

# Puntos de interés

Descripción breve y sencilla de iniciativas docentes en nuestros colegios e institutos que han de ser resaltadas, de investigaciones relevantes de autores españoles o de extranjeros en instituciones españolas, y de otros hechos interesantes sobre ciencia y enseñanza, políticas educativa y científica y sus actores<sup>1</sup>

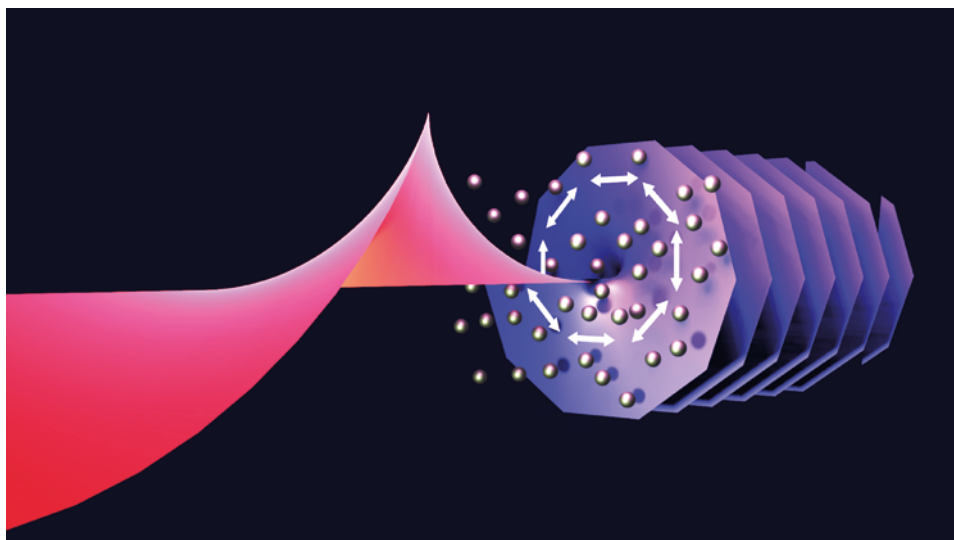
## ESTRUCTURAS COMPLEJAS DE LUZ ULTRAVIOLETA

**E**l control espacial de propiedades de la luz como la intensidad, la fase o la polarización brinda la oportunidad de diseñar nuevas formas de luz estructurada. Desde el punto de vista fundamental, el control de las propiedades de láseres ultracortos de alta frecuencia abre la vía para interaccionar

10.1364/OPTICA.442304) **demuestra la generación de haces de luz láser en el ultravioleta lejano, estructurados con singularidades de fase y polarización.** Este trabajo es fruto de una colaboración teórico-experimental entre Alba de las Heras, Julio San Román, Javier Serrano, Luis Plaja y Carlos Hernández-García, integrantes del Grupo de Aplicaciones del Láser y Fotónica de la Universidad de Salaman-



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



con la materia de una forma completamente nueva en la escala espacial de los nanómetros y en la escala temporal de los attosegundos (trillonésimas de segundo). De esta forma, el diseño de haces láser de alta frecuencia estructurados nos puede ayudar a descubrir comportamientos de la materia desconocidos hasta ahora. Desde el punto de vista aplicado, moldear la estructura de fase o de polarización de haces de luz láser permite optimizar aplicaciones en ámbitos diversos como la fotónica, el magnetismo, el procesamiento de materiales, las técnicas de imagen o las comunicaciones ópticas.

**Un artículo publicado recientemente en la revista *Optica* (DOI:**

ca (ALF USAL), y sus colaboradores en la Universidad Paris-Saclay (Francia) y la Escuela de Minas de Colorado (EE. UU.).

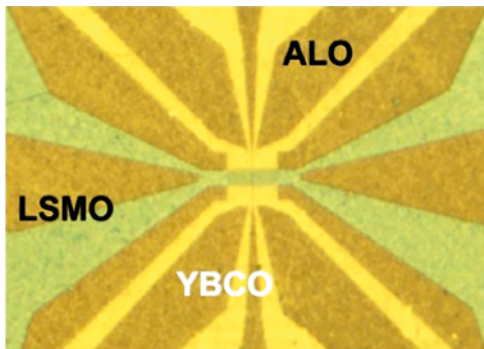
En el artículo se reporta **la primera propuesta teórico-experimental para generar vórtices vectoriales en el ultravioleta lejano.** Dichos haces de luz láser disponen de una estructura de fase helicoidal característica de los vórtices de luz o “remolinos de luz”, objeto de varios trabajos anteriores del grupo ALF USAL. Por otro lado, en este tipo de haces de luz láser la distribución de polarización se encuentra intrínsecamente ligada a su estructura de fase. Se trata, pues, de **un haz de luz que combina las propiedades de momento angular orbital de la luz asociadas a los vórtices ópticos con las del momento angular de espín de las partículas de luz, que define la polarización.**

La generación de vórtices vectoriales no es novedosa, ya que diversos grupos han generado satisfactoriamente estos haces de luz en el rango infrarrojo o visible del espectro electromagnético. La novedad de este trabajo consiste en generarlos en el régimen de altas frecuencias, y emitirlos en formas de pulsos de luz muy breves. Es muy difícil moldear los haces de luz de alta frecuencia (en el rango del ultravioleta lejano, rayos X y rayos gamma), ya que los dispositivos ópticos habituales (lentes, espejos, moduladores de fase, etc.) son muy ineficientes en ese rango espectral. Para solventar este problema, los autores se basan en un proceso de conversión no lineal (la generación de armónicos de orden alto) para transferir las propiedades de vórtices ópticos vectoriales de baja frecuencia (en el infrarrojo) hacia frecuencias superiores, en el ultravioleta lejano. **“La idea fundamental es controlar las propiedades de la luz ultravioleta actuando sobre la luz infrarroja inicial, gracias a que toda la información está codificada en las leyes físicas de conservación”,** según explica la investigadora predoctoral de ALF USAL Alba de las Heras. Con este enfoque, se dispone de toda la tecnología necesaria para generar haces láser de alta frecuencia compactados en *flashes* de attosegundo con una estructura espacial única, sin requerir de grandes infraestructuras. Esta investigación se enmarca dentro del proyecto europeo ERC ATTOSTRUCTURA, liderado por Carlos Hernández-García.

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

## EFFECTO JOSEPHSON DE LARGA ESCALA A TRAVÉS DE UN FERROMAGNÉTICO MEDIO-METÁLICO

**U**na investigación internacional liderada por la UCM ha conseguido **desarrollar dispositivos cuánticos combinando materiales ferromagnéticos entre dos superconductores a temperaturas relativamente altas**. Estos dispositivos combinan la funcionalidad de memoria de los ferromagnéticos con la coherencia cuántica de los dispositivos cuánticos, abriendo así **nuevas posibilidades para la realización práctica de una espintrónica**



**superconductora así como aplicaciones en computación cuántica.**

El trabajo, publicado en *Nature Materials* (Nat. Mater 21, 188, (2022); DOI: 10.1038/s41563-021-01162-5), ha conseguido fabricar uniones Josephson combinando óxidos superconductores de alta temperatura  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  (YBCO) y óxidos ferromagnéticos  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  (LSMO), demostrando así por primera vez la existencia del efecto Josephson ferromagnético a temperaturas elevadas (30-40 K) y para espesores muy grandes del separador ferromagnético (1 micra).

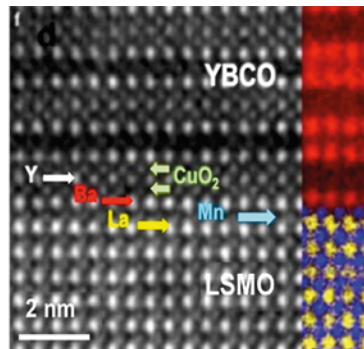
Las uniones Josephson son dispositivos basados en el acoplamiento de dos superconductores a través de un separador o barrera (que puede ser aislante, metal normal o ferromagnética), lo que da lugar a **un estado cuántico macroscópico con coherencia de fase y a una corriente eléctrica superconductora, es decir, que fluye sin disipación de energía**.

En uniones con barrera ferromagnética estudios teóricos habían predicho un efecto Josephson de larga escala, no encontrado experimentalmente hasta

la fecha, gobernado por el transporte de pares superconductores del mismo espín (tripletes).

Las uniones Josephson planares fabricadas en este estudio muestran evidencia de efecto Josephson obtenida de sus dos señas de identidad, oscilaciones de la corriente crítica bajo un campo magnético gobernadas por la cuantización del flujo (patrón de Fraunhofer), y efectos de sincronización bajo iluminación con microondas (escalones de Shapiro).

**Desde el punto de vista de la investigación en materiales, un avance fundamental ha sido la calidad atómicamente perfecta de la interfase entre el YBCO y el LSMO**, afirma el Prof. Ja-



cobo Santamaría, coautor del trabajo, lo que ha permitido la realización del efecto Josephson de larga distancia y permitirá la fabricación de dispositivos más complejos.

Los nuevos dispositivos se basan en la **generación de supercorrientes que fluyen sin disipación de energía que pueden leer, almacenar y manipular la información del estado de espín de manera coherente**, abriendo la puerta a una estrategia de computación de gran eficiencia energética capaz de unir las funcionalidades de computación y memoria en el mismo dispositivo.

Además de la UCM y la ICTS Centro Nacional de Microscopía Electrónica, en el trabajo han participado la Unidad Mixta de Física CNRS/Thales (Francia), el Laboratoire de Physique et Etudes des Matériaux (CNRS y ESPCI, París), el Laboratoire Ondes et Matière d'Aquitaine (CNRS y Universidad de Burdeos) y el sincrotrón Bessy (Berlín, Alemania). Las investigaciones se llevaron a cabo en el marco de los proyectos To2Dox del Flag ERA ERA-NET (EU Horizon 2020) PCI2020-112093 y AEI PID2020-118078RB-I00.

## DESTAPAN LA COHERENCIA INTERNA DE LA TEORÍA CUÁNTICA

**L**a teoría cuántica es más coherente de lo que se creía hasta ahora, concluye un estudio reciente publicado en *Nature Communications* (DOI:10.1038/s41467-021-27134-6). En él se demuestra que la teoría cuántica cumple el teorema del acuerdo, una garantía de coherencia entre el conocimiento de un grupo de agentes racionales que es central en economía. Por primera vez, se ha descubierto que también se cumple si los agentes razonan sobre el conocimiento de los sistemas cuánticos que comparten. El estudio ha sido realizado por un **equipo interdisciplinar** formado por Patricia Contreras Tejada (ICMAT-CSIC), Giannicola Scarpa (UPM), Aleksander M. Kubicki (UCM), Adam Brandenburger (Universidad de Nueva York) y Pierfrancesco La Mura (HHL Leipzig Graduate School of Management).

El famoso teorema del acuerdo se debe a **Robert Aumann, Premio Nobel de Economía en 2005**. El teorema manifiesta la importancia de la “certeza común”. Algo es certeza común para dos agentes cuando es cierto para ambos, además es cierto para ambos que es cierto para ambos, es cierto para ambos que es cierto para ambos que es cierto para ambos, y así sucesivamente.

En el teorema, dos agentes racionales parten de las mismas creencias, después, cada agente adquiere información privada y, en base a ella, asigna una probabilidad a un evento. El teorema expone que, **si las probabilidades son certeza común, entonces son iguales**.

“Es un resultado central en la economía y la teoría de la decisión, ya que permite resolver los desacuerdos,” asegura el Dr. Scarpa. Aunque dos agentes comiencen asignando probabilidades diferentes a un evento, pueden compartirlas para que sean certeza común y, así, ponerse de acuerdo. En la vida real, a veces las circunstancias impiden que se cumpla este teorema, pero **este resultado dota de coherencia interna a cualquier sistema racional**.

Sin embargo, al considerar sistemas cuánticos la situación podría ser otra: incluso partiendo de la misma información y teniendo certeza co-

mún, quizá pudiera mantenerse el desacuerdo. En un futuro no muy lejano, trabajar con sistemas cuánticos compartidos quizá sea habitual. Si la



¿Cómo razonan las personas sobre objetos cuánticos? (Domino público).

teoría cuántica no cumpliera el teorema del acuerdo, ¿cómo podríamos llegar a un consenso?

“Afortunadamente, el nuevo trabajo demuestra matemáticamente que el teorema sí se cumple”, confirma la Dra. Contreras Tejada. Con la misma información y teniendo certeza común, sigue siendo posible llegar a un acuerdo, incluso razonando sobre objetos cuánticos.

Con todo, en el futuro, podría desarrollarse una nueva teoría que superara a la cuántica en su capacidad de explicar el mundo. Si esta teoría no cumpliera el teorema del acuerdo, tendría un problema de coherencia. Por eso, el equipo investigador propone que una teoría así debería descartarse. “Aventuramos que el teorema del acuerdo debería ser un principio físico”, explica el Dr. Scarpa. “Con él nos aseguraríamos de que cualquier teoría que diésemos por válida para describir el mundo tuviera coherencia interna”.

## MODELO COMPUTACIONAL SIMPLE PARA EL ESTUDIO DE LA CONDUCTANCIA EN UNIONES MOLECULARES

Con el desarrollo de técnicas experimentales y teóricas avanzadas, la **electrónica molecular**, es decir, la disciplina científica en la que los conductores eléctricos están exclusivamente formados por moléculas orgánicas (no por metales), ha dejado de ser una curiosidad científica

para adentrarse en el mundo de las aplicaciones mediante la integración de dichas moléculas en nanodispositivos funcionales. Esto último es posible

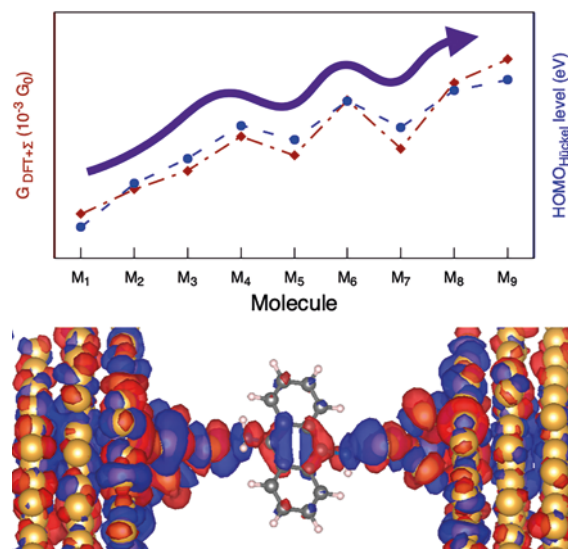
conectando una sola de estas moléculas a electrodos externos, formando lo que se denomina una **unión molecular**. El uso de moléculas como bloques activos en componentes electrónicos no solo puede ayudar a sobrepasar los límites establecidos por la ley de Moore en la progresiva miniaturización de dispositivos electrónicos, sino que también ofrece nuevas funcionalidades y ventajas con respecto a la electrónica convencional. Aun así, la funcionalidad final en este tipo de dispositivos no está definida únicamente por la naturaleza intrínseca de la molécula, sino también por la de los electrodos. Y lo más importante, por los fenómenos interfaciales entre molécula y electrodo.

Las medidas experimentales de conductancia en uniones moleculares poseen naturaleza estocástica, requiriendo un gran número de registros ante la dificultad de controlar la geometría de la unión molécula-electrodo durante las medidas. Ello da lugar a una cierta dispersión en las mediciones y requiere con frecuencia el apoyo de simulaciones teóricas para entender qué ocurre a escala nanométrica. Los **métodos teóricos** más utilizados para investigar este tipo de problemas son los basados en funciones de Green y la teoría del funcional de la densidad, GW y DFT por sus siglas en inglés. Sin embargo, estas teorías requieren un alto nivel de conocimiento tanto matemático como físico, siendo computacionalmente muy costosas o incluso inaccesibles con los superordenadores actuales.

Por tanto, el avance en este campo se vería impulsado por la existencia de metodologías teóricas sencillas, rápidas, y de baja demanda computacional, que además permitieran el estudio de un gran número de moléculas de forma

conjunta. Además, idealmente, estos modelos deberían estar al alcance de un número amplio de investigadores, no solo especialistas en simulaciones computacionales, y deberían ser de fácil utilización, incluso en ordenadores personales.

Recientemente, un equipo de investigadores de la UAM y de IMDEA Nanociencia formado por Joel G. Fallaque, Sandra Rodríguez González, Cristina Díaz y Fernando Martín, a través de un trabajo publicado en la revista *Nanoscale* (DOI:10.1039/D1NR06687K), ha demostrado cómo **un modelo computacional sencillo es capaz de predecir de manera cualitativa la variación relativa de la conductancia en un elevado número de uniones moleculares constituidas por derivados de acenos y electrodos de oro**. El modelo se basa en la teoría de orbitales moleculares de Hückel extendida. Para comprobar su efectividad e idoneidad se aplicó sobre

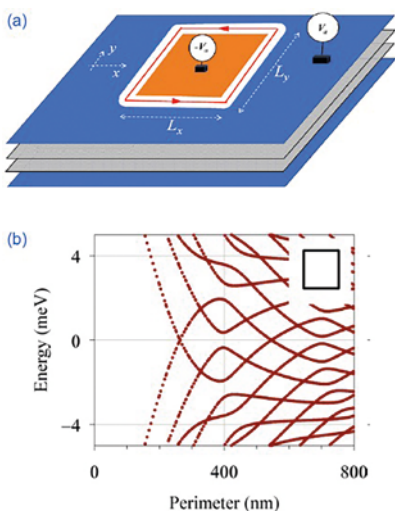


un total de 31 moléculas y los resultados se compararon con los de costosos cálculos DFT-Σ y experimentos llevados a cabo mediante la técnica de ruptura de unión usando un microscopio de efecto túnel (BJ-STM).

Como señala el Prof. Martín, las simulaciones teóricas DFT-Σ, utilizadas para validar los resultados del modelo, se realizaron en el superordenador Marenostrum4 de la Red Española de Supercomputación, requiriendo alrededor de 320 núcleos de procesador durante 30 horas. En comparación, las simulaciones con el modelo propuesto sólo necesitaron 1 núcleo y menos de 1 minuto.

## CONFINAMIENTO DE ESTADOS TOPOLÓGICOS EN BICAPAS DE GRAFENO

**D**os láminas de grafeno permiten acceder a una física que es prácticamente imposible de estudiar con una sola lámina. Por ejemplo, aplicando una diferencia de voltaje  $V_a$  entre las dos láminas se puede generar un gap en el espectro de energías del sistema. **Esta banda prohibida equipara las bicapas de grafeno a un semiconductor (el grafeno monocapa sería más bien un semimetal) y abre las puertas a usar este material en aplicaciones de microelectrónica.**



Ahora bien, cuando el voltaje aplicado es inhomogéneo de manera que cambia de signo en el plano de las láminas, tal y como se muestra en la Figura (a), aparecen, sorprendentemente, unos estados dentro del gap. La frontera entre regiones de distinto signo de  $V_a$  es capaz de anclar estos estados electrónicos, **cuya característica fundamental es topológica**: su dirección de propagación está determinada por el valle (propiedad análoga al espín en sistemas de grafeno). En la Figura (a) se indica con una línea roja el sentido de giro para un valle. El bloqueo del sentido de propagación con el valle confiere robustez frente a imperfecciones de la frontera que no alteren el valle. Desde el punto de vista tecnológico, sería interesante confinar dichos estados, pues **podrían crearse qubits topológicos para dispositivos de computación cuántica que fueran robustos frente a procesos de decoherencia.**

En un trabajo publicado en la revista *New Journal of Physics* (DOI: 10.1088/1367-2630/ac434d), un equipo del Instituto de Física Interdisciplinar y

Sistemas Complejos IFISC (UIB-CSIC) formado por Nassima Bachtaber, David Sánchez y Llorenç Serra ha llevado a cabo el estudio de las **propiedades que tendrían estos estados topológicos confinados**. El resultado más llamativo es que la simetría del potencial de confinamiento resulta crucial para entender el patrón de energías de los estados del gap. En la Figura (b) se muestra el espectro de energías para una frontera en forma de cuadrado, en función de su perímetro. Además, en presencia de un campo magnético externo, se forman espontáneamente corrientes persistentes polarizadas en los puntos de valle, lo cual podría ser relevante para posibles aplicaciones en valletrónica.

## FOTONES INDISTINGUIBLES PARA LA COMUNICACIÓN CUÁNTICA

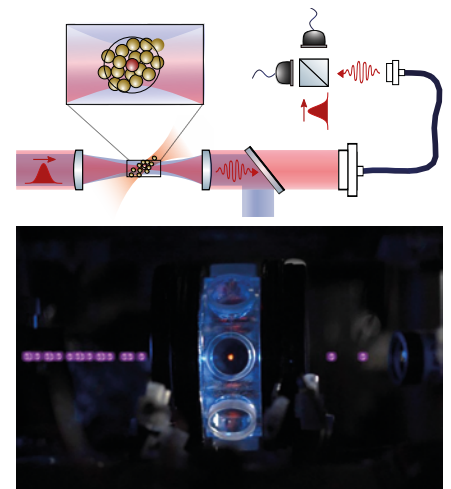
**U**n paso importante para construir redes de comunicación cuántica es ser capaz de generar fotones individuales e indistinguibles de forma determinista. **Los átomos de Rydberg, que son átomos excitados a niveles con un número cuántico principal muy alto, ofrecen cualidades muy interesantes que pueden explotarse para generar fotones individuales de forma cuasi determinista.** Esto se debe a que dos átomos de Rydberg experimentan una fuerte interacción dipolo-dipolo que hace que la energía necesaria para excitar los dos átomos dependa de la distancia entre ellos. De esta forma, cuando ambos átomos están cerca el uno del otro, solo uno de ellos puede ser excitado a un nivel de Rydberg, bloqueando la excitación del segundo átomo. La distancia máxima a la que este bloqueo ocurre se llama *radio de bloqueo*.

En una nube atómica, el comportamiento es muy parecido. Cuando un átomo se excita a un nivel de Rydberg, todos los átomos vecinos que se encuentren más cerca que el *radio de bloqueo* no pueden ser excitados. Si la nube atómica es más pequeña que el *radio de bloqueo*, solo se puede crear una excitación de Rydberg colectiva en toda la nube, compartida entre todos los átomos. De esta forma, la nube en su conjunto se comporta como un átomo individual de dos niveles, pero con un acoplamiento con la

luz mucho mayor que el de un solo átomo, y puede utilizarse para generar fotones individuales de manera eficiente.

Hasta ahora, cómo de indistinguibles eran estos fotones solo se había medido experimentalmente usando un método de excitación Raman o fuera de resonancia. En una investigación llevada a cabo por Auxiliadora Padrón-Brito, Jan Lowinski, Pau Farrera, Klara Theophilo y Hugues de Riedmatten, en el Instituto de Ciencias Fotónicas, y publicada en la revista *Physical Review Research* (DOI: 10.1103/PhysRevResearch.3.033287) **los autores compararon dos métodos de excitación diferentes, ambos ampliamente utilizados en el campo**: la excitación Raman y la excitación mediante transparencia inducida electromagnéticamente. Para ello, utilizaron átomos de  $^{87}\text{Rb}$  acoplados al nivel  $|90S_{1/2}\rangle$  y un *radio de bloqueo* del orden de  $\sim 15\ \mu\text{m}$ . La indistinguibilidad se midió haciendo interferir los fotones generados con estados coherentes débiles de luz en un divisor de haz. Según el efecto de Hong-Ou-Mandel, si dos fotones son completamente indistinguibles, salen del divisor de haz por la misma salida. Los autores demostraron que **los fotones emitidos eran individuales e indistinguibles en toda su función de onda. Sin embargo, los dos métodos arrojaron resultados algo diferentes y algunas de las posibles causas de esta discrepancia fueron analizadas.**

**Estos resultados son importantes para usar átomos de Rydberg como nodos cuánticos en redes cuánticas.** Por



ejemplo, algunas arquitecturas de repetidores cuánticos con átomos de Rydberg requieren fotones individuales e indistinguibles para poder generar entrelazamiento de forma satisfactoria entre dos nodos remotos.

## ENCONTRADO UN SEGUNDO ASTEROIDE TROYANO TERRESTRE TRAS UNA DÉCADA DE BÚSQUEDA

**T**odos los objetos celestes que vagan por el sistema solar están sometidos a la atracción gravitatoria de otros cuerpos, **incluyendo el Sol y los planetas**. Para cada pareja de cuerpos, como el sistema Tierra-Sol, existen cinco puntos donde se puede situar un tercer objeto en condiciones de equilibrio. **Estas regiones se denominan puntos de Lagrange** del problema restringido de tres cuerpos. En particular, dos de estos puntos,  $L_4$  y  $L_5$ , son puntos de equilibrio estable. Un asteroide que orbite alrededor de los puntos  $L_4$  o  $L_5$  del sistema Tierra-Sol se conoce con el nombre de asteroide troyano terrestre.

En un artículo publicado en la revista *Nature Communications* (DOI: 10.1038/s41467-022-27988-4) por un equipo internacional dirigido por Toni Santana-Ros, de la Universidad de Alicante (UA) y el Institut de Ciències del Cosmos de la Universitat de Barcelona (ICCUB), y en el que participan Adriano Campo Bagatín, Paula G. Benavidez y Po-Yen Liu de la UA, Álvaro Álvarez Candal, del Instituto de Astrofísica de Andalucía, junto con investigadores de Italia, EE. UU., Chile, Brasil, Polonia, Alemania y Canadá, **ha confirmado, tras una década de búsqueda, la existencia del segundo asteroide troyano terrestre conocido hasta ahora, el 2020 XL<sub>5</sub>**. Todo indica que este asteroide permanecerá troyano —es decir, estará situado en

el punto  $L_4$  de Lagrange— durante 4.000 años, motivo por el cual **se le califica como transitorio**. El objeto tiene alrededor de 1 km de diámetro, por lo que es más grande que el asteroide troyano terrestre conocido hasta ahora, el 2010 TK<sub>7</sub>, cuyo diámetro es de 0,3 km.

Aunque ya hace décadas que se sabe que hay asteroides troyanos en otros planetas como Venus, Marte, Júpiter, Urano y Neptuno, no fue hasta el año 2011 cuando se encontró el primero y,



Ilustración del asteroide troyano 2020 XL<sub>5</sub> (Imagen: CTIO/NOIRLab/NSF/AURA/J. da Silva/ <https://spaceengine.org/>)

hasta ahora, único asteroide troyano terrestre. Los astrónomos han descrito muchas estrategias de observación para poder detectar nuevos troyanos de esta clase. “Ha habido muchos intentos previos de encontrar troyanos terrestres, incluyendo los estudios *in situ*, como la búsqueda dentro de la región  $L_4$  que llevó a cabo la nave espacial OSIRIS-REx de la NASA, o en la región  $L_5$ , llevada a cabo por la misión Hayabusa-2 de la JAXA”, explica el Dr. Santana-Ros, y añade que “todos los esfuerzos dedicados hasta ahora no habían descubierto ningún otro miembro de esta población”.

La razón de esta baja tasa de éxito en los descubrimientos se debe en gran

parte a su peculiar posición alrededor de los puntos  $L_4$  o  $L_5$  del sistema Tierra-Sol. Vistos desde la Tierra, estos objetos suelen ser observables cerca del Sol. La ventana de tiempo de observación entre la salida del asteroide por el horizonte y el amanecer es, por tanto, muy pequeña. Por esta razón, **los astrónomos han de apuntar los telescopios muy cerca del horizonte, donde las condiciones de visibilidad son peores**, y con el hándicap adicional de que la inminente luz

solar satura la luz de fondo de las imágenes al poco tiempo de la observación. Para solventar este problema, el equipo realizó una búsqueda con telescopios de 4 m, que fueran capaces de observar en estas condiciones, y finalmente obtuvieron los datos con el telescopio Lowell Discovery, de 4,3 m (Arizona, EE. UU.), y SOAR, de 4,1 metros, operado por el NOIRLab de la Fundación Nacional de Ciencias (NSF), en Cerro Pachón (Chile).

**El descubrimiento de asteroides troyanos terrestres es muy significativo porque pueden contener un registro de las primeras condiciones de la formación del Sistema Solar**, ya que los troyanos primitivos podrían haber estado coorbitando los planetas durante su formación y añaden restricciones a la evolución dinámica del sistema solar. Además, los troyanos terrestres son candidatos ideales para posibles misiones espaciales en el futuro, su hallazgo **mejorará el conocimiento de la dinámica de estos objetos desconocidos y permitirá entender mejor los motivos de que sean transitorios**. (Fuente: #UADivulgaFecyt).

# FÍSICA Y CIENCIA PARA TODOS

Real Sociedad Española de Física

FUNDACIÓN RAMÓN ARECES