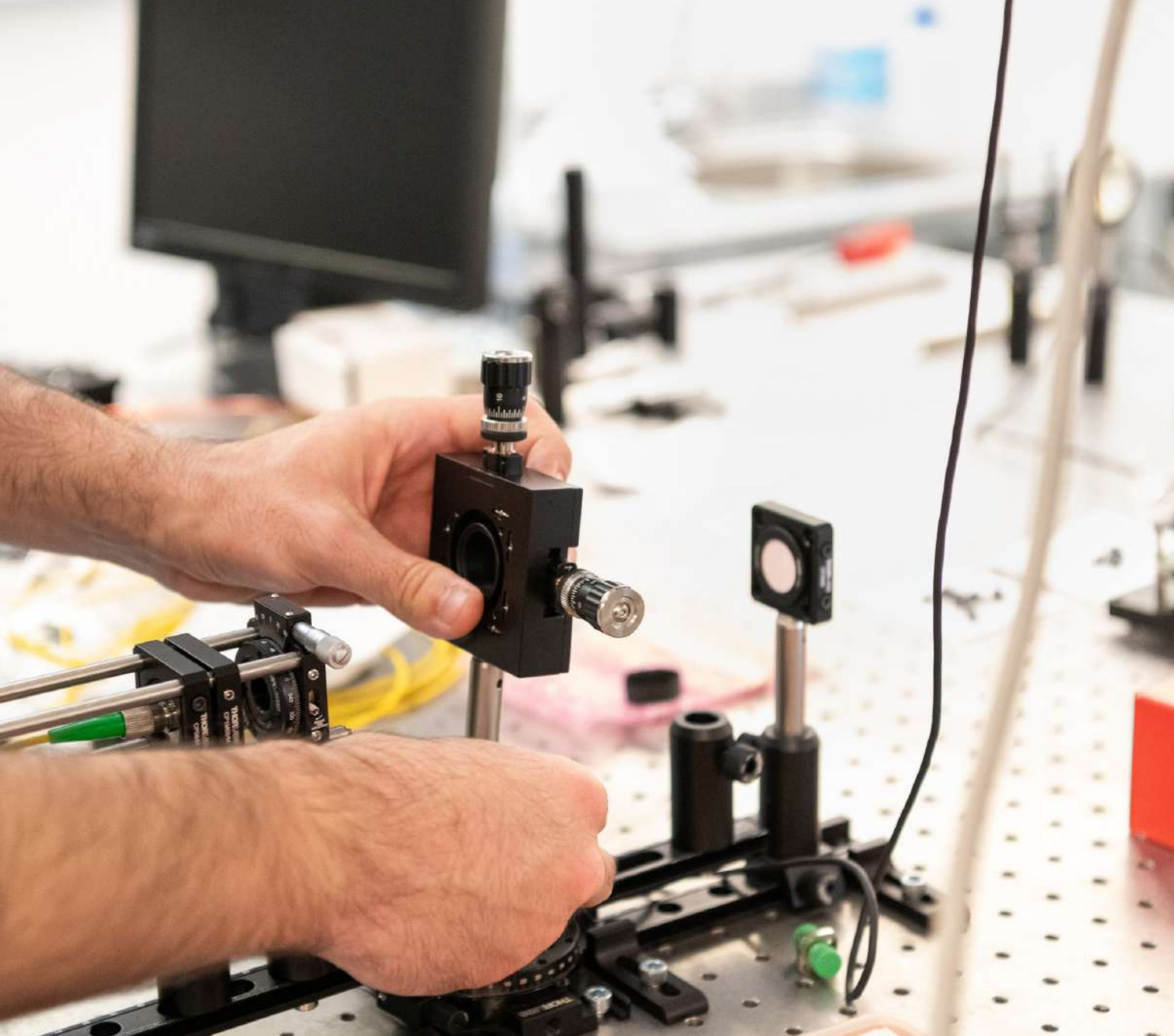
minado que depende de la aplicación que se busque. Se pueden entender como átomos artificiales.

«Aunque las metasuperficies ya han demostrado un gran potencial en muchas aplicaciones, la realización de ciertas transformaciones sigue siendo un misterio. Nuestro trabajo persigue dar un paso más para desvelarlo», afirma Ana Díaz, investigadora del NTC-UPV.

Junto al equipo del NTC-UPV, han participado también investigadores de la Aalto University (Espoo, Finlandia) y la University of Gothenburg (Gotemburgo, Suecia).

Explotando los modos oscuros

En su estudio, han conseguido explotar un fenómeno



físico basado en lo que se conoce como «modos oscuros». Estos modos que pueden presentar algunas estructuras periódicas se caracterizan, en óptica, por su capacidad casi infinita para confinar la luz dentro de una estructura.

«Hemos utilizado estos modos para aumentar la interacción entre la luz que incide a la metasuperficie y el material magnético con el que ha sido diseñada. Una de las características más importantes de este diseño es que tiene una propiedad necesaria en muchos componentes ópticos, conocida como no reciprocidad. Esto se traduce en algo muy simple: cuando se ilumina con luz el dispositivo por un lado no ocurre lo mismo que cuando se ilumina por el lado contrario», explica Luis Manuel Máñez-Espina, investigador en el CNT-UPV.

«Nuestro diseño abre un nuevo camino para maximizar la interacción de la luz con los materiales magnéticos en el régimen óptico (luz visible) en muy poco espacio», añade el científico.

Además, la metasuperficie diseñada por el equipo de investigadores español, sueco y finlandés consigue amplificar otros efectos magneto ópticos resultado de la interacción de la luz con materiales magnéticos. Entre ellos, el efecto Faraday, caracterizado por la rotación del campo eléctrico de la luz de diferente manera según la dirección en la que se propague.

NANOESTRUCTURAS IMPRESAS 3D

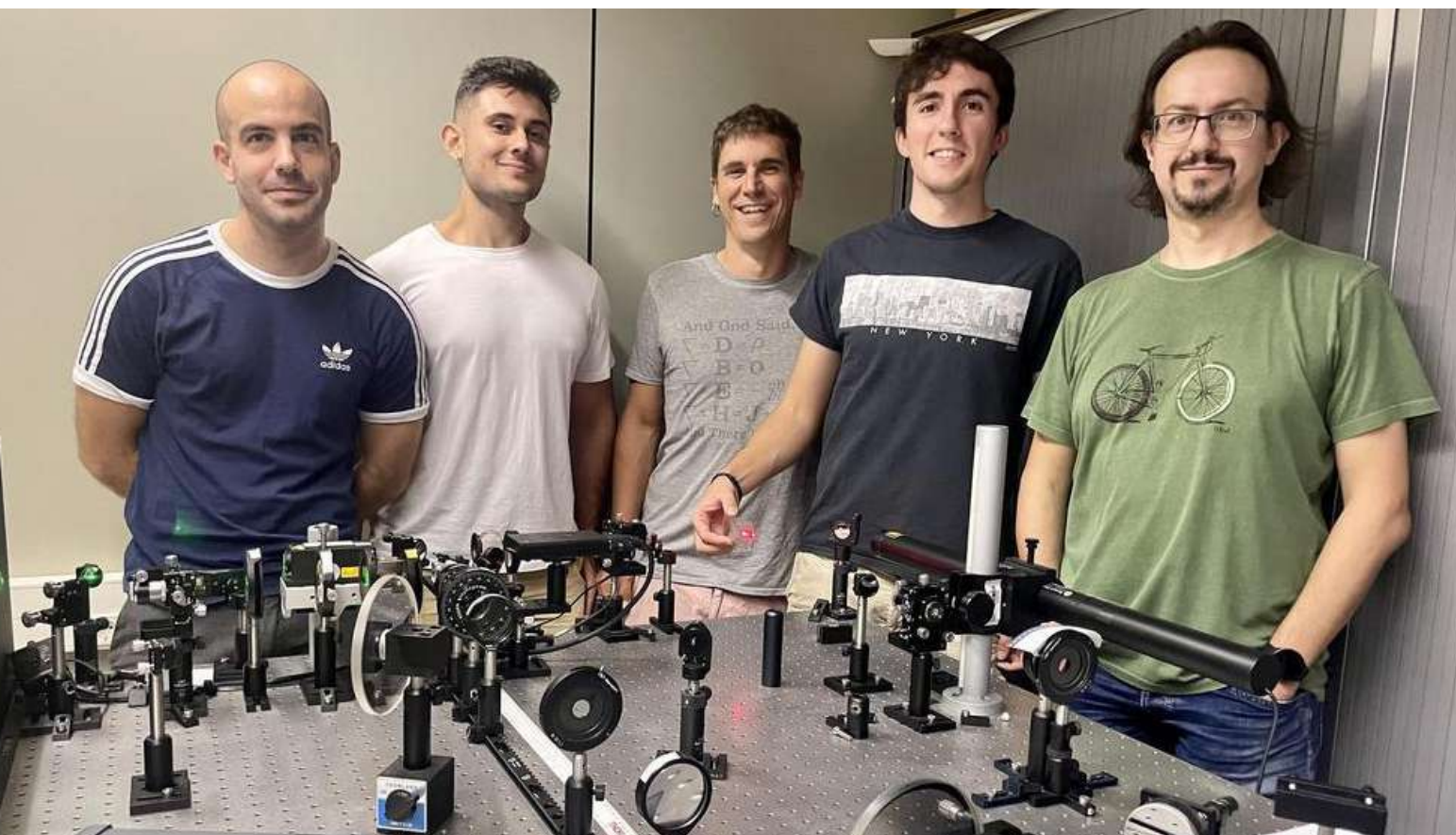
generan haces de luz que mejoran las fibras ópticas

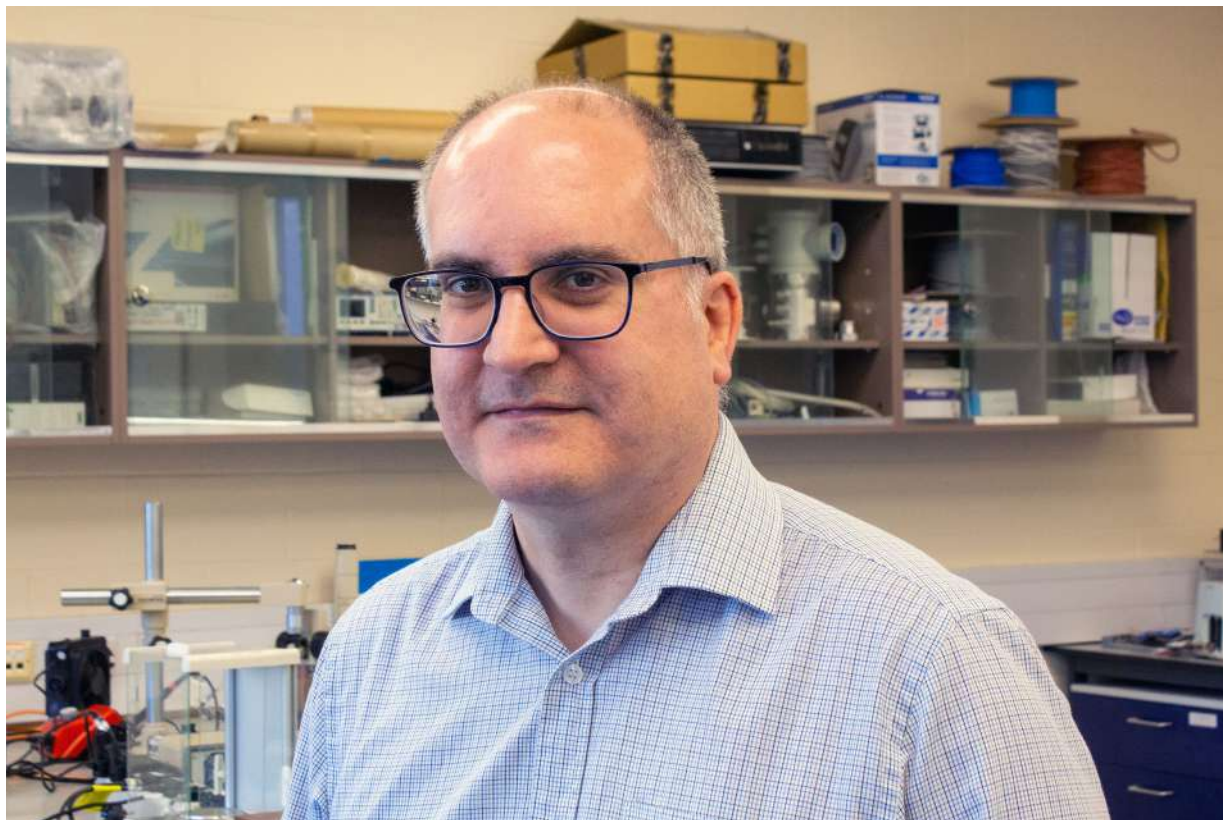
La Universidad de Alicante (UA), mediante el trabajo de investigación de Andrés Márquez, catedrático de Física Aplicada y miembro del Grupo de Holografía y Procesado Óptico (GHPO) de la UA, ha colaborado en el grupo de investigación que ha publicado un estudio en la revista *Nature Communications* con el que demuestran cómo la impresión 3D de nanoestructuras sobre la punta de una fibra óptica permite generar haces de luz estructurada con el control independiente de la polarización y la fase del haz de luz en cada punto del frente de onda.

«Nuestro trabajo proporciona un paradigma para el avance de la ciencia y la tecnología de la fibra óptica hacia la conformación de la luz integrada en la fibra, que puede encontrar importantes aplicaciones en las comunicaciones por fibra, láseres y sensores de fibra, imágenes endoscópicas, litografía de fibra y tecnología *lab-on-fiber*», indican los firmantes del estudio.

Las fibras ópticas están presentes de manera cotidiana en la sociedad actual como elementos fundamentales que han permitido, en las últimas décadas, la explosión en la capacidad de transmisión de información asociada al auge de internet y de las comunicaciones móviles. Muchas de las líneas de suministro de internet en domicilios, por ejemplo, pasan por estas fibras cuyo diámetro del núcleo es diez veces menor que un cabello. Con ello, la capacidad de transmisión de información ha aumentado a un ritmo exponencial gracias a los avances en tecnologías como las fuentes láser o los receptores usados en los enlaces y también en toda la electrónica de procesado digital y los nuevos métodos de codificación de la señal para aumentar la eficiencia del canal físico de transporte, que es la fibra.

Según explica el investigador de la UA, Andrés Márquez. «uno de los avances fundamentales comenzó en la década de los 90, con la introducción del multiplexado en longitud de onda, lo que permite usar el mismo canal de fibra para transportar de manera simultánea varias decenas e incluso centenares de señales ópticas con longitudes de onda muy próximas entre sí, pero que a pesar de ello se propagan de manera independiente».





NANOMATERIALES

luminiscentes de upconversión más eficientes

Un equipo internacional de investigación, con participación del Instituto de Ciencia de los Materiales (ICMUV) de la Universitat de València (UV), ha conseguido nanopartículas de lantánidos mucho más eficientes para la conversión óptica ascendente, superando la capacidad lumínica de los materiales convencionales. El trabajo, publicado en la revista *Nature Photonics*, demuestra que un control preciso del tamaño del dominio –es decir, de la capa intermedia de la nanopartícula de lantánidos– aumenta la eficiencia del nanomaterial hasta superar la de sus homólogas a escala micrométrica.

«Todo se debe a un efecto de tamaño único en los materiales luminiscentes basados en lantánidos, debido a una transferencia de energía de largo alcance que conduce a un impresionante rendimiento cuántico de conversión ascendente, que convierte hasta un 26 % de los fotones», explica José Marqués-Hueso, investigador distinguido-sénior Beatriz Galindo, en el ICMUV, y cofirmante del artículo.

«Hemos utilizado algunos átomos como sensibi-

lizadores especializados en absorber la excitación y transferir la energía al átomo emisor para que produzca luz. Lo hemos hecho sintetizando nanopartículas en forma de cebolla de tres capas, con una precisión casi atómica», detalla Feng Li, investigador del Harbin Institute of Technology (China) y primer firmante del artículo.

«Las ventajas son innegables para la bioimagen, la optogenética, la nanotermometría, la nanoscopia de superresolución y tantas otras aplicaciones tecnológicas prácticas», comenta Langping Tu, de la Chinese Academy of Sciences (en Changchun, China) y coautor del trabajo.

«Este avance transforma la comprensión existente desde hace tiempo de la imagen física de la transferencia de energía entre iones de lantánidos, lo que producirá profundos efectos en el diseño de materiales de luminiscencia para sus futuras aplicaciones en nanofotónica y biofotónica», añade Guanying Chen, director del proyecto y catedrático del Harbin Institute of Technology de China.