

[¡Hola, mundo! ¡Hola ronna \(R\), quetta \(Q\), ronto \(r\) y quecto \(q\)!](#)

## 1. ¡Hola, mundo! ¡Hola ronna (R), quetta (Q), ronto (r) y quecto (q)!

[Editar](#)



**Figura 1.** La vasta cantidad de datos creada anualmente ha conducido a la necesidad de nuevas palabras para describir grandes (y pequeños) números. Créditos: Getty.

¡Los tiempos cambian! Y también para la Ciencia...Este 2022 se realizó la 27ª reunión de la Conferencia General de Pesos y Medidas. Para la década de 2030, el mundo generará alrededor de un yottabyte de datos por año, eso es  $10^{24}$  bytes, o la cantidad que cabría en los DVD apilados hasta Marte. Ahora, el auge del crecimiento de la esfera de datos ha llevado a los gobernantes del sistema métrico a acordar nuevos prefijos más allá de esa magnitud, para describir lo escandalosamente grande y pequeño.

Representantes de gobiernos de todo el mundo, reunidos en la Conferencia General de Pesos y Medidas (CGPM) en las afueras de París el 18 de noviembre, votaron para introducir cuatro nuevos prefijos en el Sistema Internacional de Unidades (SI) con efecto inmediato. Los prefijos ronna (R) y quetta (Q) representan respectivamente  $10^{27}$  y  $10^{30}$ , y ronto (r) y quecto (q) significan  $10^{-27}$  y  $10^{-30}$ . La Tierra pesa alrededor de 6 ronnagramos y la masa de un electrón es de aproximadamente un quectogramo.

Esta es la primera actualización del sistema de prefijos desde 1991, cuando la organización agregó zetta ( $10^{24}$ ), zepto ( $10^{-21}$ ), yotta ( $10^{24}$ ) y yocto ( $10^{-24}$ ). En ese caso, los metrologos se estaban adaptando para satisfacer las necesidades de los químicos, que querían una forma de expresar las unidades SI en la escala del número de Avogadro: las  $6 \cdot 10^{23}$  unidades en un mol,

una medida de la cantidad de sustancias. Los prefijos más familiares peta y exa se agregaron en 1975 (ver ``Cifras extremas’’).

### Extreme figures

Advances in scientific fields have led to increasing need for prefixes to describe very large and very small numbers.

Factor	Name	Symbol	Adopted
$10^{30}$	quetta	Q	2022
$10^{27}$	ronna	R	2022
$10^{24}$	yotta	Y	1991
$10^{21}$	zetta	Z	1991
$10^{18}$	exa	E	1975
$10^{15}$	peta	P	1975
$10^{-15}$	femto	f	1964
$10^{-18}$	atto	a	1964
$10^{-21}$	zepto	z	1991
$10^{-24}$	yocto	y	1991
$10^{-27}$	ronto	r	2022
$10^{-30}$	quecto	q	2022

**Figura 2.** Los prefijos de uso internacional se acuerdan en la Conferencia General de Pesos y Medidas. Prefixes are agreed at the General Conference on Weights and Measures. Esta tabla presenta la última modificación, del 18 de Noviembre de 2022. ¡Es oficial! Habemus nuevos 4 nuevos prefijos (hasta un total de 24 en la actualidad) oficiales. Ronna y quetta, ronto y quecto.

Hoy, el motor es la ciencia de datos, dice Richard Brown, metrólogo del Laboratorio Nacional de Física del Reino Unido en Teddington. Ha estado trabajando en planes para introducir los últimos prefijos durante cinco años y presentó la propuesta a la CGPM el 17 de noviembre. Dado que el volumen anual de datos generados a nivel mundial ya había alcanzado los zettabytes, las sugerencias informales para  $10^{27}$ , incluidos 'hella' y 'bronto', comenzaban a afianzarse, dice. El convertidor de unidades de Google, por ejemplo, ya les dice a los usuarios que 1000 yottabytes es 1 hellabyte, y al menos un sitio web del gobierno del Reino Unido cita brontobyte como el término correcto.

“Desde el punto de vista de la metrología, esto me horrorizó, porque estos son términos completamente no oficiales”, dice Brown. En el pasado, se han adoptado términos no oficiales en el SI, dice. Pero el problema con hella y bronto es que sus símbolos (h y b) ya se usan en el sistema

métrico para otras unidades o prefijos: h, por ejemplo, significa hecto (el raramente usado  $10^2$ ) y  $H$  es el henry, el unidad de inductancia (y también representa hidrógeno en Química o hamiltoniano en Física). Esta es la razón principal por la que no pueden presentarse como términos formales, dice. “No es que quisiera ser un aguafiestas, aunque eso también entra en juego”, agrega, sonriendo.

### **Prefijos precedentes**

Inventar los nuevos prefijos no fue sencillo. Brown buscó palabras que comenzaran con las únicas letras que aún no se usaban como símbolos para unidades o prefijos, o que estaban excluidas de otra manera: r y R, y q y Q. Los nombres surgieron de apegarse a los precedentes introducidos para los prefijos agregados más recientemente. Por ejemplo, los que multiplican cifras, como giga, terminan en 'a', mientras que los prefijos que describen el extremo más pequeño de la escala, como atto, terminan en 'o'. Otra era que las palabras debían corresponder aproximadamente con los sonidos de los números griegos o latinos (ronna y quetta suenan un poco como las palabras griegas para nueve y diez, ennea y deka). Brown se vio obligado a deshacerse de una sugerencia anterior de "quecca" después de descubrir su proximidad a una palabrota portuguesa.

Los prefijos resultantes son "muy reflexivos" y el resultado de años de discusiones, dice Georgette Macdonald, directora general del Centro de Investigación de Metrología de Canadá en Halifax. Crucialmente, cumplen el deseo de consistencia de los metrologos y evitan la confusión, dice ella.

El SI actualmente solo necesita prefijos nuevos para números grandes, agrega, pero tiene sentido introducir los términos correspondientes para el extremo pequeño de la escala. “No estamos realmente seguros de estar midiendo algo a esa escala. Pero es mejor tener la balanza equilibrada y que los prefijos se relacionen entre sí de alguna manera que sea consistente”, dice.

Ronna y quetta pueden sonar extraños ahora, pero también lo sonaron giga y tera, dice Olivier Pellegrino, metrologo del Instituto Portugués de Calidad en Caparica, Portugal. Con la práctica, se sentirán normales, dice.

Brown dice que ahora no hay letras del alfabeto disponibles para representar nuevos prefijos, por lo que lo que sucederá una vez que algún área de la ciencia lleve las magnitudes al nivel de  $10^{33}$  sigue siendo una pregunta abierta. Los científicos siempre pueden denotar números en potencias de diez, pero la gente tiende a querer una palabra, dice Brown. Abogaría por prefijos compuestos que usen dos símbolos, como kiloquetta (kQ), en lugar de ramificarse en diferentes alfabetos. “Pero creo que probablemente estamos muy lejos de tener que preocuparnos por esto”, agrega.

Brown ha tenido que pasar por tantos obstáculos para que su propuesta sea aprobada en el CPGM que aún no se ha permitido imaginar los términos que realmente se usan, dice. “Será absolutamente fantástico”.

### **Referencias**

[1]How many yottabytes in a quettabyte? Extreme numbers get new names.Prolific generation of data drove the need for prefixes that denote  $10^{27}$  and  $10^{30}$ . Elizabeth Gibney, 18 November

2022, URL: <https://www.nature.com/articles/d41586-022-03747-9doi:https://doi.org/10.1038/d41586-022-03747-9>

[2] *Expansion to the SI prefix range. Introducing the new SI prefixes: ronna, quetta, ronto and quecto.* URL: <https://www.npl.co.uk/si-prefix>

[3] *General Conference on Weights and Measures (CGPM) page,* URL: <https://www.bipm.org/en/committees/cg/cgpm>

[4] *27th meeting of the General Conference on Weights and Measures (CGPM) page,* URL: <https://www.bipm.org/en/cgpm-2022>

Resolution pdf: <https://www.bipm.org/documents/20126/64811223/Resolutions-2022.pdf/281f3160-fc56-3e63-dbf7-77b76500990f>

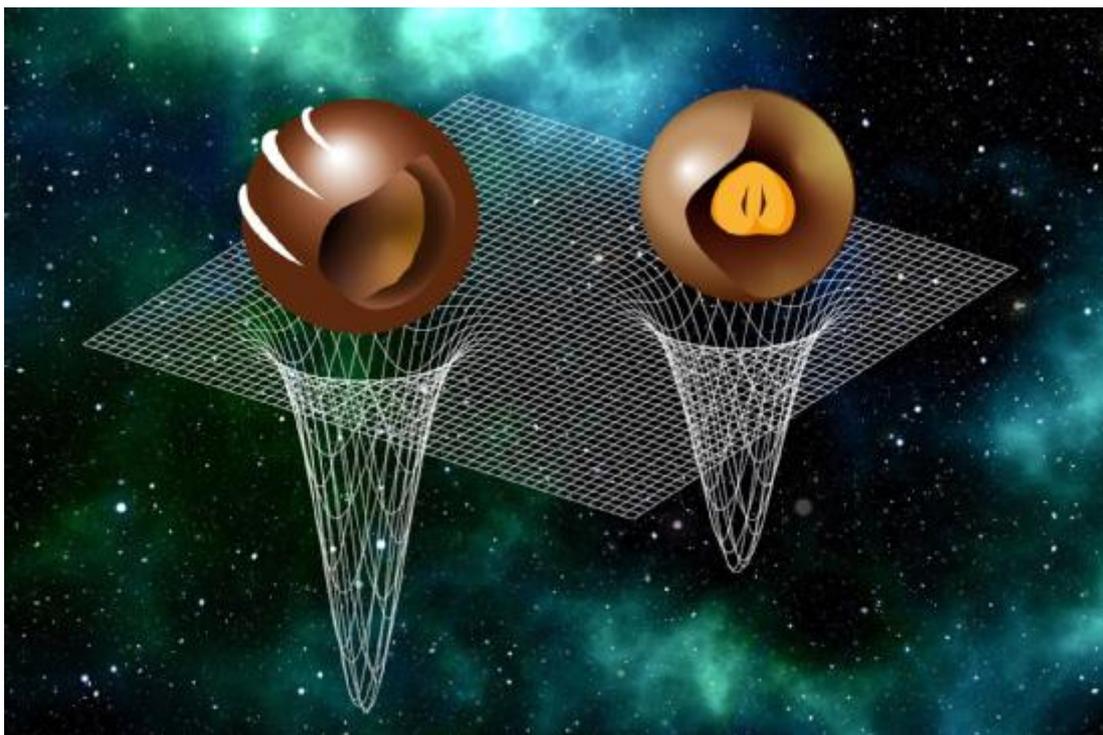
Artículo traducido y editado por J. F. G.

## 2. Pralines y estrellas de neutrones

[Editar](#)

**¿Bombones de chocolate cósmico? Revelada la estructura general de la estrella de neutrones**

**por la Universidad Goethe de Fráncfort del Meno.**



**Figura 1.** El estudio de la velocidad del sonido ha revelado que las estrellas de neutrones pesadas tienen un manto rígido y un núcleo blando, mientras que las estrellas de neutrones ligeras tienen

un manto blando y un núcleo rígido, al igual que los diferentes bombones de chocolate. Crédito: Peter Kiefer y Luciano Rezzolla.

Hasta el momento, se sabe poco sobre el interior de las estrellas de neutrones, esos objetos extremadamente compactos que pueden formarse después de la muerte de una estrella. La masa de nuestro sol o incluso más está comprimida en una esfera con el diámetro de una gran ciudad. Desde su descubrimiento hace más de 60 años, los científicos han estado tratando de descifrar su estructura.

El mayor desafío es simular las condiciones extremas dentro de las estrellas de neutrones, ya que difícilmente se pueden recrear en la Tierra en el laboratorio. Por lo tanto, hay muchos modelos en los que se describen varias propiedades, desde la densidad y la temperatura, con la ayuda de las llamadas ecuaciones de estado. Estas ecuaciones intentan describir la estructura de las estrellas de neutrones desde la superficie estelar hasta el núcleo interno.

Ahora, los físicos de la Universidad Goethe de Frankfurt han logrado agregar más piezas cruciales al rompecabezas. El grupo de trabajo, dirigido por el Prof. Luciano Rezzolla en el Instituto de Física Teórica, ha desarrollado más de un millón de ecuaciones de estado diferentes que satisfacen las restricciones establecidas por los datos obtenidos de la física nuclear teórica por un lado, y por las observaciones astronómicas por el otro. Su trabajo se publica en *The Astrophysical Journal Letters*.

Al evaluar las ecuaciones de estado, el grupo de trabajo hizo un descubrimiento sorprendente: las estrellas de neutrones "ligeras" (con masas inferiores a aproximadamente 1,7 masas solares) parecen tener un manto blando y un núcleo rígido, mientras que las estrellas de neutrones "pesadas" (con masas mayores de 1,7 masas solares) tienen en cambio un manto rígido y un núcleo blando.

"Este resultado es muy interesante porque nos da una medida directa de cuán comprimible puede ser el centro de las estrellas de neutrones", dice el profesor Luciano Rezzolla. avellana en su centro rodeada de chocolate suave, mientras que las estrellas pesadas se pueden considerar más como esos chocolates donde una capa dura contiene un relleno suave".

Crucial para esta idea fue la velocidad del sonido, un enfoque de estudio del estudiante de licenciatura Sinan Altiparmak. Esta medida de cantidad describe qué tan rápido se propagan las ondas de sonido dentro de un objeto y depende de qué tan rígida o blanda sea la materia. Aquí en la Tierra, la velocidad del sonido se utiliza para explorar el interior del planeta y descubrir depósitos de petróleo.

Al modelar las ecuaciones de estado, los físicos también pudieron descubrir otras propiedades de las estrellas de neutrones que no habían sido explicadas previamente. Por ejemplo, independientemente de su masa, muy probablemente tengan un radio de solo 12 km. Por lo tanto, son tan grandes en diámetro como la ciudad natal de la Universidad Goethe de Frankfurt.

El autor del estudio, el Dr. Christian Ecker, explica: "Nuestro extenso estudio numérico no solo nos permite hacer predicciones sobre los radios y las masas máximas de las estrellas de neutrones, sino también establecer nuevos límites en su deformabilidad en sistemas binarios, es decir, qué

tan fuerte se distorsionan. entre sí a través de sus campos gravitatorios. Estos conocimientos serán particularmente importantes para identificar la ecuación de estado desconocida con futuras observaciones astronómicas y detecciones de ondas gravitacionales de estrellas fusionadas".

## Referencias

[1] *Cosmic chocolate pralines? General neutron star structure revealed*, by Goethe University Frankfurt am Main <https://phys.org/news/2022-11-cosmic-chocolate-pralines-general-neutron.html>

[2] *On the Sound Speed in Neutron Stars*, Sinan Altiparmak, Christian Ecker, and Luciano Rezzolla. Published 2022, November 10 Published by the American Astronomical Society. The Astrophysical Journal Letters, Volume 939, Number 2. Sinan Altiparmak et al 2022 ApJL 939 L34 The Astrophysical Journal Letters (2022). DOI: [10.3847/2041-8213/ac9b2a](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac9b2a)

Artículo traducido y editado por J. F. G.

## 3. Agujeros de gusano ¿ocultos a simple vista?

### [Editar](#)

Las predicciones indican que los agujeros de gusano y los agujeros negros pueden tener espectros de luz polarizada casi idénticos, lo que dificulta la distinción de estos objetos astrofísicos.



**Figura 1.** Imagen artística de un agujero de gusano o "wormhole". Créditos: Quardia Inc./stock.adobe.com.

En películas y programas de televisión, los agujeros de gusano suelen representarse como túneles que mueven a los viajeros entre dos puntos en el tiempo y el espacio. Si bien se teorizó durante mucho tiempo (se predijeron por primera vez en 1916), estos objetos místicos nunca han sido observados por los científicos. Ahora, los investigadores predicen que los agujeros de gusano podrían estar escondidos a plena vista [1]. Al simular las emisiones de luz polarizada para agujeros

de gusano y agujeros negros, Petya Nedkova y sus colegas de la Universidad de Sofía, Bulgaria, predicen que puede haber solo ligeras diferencias en los espectros de la luz polarizada que emana de un agujero de gusano atravesable y de un agujero negro. Nedkova y sus colegas estudiaron un hipotético agujero de gusano estático y transitable, uno que no evoluciona ni gira. Simularon la luz emitida directamente por el disco que rodea este agujero de gusano, analizando su polarización. Luego, los investigadores crearon una imagen de esta luz polarizada. También crearon imágenes indirectas del agujero de gusano usando luz polarizada reflejada por el objeto. Al comparar la imagen directa del agujero de gusano con una que muestra la luz polarizada emitida por el disco que rodea un agujero negro estático, el equipo descubrió que sus imágenes eran casi idénticas, con una diferencia de intensidad y dirección de polarización de menos del 4%. Sin embargo, las imágenes indirectas eran distinguibles: los patrones de polarización eran similares, pero los radios observables de los objetos eran considerablemente diferentes. Las intensidades de polarización de los agujeros de gusano también fueron un orden de magnitud mayor en las imágenes indirectas que las de los agujeros negros. Nedkova dice que el equipo ahora planea buscar otras señales que puedan ayudar a distinguir los agujeros negros y los agujeros de gusano, pero que no requieren las observaciones precisas necesarias para detectar los efectos de polarización. Algunas de las mediciones requerirían un nivel de precisión que los telescopios actuales no pueden lograr. “Buscaremos algo que nos diga la diferencia más fácilmente”, dice Nedkova.

–Allison Gasparini Allison Gasparini es una escritora científica independiente con sede en Santa Cruz, CA.

## Referencias

[1] V. Deliyiski et al., "Imagen polarizada de emisión ecuatorial en tiempos espaciales sin horizonte: agujeros de gusano transitables", *Phys. Rev. D* 106, 104024 (2022). V. Deliyiski et al., "Polarized image of equatorial emission in horizonless spacetimes: Traversable wormholes", *Phys. Rev. D* 106, 104024 (2022). Disponible en ArXiv: <https://arxiv.org/pdf/2206.09455.pdf>

[2] *Wormholes Could Be Hiding in Plain Sight*, November 10, 2022. *Physics* 15, s154. Allison Gasparini para APS, disponible en la URL: <https://physics.aps.org/articles/v15/s154>

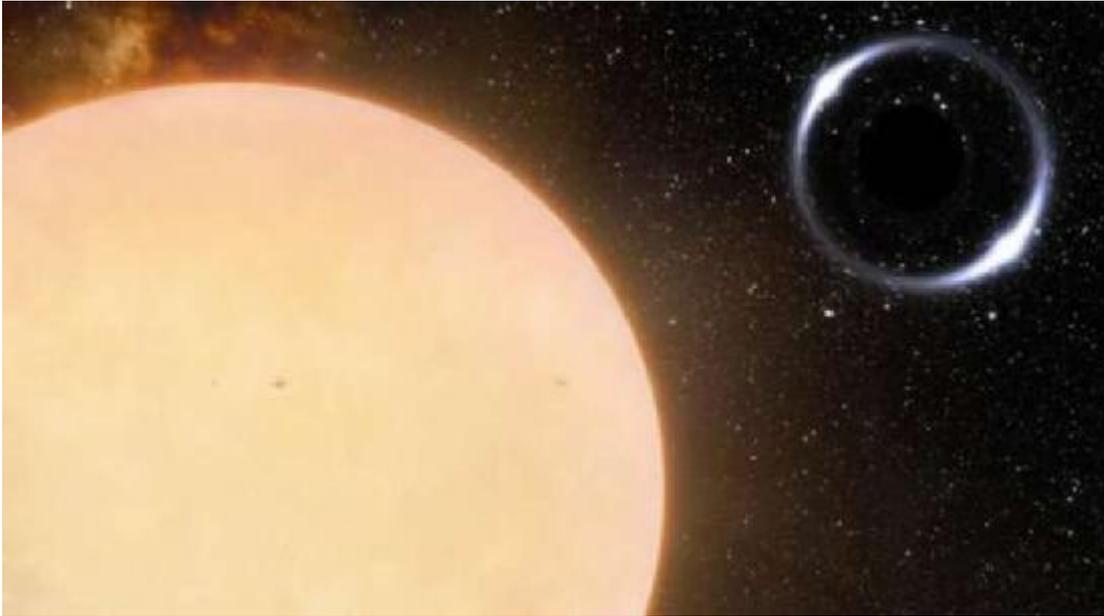
Artículo traducido y editado por J. F. G.

## 4.El agujero negro más cercano confirmado (hasta ahora)

[Editar](#)

### Astrónomos descubren el agujero negro más cercano a la Tierra

por el Laboratorio Nacional de Investigación de Astronomía Óptica-Infrarroja 4 de noviembre de 2022.



**Figura 1.** Los astrónomos que utilizan el Observatorio Internacional Gemini, operado por NOIRLab de la NSF, han descubierto el agujero negro conocido más cercano a la Tierra. Esta es la primera detección inequívoca de un agujero negro de masa estelar inactivo en la Vía Láctea. Su proximidad a la Tierra, a solo 1600 años luz de distancia, ofrece un objetivo de estudio intrigante para avanzar en nuestra comprensión de la evolución de los sistemas binarios. Crédito: Observatorio Internacional Gemini/NOIRLab/NSF/AURA/J. da Silva/Spaceengine/M. Zamani.

Los agujeros negros son los objetos más extremos del universo. Es probable que las versiones supermasivas de estos objetos inimaginablemente densos residan en los centros de todas las galaxias grandes. Los agujeros negros de masa estelar, que pesan aproximadamente de cinco a 100 veces la masa del sol, son mucho más comunes, con un estimado de 100 millones solo en la Vía Láctea. Sin embargo, hasta la fecha solo se han confirmado unos pocos, y casi todos están "activos", lo que significa que brillan intensamente en rayos X a medida que consumen material de un compañero estelar cercano, a diferencia de los agujeros negros inactivos que no lo hacen. Los astrónomos que utilizan el telescopio Gemini North en Hawai'i, uno de los telescopios gemelos del Observatorio Internacional Gemini, operado por NOIRLab de NSF, han descubierto el agujero negro más cercano a la Tierra, que los investigadores han denominado Gaia BH1. Este agujero negro inactivo pesa unas 10 veces la masa del sol y se encuentra a unos 1.600 años luz de distancia en la constelación de Ofiuco, lo que lo hace tres veces más cerca de la Tierra que el poseedor del récord anterior, un binario de rayos X en la constelación de Monoceros.

El nuevo descubrimiento fue posible gracias a las exquisitas observaciones del movimiento del compañero del agujero negro, una estrella similar al sol que orbita el agujero negro aproximadamente a la misma distancia que la Tierra orbita alrededor del sol. "Toma el sistema solar, pon un agujero negro donde está el sol y el sol donde está la Tierra, y obtienes este sistema", explicó Kareem El-Badry, astrofísico del Centro de Astrofísica | Harvard & Smithsonian y el Instituto Max Planck de Astronomía, y el autor principal del artículo que describe este descubrimiento. "Si bien ha habido muchas detecciones de sistemas como este, casi todos estos descubrimientos han sido refutados posteriormente. Esta es la primera detección inequívoca de una estrella similar al Sol en una órbita amplia alrededor de un agujero negro de masa estelar en

nuestra galaxia". Aunque es probable que haya millones de agujeros negros de masa estelar vagando por la Vía Láctea, los pocos que se han detectado fueron descubiertos por sus interacciones energéticas con una estrella compañera. A medida que el material de una estrella cercana entra en espiral hacia el agujero negro, se sobrecalienta y genera potentes rayos X y chorros de material. Si un agujero negro no se está alimentando activamente (es decir, está inactivo), simplemente se mezcla con su entorno.

"He estado buscando agujeros negros inactivos durante los últimos cuatro años utilizando una amplia gama de conjuntos de datos y métodos", dijo El-Badry. "Mis intentos anteriores, así como los de otros, arrojaron una colección de sistemas binarios que se hacen pasar por agujeros negros, pero esta es la primera vez que la búsqueda ha dado sus frutos".

El equipo identificó originalmente que el sistema albergaba potencialmente un agujero negro mediante el análisis de datos de la nave espacial Gaia de la Agencia Espacial Europea. Gaia capturó las diminutas irregularidades en el movimiento de la estrella causadas por la gravedad de un objeto masivo invisible. Para explorar el sistema con más detalle, El-Badry y su equipo recurrieron al instrumento Gemini Multi-Object Spectrograph en Gemini North, que midió la velocidad de la estrella compañera mientras orbitaba el agujero negro y proporcionó una medición precisa de su período orbital.

Las observaciones de seguimiento de Gemini fueron cruciales para restringir el movimiento orbital y, por lo tanto, las masas de los dos componentes en el sistema binario, lo que permitió al equipo identificar el cuerpo central como un agujero negro aproximadamente 10 veces más masivo que nuestro sol.

"Nuestras observaciones de seguimiento de Gemini confirmaron más allá de toda duda razonable que el binario contiene una estrella normal y al menos un agujero negro inactivo", explicó El-Badry. "No pudimos encontrar ningún escenario astrofísico plausible que pueda explicar la órbita observada del sistema que no involucra al menos un agujero negro".

El equipo se basó no solo en las magníficas capacidades de observación de Gemini North, sino también en la capacidad de Gemini para proporcionar datos en un plazo ajustado, ya que el equipo tenía solo un período breve para realizar sus observaciones de seguimiento.

"Cuando tuvimos los primeros indicios de que el sistema contenía un agujero negro, solo teníamos una semana antes de que los dos objetos estuvieran en la separación más cercana en sus órbitas. Las mediciones en este punto son esenciales para hacer estimaciones de masa precisas en un sistema binario". dijo El-Badry. "La capacidad de Gemini para proporcionar observaciones de respuesta rápida fue fundamental para el éxito del proyecto. Si hubiéramos perdido esa ventana estrecha, habríamos tenido que esperar otro año".

Los modelos actuales de los astrónomos sobre la evolución de los sistemas binarios están en apuros para explicar cómo pudo haber surgido la peculiar configuración del sistema Gaia BH1. Específicamente, la estrella progenitora que luego se convirtió en el agujero negro recién detectado habría sido al menos 20 veces más masiva que nuestro sol.

Esto significa que habría vivido solo unos pocos millones de años. Si ambas estrellas se formaron al mismo tiempo, esta estrella masiva se habría convertido rápidamente en una supergigante, hinchando y engullendo a la otra estrella antes de que tuviera tiempo de convertirse en una estrella de secuencia principal que quema hidrógeno como nuestro sol.

No está del todo claro cómo la estrella de masa solar pudo haber sobrevivido a ese episodio, terminando como una estrella aparentemente normal, como indican las observaciones del binario del agujero negro. Todos los modelos teóricos que permiten la supervivencia predicen que la estrella de masa solar debería haber terminado en una órbita mucho más estrecha de lo que realmente se observa.

Esto podría indicar que existen lagunas importantes en nuestra comprensión de cómo se forman y evolucionan los agujeros negros en sistemas binarios, y también sugiere la existencia de una población aún no explorada de agujeros negros inactivos en sistemas binarios.

"Es interesante que este sistema no se adapte fácilmente a los modelos estándar de evolución binaria", concluyó El-Badry. "Plantea muchas preguntas sobre cómo se formó este sistema binario, así como cuántos de estos agujeros negros inactivos existen".

"Como parte de una red de observatorios espaciales y terrestres, Gemini North no solo ha proporcionado pruebas sólidas del agujero negro más cercano hasta la fecha, sino también del primer sistema de agujeros negros prístino, libre del gas caliente habitual que interactúa con el agujero negro". ", dijo Martin Still, oficial del programa Gemini de la NSF.

"Si bien esto augura potencialmente futuros descubrimientos de la población de agujeros negros inactivos predicha en nuestra galaxia, las observaciones también dejan un misterio por resolver: a pesar de una historia compartida con su vecino exótico, ¿por qué la estrella compañera en este sistema binario es tan normal?"

## Referencias

[1] Kareem El-Badry et al, *A sun-like star orbiting a black hole*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society(2022). DOI: [10.1093/mnras/stac3140](https://doi.org/10.1093/mnras/stac3140)

[2] *Astronomers discover closest black hole to Earth* , by National Optical-Infrared Astronomy Research Laboratory. URL: <https://phys.org/news/2022-11-astronomers-closest-black-hole-earth.html>

Artículo traducido y editado por J. F. G.

# 5.Los fondos cósmicos del Universo

[Editar](#)

Artículo presentado al Concurso CPAN 2022.

Autor: Juan F. González.

*Los fondos cósmicos del Universo*

URL1:

[https://www.academia.edu/91219431/Los\\_fondos\\_c%C3%B3smicos\\_del\\_Universo](https://www.academia.edu/91219431/Los_fondos_c%C3%B3smicos_del_Universo)

URL2:

[https://www.researchgate.net/publication/365610738\\_Los\\_fondos\\_cosmicos\\_del\\_Universo](https://www.researchgate.net/publication/365610738_Los_fondos_cosmicos_del_Universo)

## 6.¿Hemos detectado una estrella de quarks extraños?

[Editar](#)

Publicado el 26 de octubre de 2022 por Brian Koberlein

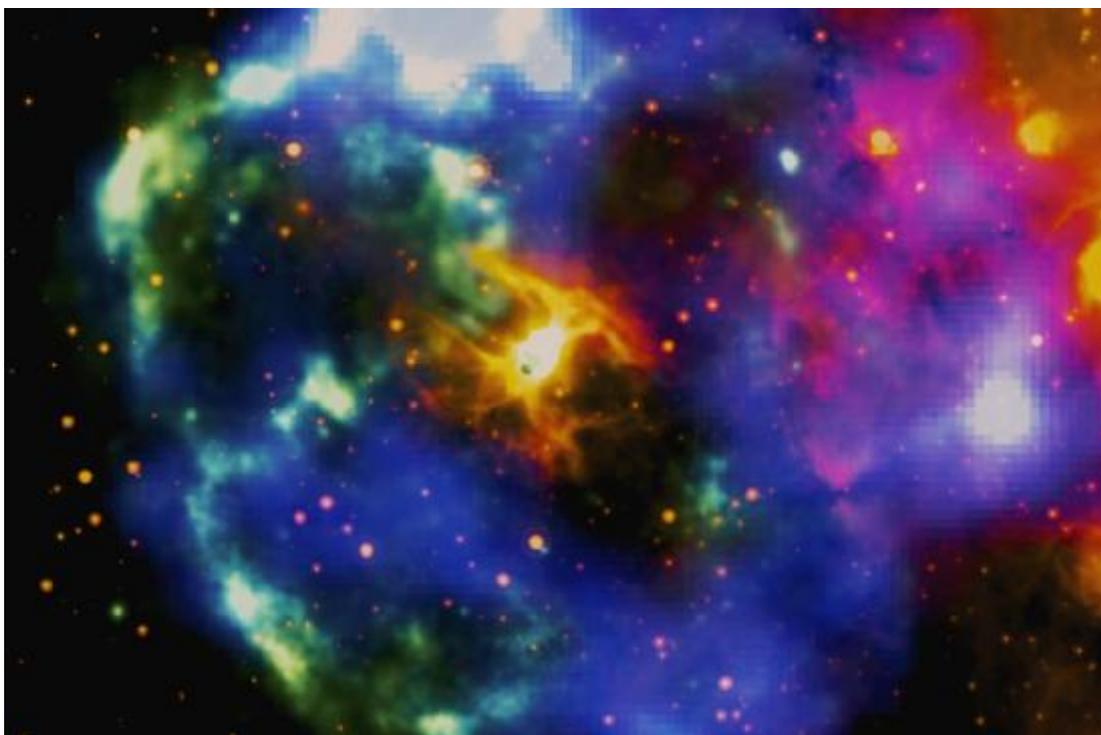


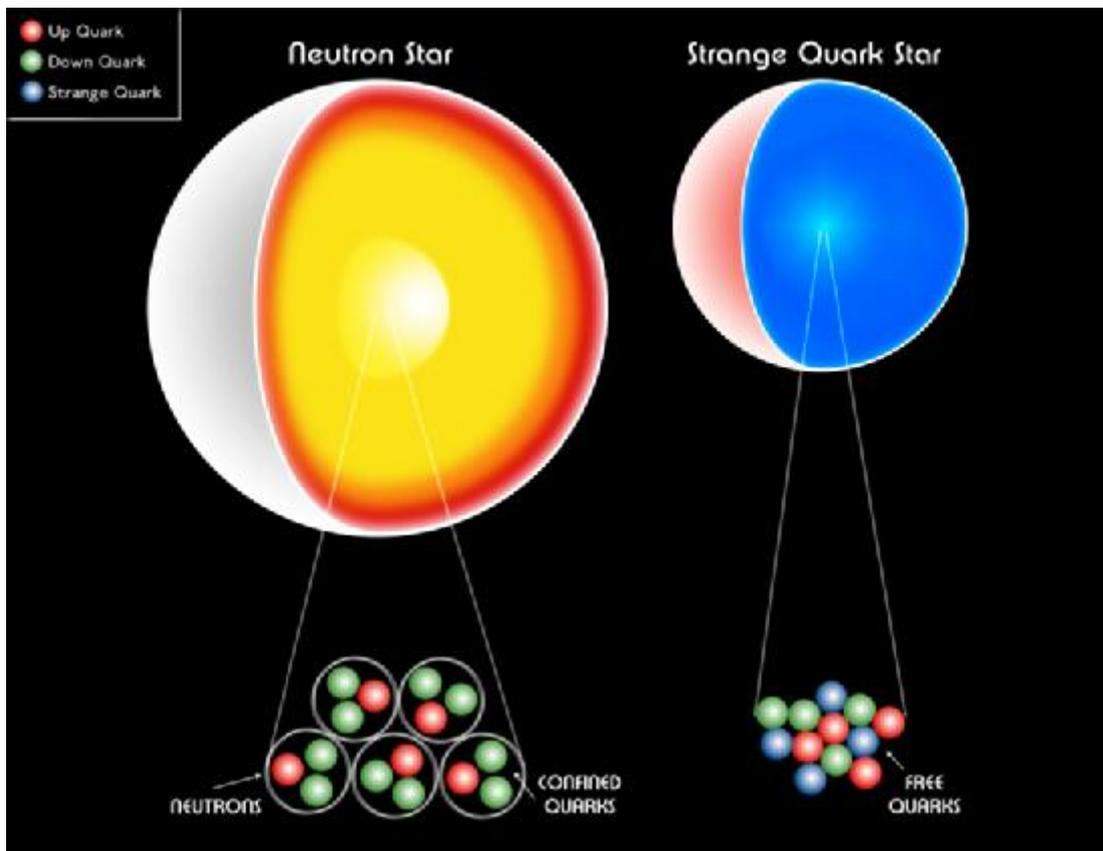
Imagen de portada: remanente de supernova HESS J1731-347 rodeando una pequeña estrella de neutrones misteriosa. Créditos: Victor Doroshenko. The supernova remnant HESS J1731-347 surrounding a small neutron star. Credit: Victor Doroshenko.

**La estrella de neutrones más pequeña y ligera jamás vista podría ser una "estrella extraña"**

La vida de cada estrella es una lucha contra la gravedad. Las estrellas son tan masivas que corren el riesgo de colapsar por su propio peso, pero esto se equilibra con el calor y la presión que genera

una estrella a través de la fusión nuclear. Eventualmente, eso llega a su fin. Las capas exteriores de una estrella se desecharán y el núcleo restante se convertirá en un remanente estelar. Qué tipo de remanente depende de la masa del núcleo. Si el núcleo tiene menos de 1,4 masas solares, colapsará hasta que la presión de los electrones equilibre su peso, convirtiéndose así en una enana blanca. Si el núcleo es más masivo que eso, quizás hasta 3 masas solares, colapsa hasta que resiste la presión de neutrones, creando una estrella de neutrones. Más allá de eso, el núcleo colapsará en un agujero negro de masa estelar. Al menos ese parece ser el caso. La enana blanca más masiva que hemos encontrado tiene alrededor de 1,35 masas solares, y el agujero negro más pequeño que hemos observado tiene alrededor de 2,6 masas solares. La estrella de neutrones más masiva confirmada tiene unas 2,14 masas solares. Por supuesto, los rangos de corte no son absolutos. Un núcleo estelar puede tener un poco menos de 1,4 masas solares, pero experimenta un colapso explosivo que lo empuja a convertirse en una estrella de neutrones. Las estrellas de neutrones de 1,2 o 1,3 masas solares serían inusuales, pero no imposibles. Pero las observaciones recientes de la estrella de neutrones HESS J1731-347 parecen darle una masa de 0,77 masas solares, lo que no debería ser posible.

Las estrellas de neutrones son notoriamente difíciles de masa. Tienen solo unos 20 kilómetros de diámetro y pueden verse por los rayos X que emiten. Para calcular la masa, generalmente necesita que la estrella de neutrones sea compañera de una estrella, de modo que pueda determinar la masa por dinámica orbital, o debe ser un púlsar para que pueda usar observaciones de radio para obtener una estimación de masa. HESS J1731-347 no es ninguno de estos, pero tiene una nebulosa remanente que lo rodea. Ese remanente está iluminado por una estrella regular cercana, de la que conocemos la distancia. La estrella regular fue mapeada por la nave espacial Gaia, por lo que conocemos muy bien su distancia. A partir de esos datos, el equipo observó la luz reflejada de la nebulosa para determinar la distancia de HESS J1731-347. Está a unos 8.000 años luz de distancia, más cerca de lo que pensábamos. Conociendo la distancia, el equipo miró las observaciones de rayos X de la estrella de neutrones. Dada su luminosidad, la masa calculada resulta ser de 0,6 a 0,9 masas solares, que está muy por debajo del límite de masa de la enana blanca. Si esta masa es precisa, nuestra comprensión de las estrellas de neutrones está equivocada. Una posibilidad es que no entendamos cómo se forman las estrellas de neutrones. Los autores plantean otra posibilidad, y es que podría tratarse de un tipo de estrella quark conocida como estrella extraña.



**Figura 1.** La diferencia entre una estrella de neutrones y una estrella de quarks. Crédito: CXC/M. Weiss.

La visión estándar de las estrellas de neutrones es que en su mayoría son neutrones. Algunos teóricos argumentan que dentro del núcleo, el límite de los neutrones podría romperse, creando una sopa de quarks arriba y abajo, por lo tanto, una estrella de quarks. Una estrella extraña sería aquella en la que los quarks que chocan en el núcleo crean quarks extraños, de modo que la estrella de neutrones tiene un núcleo de quarks arriba, abajo y extraños. Todo esto es hipotético, pero dado que los quarks extraños son veinte veces más masivos que los quarks arriba y abajo, una estrella extraña tendría una densidad mucho mayor que una estrella de neutrones normal. Por lo tanto, podría mantenerse unido incluso con una masa mucho más pequeña que la del Sol.

La tercera opción es, por supuesto, que el resultado de la masa sea incorrecto. Este es solo un resultado, y varios factores podrían hacer que la estrella de neutrones parezca más tenue de lo que realmente es, sesgando así el resultado de la masa. Es un resultado interesante, pero no concluyente. Incluso los autores reconocen que se necesitan más observaciones para confirmar el resultado. De hecho, es una posibilidad extraña, pero podría no ser una estrella extraña. LoL. Así funciona el método científico en ocasiones...Por prueba y error, elaborando y descartando o no hipótesis...

## Referencias

- [1] Doroshenko, Victor, et al. "Una estrella de neutrones extrañamente ligera dentro de un remanente de supernova". *Nature Astronomy* (2022): 1-8. (2022). URL: <https://www.nature.com/articles/s41550-022-01800-1>

[2] The Smallest, Lightest Neutron Star Ever Seen Could be a “Strange Star”, Universe Today news. Publicado el 26 de octubre de 2022 por Brian Koberlein. URL: <https://www.universetoday.com/158331/the-smallest-lightest-neutron-star-ever-seen-could-be-a-strange-star/>

Artículo traducido y editado por Juan F. González

## 7. Novedoso compuesto fotocatalizador interfacial de banda ancha

[Editar](#)

Extender la absorción de luz desde la región ultravioleta (UV) a la región del infrarrojo cercano (NIR, Near Infra-Red) y mejorar la eficiencia de separación de los fotoportadores de los fotocatalizadores es de vital importancia para la evolución del H<sub>2</sub> impulsada mediante la energía solar, y mejorar la eficiencia de los futuros motores de hidrógeno o también mejoraría el rendimiento de las células solares.

El grupo de investigación del Prof. Gouxu Wang de la Universidad Tecnológica de Sydney junto con el Prof. Dan Wang de la Academia China de Ciencias (Instituto de Ingeniería de Procesos) informaron sobre un nuevo fotocatalizador interfacial de banda ancha regulado compuesto formado por g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (DCN, Defective Carbon Nitride, nitrato de carbono grafitico) y NaYF<sub>4</sub> defectuosos (fluoruro de itrio y sodio, con adiciones de otros elementos o defectos): Yb<sup>3+</sup>, Tm<sup>3+</sup> (NYF, Nanocrystalline Yttrium Fluoride, fluoruro de itrio y sodio nanocristalino) en nanocristales, según informa National Science Open. El Dr. Xiaochun Gao (Universidad de Tecnología de Sydney, Universidad de Ludong) y el Prof. Nailiang Yang (Instituto de Ingeniería de Procesos, Academia de Ciencias de China) son los cautores de este estudio.

Los autores realizaron un control de los defectos preciso en el compuesto grafitico g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> introduciendo los dopantes S (azufre) y las vacantes C (carbono) en los prismas hexagonales 3-D DCN. Los nanocristales NYF se cargaron con éxito en la matriz DCN, formando el fotocatalizador de banda ancha que se denota simbólicamente como NYF@DCN.

### **Control interfacial preciso en DCN con estados de defectos optimizados.**

Encontraron que el uso de etilenglicol y azufre fundido es fundamental para regular los estados defectuosos en DCN a través de la creación de dopantes S y vacantes C. Los estados defectuosos no solo pueden extender la capacidad de absorción solar de DCN, sino también acomodar los electrones excitados de la banda de valencia y los electrones migrados de la banda conductora a

través de una capacidad moderada de captura de electrones, lo que mejora aún más la eficiencia de separación de carga en la interfaz entre DCN y la solución.

### **Cosecha solar extendida de NYF@DCN.**

En comparación con g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> no modificado (BCN, del inglés bulk g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) y DCN a granel, el NYF@DCN de banda ancha exhibió una mayor capacidad de captación de luz solar, que se debió principalmente a:

1) La formación de estados defectuosos en DCN que disminuye la energía de excitación y extiende el rango de absorción visible a 590 nm, dando una alta fotocorriente de 12,55  $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$  (microamperios por centímetro cuadrado) por debajo de 550 nm (nanómetros).

2) La excitación secundaria de DCN por la luz ultravioleta convertida ascendentemente de los cristales NYF reflejada por los espectros de fotoluminiscencia de conversión ascendente, que generó NYF@DCN con una fotocorriente de 8,01  $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ .

Se infiere que la absorción solar mejorada mencionada anteriormente impulsa la producción de H<sub>2</sub> producido por la energía solar.

### **Transferencia de carga interfacial acelerada de NYF@DCN.**

Los espectros de CP-MAS (cross-polarization and magic-angle spinning techniques, polarización de cruz y técnicas de ángulo mágico) y <sup>13</sup>C NMR (resonancia magnética nuclear), junto con los cálculos teóricos mostraron que, en comparación con BCN (nitruro de carbono sin impurezas), podría existir una polarización de carga interfacial más fuerte a través del enlace YN entre DCN y NYF, lo que es favorable para la transferencia de energía de NYF a DCN a través de la vía de transferencia (PT, photo transfer) y vía de transferencia de energía en estado excitado (ET, excited state Energy Transfer).

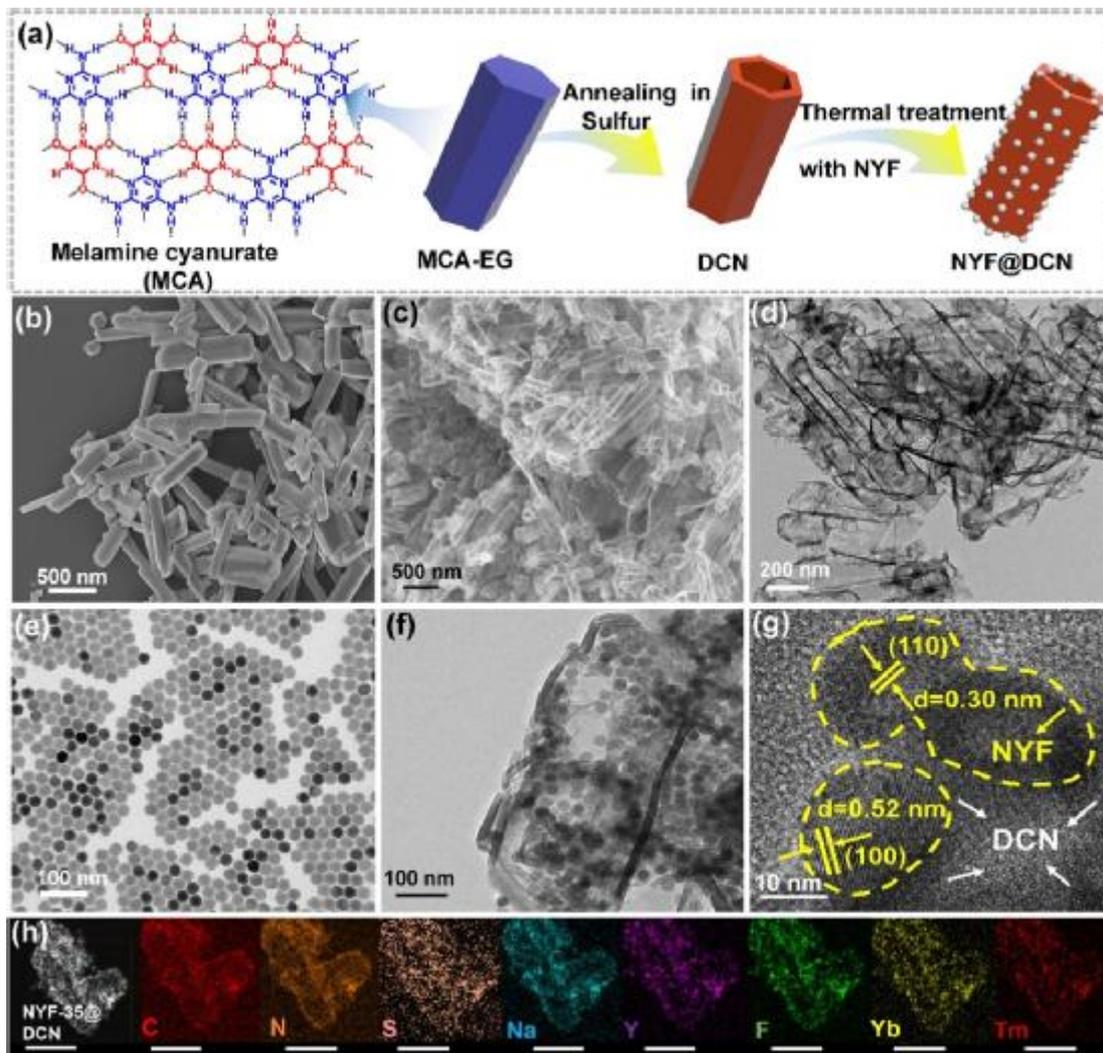


Figura 1. a) Ilustración esquemática para la fabricación de NYF@DCN. Imágenes SEM (Scanning Electron Microscope, microscopio electrónico de barrido) de b) precursor y c) DCN. Imágenes TEM (Transmission Electron Microscope, microscopio electrónico de transmisión) de d) DCN, e) NYF@DCN. h) Mapeo elemental de NYF@DCN (barra de escala: 500 nm). Crédito: Science China Press.

En resumen, la capacidad de captación solar mejorada y la transferencia de carga interfacial impulsan conjuntamente la banda ancha NYF@DCN con una tasa de evolución de  $H_2$  impulsada por la energía solar superior de  $2799 \mu\text{mol h}^{-1} \text{g}^{-1}$ , micromoles por hora y gramo, clasificándose en la parte superior entre los fotocatalizadores basados en  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  y fotocatalizadores basados en partículas.

## Referencias

- [1] “Un novedoso fotocatalizador interfacial de banda ancha regulada”. Phys.org. Publicado el 7 de diciembre de 2022 por Science China Press. URL: <https://phys.org/news/2022-12-interfacial-broadband-photocatalyst.html>

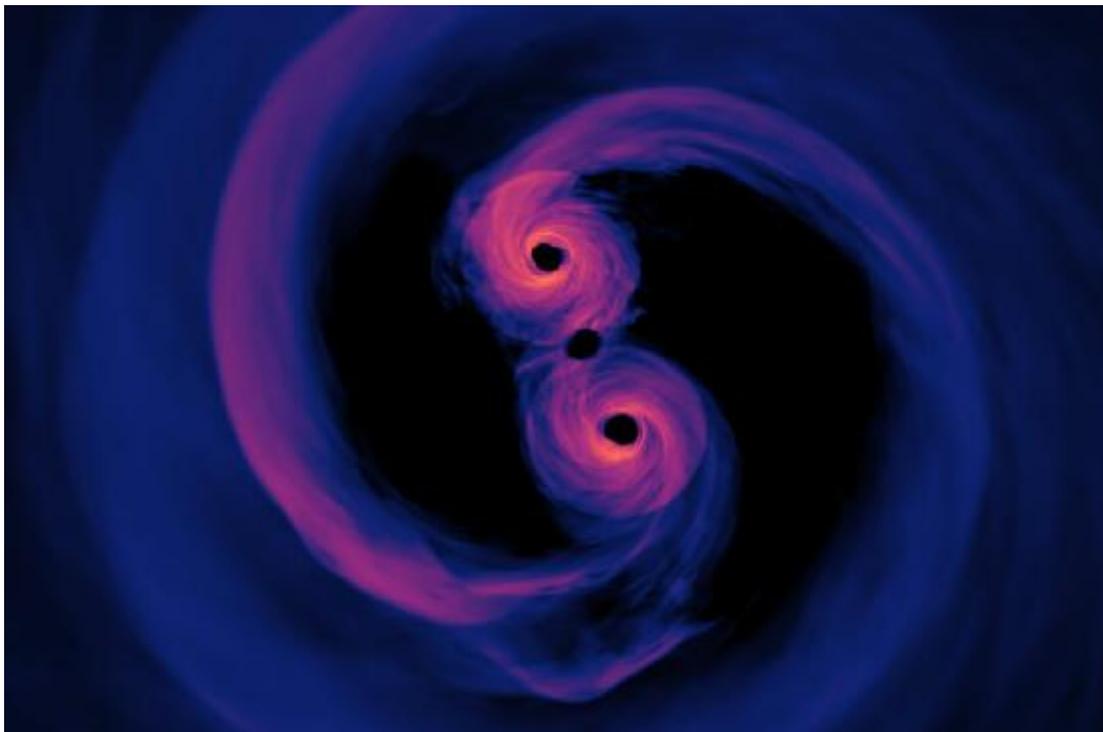
[2] *Defect and Interface Control on Graphitic Carbon Nitrides/Upconversion Nanocrystals for Enhanced Solar Hydrogen Production*. Autores: Xiaochun Gao, Nailiang Yang, Jin Feng, Jiayan Liao, Shaoqi Hou, Xiaoguang Ma, Dawei Su, Xingxing Yu, Javad Safaei, Dan Wang, Guoxiu Wang. Received: Jun 22, 2022. Accepted: Oct 10, 2022. Published: Oct 12, 2022. <https://doi.org/10.1360/nso/20220037>

Artículo original de **IZAN JUÁREZ GARCÍA-HERAS**, curso 4ºESO, grupo F.

Artículo editado, revisado y corregido por Juan F. González.

## 8. Los orígenes de los agujeros negros en sistemas binarios

[Editar](#)



**Figura 1.** Un estudio del MIT encuentra que, por ahora, el catálogo de binarios de agujeros negros conocidos no revela nada fundamental sobre cómo se forman los agujeros negros. En la imagen se muestra una simulación de la luz emitida por un sistema binario de agujero negro supermasivo donde el gas circundante es ópticamente delgado (transparente). Crédito: Centro de Vuelo Espacial Goddard de la NASA.

Las pistas sobre los orígenes de un agujero negro se pueden encontrar en la forma en que gira. Esto es especialmente cierto para los binarios, en los que dos agujeros negros circulan juntos antes de fusionarse. El giro y la inclinación de los respectivos agujeros negros justo antes de fusionarse pueden revelar si los gigantes invisibles surgieron de un disco galáctico silencioso o de un cúmulo de estrellas más dinámico. Los astrónomos esperan descubrir cuál de estas historias de origen es

más probable mediante el análisis de los 69 binarios confirmados detectados hasta la fecha. Pero un nuevo estudio encuentra que, por ahora, el catálogo actual de binarios no es suficiente para revelar nada fundamental sobre cómo se forman los agujeros negros. En un estudio que aparece hoy en la revista *Astronomy and Astrophysics*, los físicos del MIT muestran que cuando todos los binarios conocidos y sus espines se integran en modelos de formación de agujeros negros, las conclusiones pueden verse muy diferentes, según el modelo particular utilizado para interpretar los datos. . Por lo tanto, los orígenes de un agujero negro se pueden "girar" de diferentes maneras, dependiendo de las suposiciones de un modelo sobre cómo funciona el universo. "Cuando cambias el modelo y lo haces más flexible o haces suposiciones diferentes, obtienes una respuesta diferente sobre cómo se formaron los agujeros negros en el universo", dice la coautora del estudio Sylvia Biscoveanu, una estudiante graduada del MIT que trabaja en el Laboratorio LIGO. "Mostramos que las personas deben tener cuidado porque aún no estamos en la etapa con nuestros datos en la que podemos creer lo que nos dice el modelo".

### **Una historia de dos orígenes**

Se cree que los agujeros negros en los sistemas binarios surgen a través de uno de dos caminos. La primera es a través de la "evolución binaria de campo", en la que dos estrellas evolucionan juntas y eventualmente explotan en supernovas, dejando atrás dos agujeros negros que continúan dando vueltas en un sistema binario. En este escenario, los agujeros negros deberían tener espines relativamente alineados, ya que habrían tenido tiempo, primero como estrellas, luego como agujeros negros, para jalar y tirar entre sí en orientaciones similares. Si los agujeros negros de un binario tienen aproximadamente el mismo giro, los científicos creen que deben haber evolucionado en un entorno relativamente tranquilo, como un disco galáctico. Los binarios de agujeros negros también pueden formarse a través del "ensamblaje dinámico", donde dos agujeros negros evolucionan por separado, cada uno con su propia inclinación y giro distintos. Mediante algunos procesos astrofísicos extremos, los agujeros negros eventualmente se unen, lo suficientemente cerca como para formar un sistema binario. Este emparejamiento dinámico probablemente no ocurriría en un disco galáctico silencioso, sino en un entorno más denso, como un cúmulo globular, donde la interacción de miles de estrellas puede hacer que dos agujeros negros se unan. Si los agujeros negros de un binario tienen giros orientados al azar, probablemente se formaron en un cúmulo globular.

Pero, ¿qué fracción de binarios se forman a través de un canal versus el otro? La respuesta, creen los astrónomos, debería estar en los datos y, en particular, en las mediciones de los giros de los agujeros negros.

Hasta la fecha, los astrónomos han derivado los giros de los agujeros negros en 69 binarios, que han sido descubiertos por una red de detectores de ondas gravitacionales que incluye LIGO en los EE. UU. y su contraparte italiana Virgo. Cada detector escucha señales de ondas gravitacionales, reverberaciones muy sutiles a través del espacio-tiempo que quedan de eventos astrofísicos extremos, como la fusión de agujeros negros masivos.

Con cada detección binaria, los astrónomos han estimado las propiedades del agujero negro respectivo, incluyendo su masa y giro. Han trabajado las medidas de espín en un modelo generalmente aceptado de formación de agujeros negros, y encontraron signos de que los binarios podrían tener tanto un espín alineado preferido como espines aleatorios. Es decir, el universo podría producir binarios tanto en discos galácticos como en cúmulos globulares.

"Pero queríamos saber, ¿tenemos suficientes datos para hacer esta distinción?". dice Biscoveanu. "Y resulta que las cosas son complicadas e inciertas, y es más difícil de lo que parece".

### **Girando los datos**

En su nuevo estudio, el equipo del MIT probó si los mismos datos producirían las mismas conclusiones cuando se trabajaron en modelos teóricos ligeramente diferentes de cómo se forman los agujeros negros.

El equipo primero reprodujo las mediciones de espín de LIGO en un modelo ampliamente utilizado de formación de agujeros negros. Este modelo asume que una fracción de los binarios en el universo prefieren producir agujeros negros con espines alineados, mientras que el resto de los binarios tienen espines aleatorios. Descubrieron que los datos parecían estar de acuerdo con las suposiciones de este modelo y mostraban un pico donde el modelo predecía que debería haber más agujeros negros con giros similares.

Luego modificaron ligeramente el modelo, alterando sus suposiciones de modo que predijera una orientación ligeramente diferente de los giros preferidos de los agujeros negros. Cuando trabajaron con los mismos datos en este modelo modificado, encontraron que los datos cambiaron para alinearse con las nuevas predicciones. Los datos también hicieron cambios similares en otros 10 modelos, cada uno con una suposición diferente de cómo prefieren girar los agujeros negros.

"Nuestro artículo muestra que su resultado depende completamente de cómo modele su astrofísica, en lugar de los datos en sí", dice Biscoveanu.

"Necesitamos más datos de los que pensábamos, si queremos hacer una afirmación que sea independiente de las suposiciones astrofísicas que hacemos", agrega Vitale.

¿Cuántos datos más necesitarán los astrónomos? Vitale estima que una vez que la red LIGO se reinicie a principios de 2023, los instrumentos detectarán un nuevo binario de agujero negro cada pocos días. Durante el próximo año, eso podría sumar cientos de mediciones más para agregar a los datos.

"Las medidas de los giros que tenemos ahora son muy inciertas", dice Vitale. "Pero a medida que construimos muchos de ellos, podemos obtener mejor información. Entonces podemos decir, sin importar el detalle de mi modelo, los datos siempre me cuentan la misma historia, una historia que luego podríamos creer".

### **Referencias**

[1] Salvatore Vitale et al, *Spin it as you like: The (lack of a) measurement of the spin tilt distribution with LIGO-Virgo-KAGRA binary black holes*, Astronomy & Astrophysics (2022). ArXiv: <https://arxiv.org/abs/2209.06978> DOI: 10.1051/0004-6361/202245084

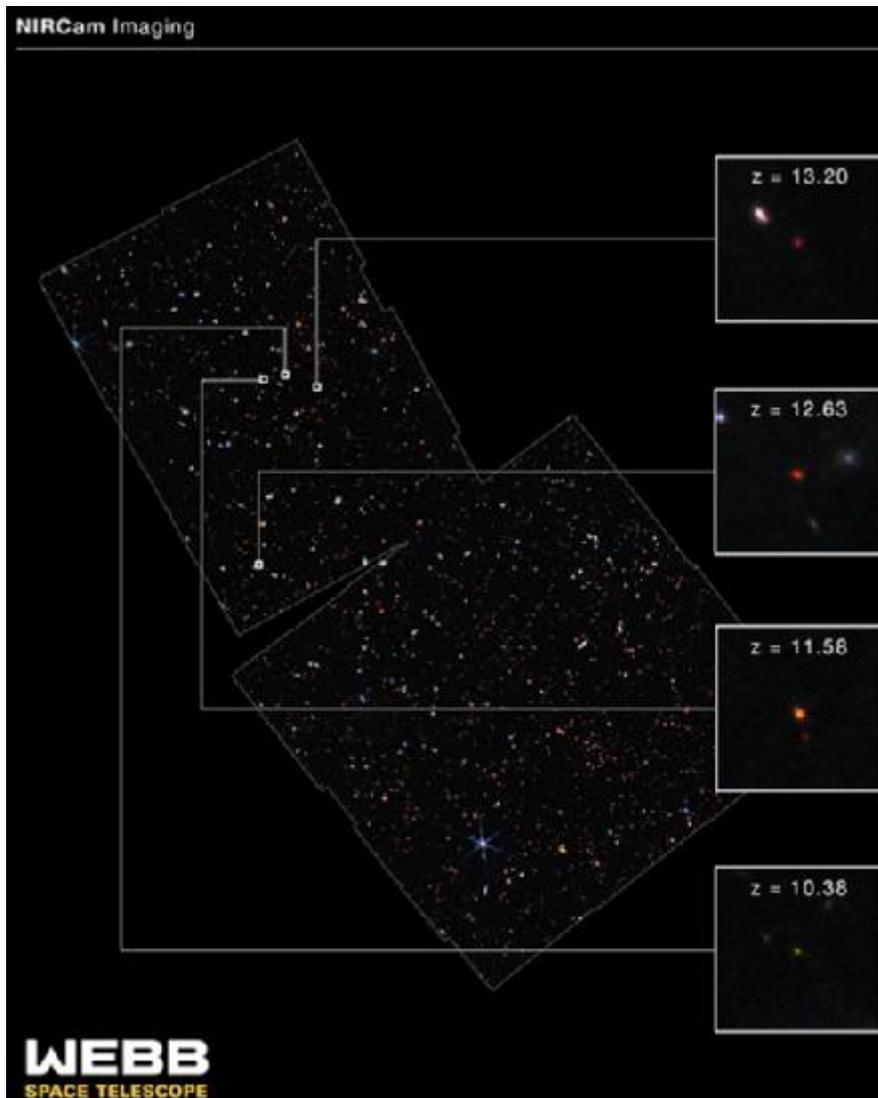
[2] December 9, 2022. *Without more data, a black hole's origins can be 'spun' in any direction* by Jennifer Chu, Massachusetts Institute of Technology. URL: <https://phys.org/news/2022-12-black-hole-spun.html>

[3] *Without more data, a black hole's origins can be 'spun' in any direction*, Scien Daily, URL: <https://www.sciencedaily.com/releases/2022/12/221209135547.htm>

Artículo editado y traducido por Juan F. González.

## 9.Las galaxias más lejanas (por ahora)

[Editar](#)



**Figura 1.** El JWST Advanced Deep Extragalactic Survey (JADES) se centró en el área dentro y alrededor del campo ultraprofundo del telescopio espacial Hubble. Usando el instrumento NIRCам de Webb, los científicos observaron el campo en nueve rangos de longitud de onda infrarroja diferentes. A partir de estas imágenes, el equipo buscó galaxias tenues que son visibles en el infrarrojo pero cuyos espectros se cortan abruptamente en una longitud de onda crítica conocida como ruptura de Lyman. El instrumento NIRSpec de Webb luego produjo una medición precisa del corrimiento al rojo de cada galaxia. Cuatro de las galaxias estudiadas (recuadros) se remontan a menos de 400 millones de años después del Big Bang, cuando el universo tenía solo el 2% de su edad actual. Ver imagen más grande. [Créditos de las imágenes: NASA, ESA, CSA, M. Zamani (ESA/Webb), Leah Hustak (STScI); Créditos científicos: Brant Robertson (UC Santa Cruz), S. Tacchella (Cambridge), E. Curtis-Lake (UOH), S. Carniani (Scuola Normale Superiore), JADES Collaboration]. Nótese que cada punto en la imagen es una galaxia y no una estrella (salvo excepciones).

**Los astrónomos informan sobre las galaxias más distantes conocidas, detectadas y confirmadas por el telescopio Webb:** Las observaciones espectroscópicas con el JWST confirman cuatro galaxias tempranas que datan de menos de 400 millones de años después del Big Bang, tres de las cuales son las más distantes confirmadas hasta la fecha.

Un equipo internacional de astrónomos ha descubierto las galaxias más antiguas y distantes confirmadas hasta la fecha utilizando datos del Telescopio Espacial James Webb (JWST). El telescopio captó la luz emitida por estas galaxias hace más de 13400 millones de años, lo que significa que las galaxias datan de menos de 400 millones de años después del Big Bang, cuando el universo tenía solo el 2% de su edad actual. Las observaciones iniciales del JWST arrojaron varias galaxias candidatas a distancias extremas, al igual que las observaciones anteriores con el telescopio espacial Hubble. Ahora, cuatro de estos objetivos han sido confirmados mediante la obtención de largas observaciones espectroscópicas, que no solo brindan mediciones seguras de sus distancias, sino que también permiten a los astrónomos caracterizar las propiedades físicas de las galaxias. “Hemos descubierto galaxias en tiempos increíblemente tempranos en el universo distante”, dijo Brant Robertson, profesor de astronomía y astrofísica en UC Santa Cruz. “Con JWST, por primera vez ahora podemos encontrar galaxias tan distantes y luego confirmar espectroscópicamente que realmente están tan lejos”. Los astrónomos miden la distancia a una galaxia determinando su corrimiento al rojo. Debido a la expansión del universo, los objetos distantes parecen alejarse de nosotros y su luz se estira a longitudes de onda más largas y rojas por el efecto Doppler. Las técnicas fotométricas basadas en imágenes capturadas a través de diferentes filtros pueden proporcionar estimaciones de corrimiento al rojo, pero las mediciones definitivas requieren espectroscopia, que separa la luz de un objeto en sus diferentes longitudes de onda.

Los nuevos hallazgos se centran en cuatro galaxias con desplazamientos al rojo superiores a 10. Dos galaxias observadas inicialmente por Hubble ahora tienen desplazamientos al rojo confirmados de 10,38 y 11,58. Las dos galaxias más distantes, ambas detectadas en imágenes JWST, tienen desplazamientos al rojo de 13,20 y 12,63, lo que las convierte en las galaxias más distantes confirmadas por espectroscopia hasta la fecha. Un corrimiento al rojo de 13,2 corresponde a hace unos 13,500 millones de años.

“Estos van mucho más allá de lo que podríamos haber imaginado encontrar antes de JWST”, dijo Robertson. "En el corrimiento al rojo 13, el universo tiene solo unos 325 millones de años".

Robertson y Emma Curtis-Lake de la Universidad de Hertfordshire (Reino Unido) presentarán los nuevos hallazgos el 12 de diciembre en una conferencia del Instituto de Ciencias del Telescopio Espacial (STScI) en Baltimore sobre "Primeros resultados científicos de JWST". Son los autores principales de dos artículos sobre los resultados que aún no han pasado por el proceso de revisión por pares (consulte los enlaces a continuación).

Las observaciones son el resultado de una colaboración de científicos que lideraron el desarrollo de dos de los instrumentos a bordo de Webb, la cámara de infrarrojo cercano (NIRCam) y el espectrógrafo de infrarrojo cercano (NIRSpec). La investigación de las galaxias más débiles y tempranas fue la principal motivación en los conceptos de estos instrumentos. En 2015, los equipos del instrumento se unieron para proponer el JWST Advanced Deep Extragalactic Survey (JADES), un ambicioso programa al que se le ha asignado poco más de un mes del tiempo del telescopio y está diseñado para proporcionar una vista del universo primitivo sin precedentes en ambas profundidades. y detalle JADES es una colaboración internacional de más de ochenta astrónomos de diez países.

“Estos resultados son la culminación de por qué los equipos de NIRCam y NIRSpec se unieron para ejecutar este programa de observación”, dijo Marcia Rieke, investigadora principal de NIRCam en la Universidad de Arizona.

El programa JADES comenzó con NIRCam, utilizando más de 10 días de tiempo de misión para observar una pequeña porción de cielo dentro y alrededor del campo ultraprofundo del Hubble. Los astrónomos han estado estudiando esta región durante más de 20 años con casi todos los grandes telescopios. El equipo de JADES observó el campo en nueve rangos de longitud de onda infrarroja diferentes, capturando imágenes exquisitas que revelan casi 100 000 galaxias distantes, cada una de ellas a miles de millones de años luz de distancia.

Luego, el equipo usó el espectrógrafo NIRSpec durante un solo período de observación de tres días para recolectar la luz de 250 galaxias débiles. Esto produjo mediciones precisas del corrimiento al rojo y reveló las propiedades del gas y las estrellas en estas galaxias.

“Con estas medidas, podemos conocer el brillo intrínseco de las galaxias y calcular cuántas estrellas tienen”, dijo Robertson. "Ahora podemos comenzar a analizar realmente cómo se forman las galaxias a lo largo del tiempo".

El coautor principal, Sandro Tacchella, de la Universidad de Cambridge en el Reino Unido, agregó: “Es difícil entender las galaxias sin comprender los períodos iniciales de su desarrollo. Al igual que con los humanos, gran parte de lo que sucede después depende del impacto de estas primeras generaciones de estrellas. Tantas preguntas sobre las galaxias han estado esperando la oportunidad transformadora de Webb, y estamos encantados de poder participar en la revelación de esta historia".

Según Robertson, la formación de estrellas en estas primeras galaxias habría comenzado unos 100 millones de años antes de la edad en que se observaron, lo que llevó la formación de las primeras estrellas a unos 225 millones de años después del Big Bang.

“Estamos viendo evidencia de formación de estrellas tan pronto como podríamos esperar según nuestros modelos de formación de galaxias”, dijo.

Otros equipos han identificado galaxias candidatas con desplazamientos al rojo aún mayores basándose en análisis fotométricos de imágenes JWST, pero aún no se han confirmado mediante espectroscopia. JADES continuará en 2023 con un estudio detallado de otro campo, este centrado en el icónico campo profundo del Hubble, y luego regresará al campo ultraprofundo para otra ronda de imágenes profundas y espectroscopia. Muchos más candidatos en el campo esperan la investigación espectroscópica, con cientos de horas de tiempo adicional ya aprobadas.

## Referencias

[1] *Discovery and properties of the earliest galaxies with confirmed distances*, B. E. Robertson et al. URL: <https://arxiv.org/abs/2212.04480>

“Descubrimiento y propiedades de las primeras galaxias con distancias confirmadas” (<https://arxiv.org/abs/2212.04480>)

[2] *Spectroscopy of four metal-poor galaxies beyond redshift ten*, Emma Curtis-Lake et alii. URL: [https://webbtelescope.org/files/live/sites/webb/files/home/webb-science/early-highlights/documents/2022-061-jades/JADES\\_CurtisLake.pdf](https://webbtelescope.org/files/live/sites/webb/files/home/webb-science/early-highlights/documents/2022-061-jades/JADES_CurtisLake.pdf)

“Espectroscopía de cuatro galaxias pobres en metales más allá del corrimiento al rojo diez”

[3] *Astronomers report most distant known galaxies, detected and confirmed by Webb telescope*. December 09, 2022, By Tim Stephens. URL: <https://news.ucsc.edu/2022/12/earliest-galaxies.html>

[4] Science Daily, *Astronomers report most distant known galaxies, detected and confirmed*, University of California, Santa Cruz. URL: <https://www.sciencedaily.com/releases/2022/12/221209135542.htm>

Artículo traducido y editado por Juan F. González

[Decid "¡Hola!" al material más resistente y duro \(por ahora\): la aleación CrCoNi](#)

## 10. Decid "¡Hola!" al material más resistente y duro (por ahora): la aleación CrCoNi

[Editar](#)

**Saluda al material más resistente de la Tierra: Un nuevo estudio revela las profundas propiedades de una aleación de metal simple CrCoNi.**

8 de diciembre de 2022.

Fuente: DOE/Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley.

*Resumen:* Los científicos han medido la dureza más alta jamás registrada, de cualquier material, mientras investigaban una aleación metálica hecha de cromo, cobalto y níquel. El metal no solo es excepcionalmente fuerte y dúctil, sino que sus propiedades mejoran a medida que se enfría. Esto va en contra de la mayoría de los otros materiales existentes.

Los científicos han medido la dureza más alta jamás registrada, de cualquier material, mientras investigaban una aleación metálica hecha de cromo, cobalto y níquel (CrCoNi). El metal no solo es extremadamente dúctil, lo que, en la ciencia de los materiales, significa altamente maleable, e impresionantemente fuerte (lo que significa que resiste la deformación permanente), sino que su resistencia y ductilidad mejoran a medida que se enfría. Esto va en contra de la mayoría de los otros materiales existentes. . El equipo, dirigido por investigadores del Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley (Berkeley Lab) y el Laboratorio Nacional Oak Ridge, publicó un estudio que describe sus hallazgos sin precedentes en Science el 1 de diciembre de 2022. "Cuando diseñas materiales estructurales, quieres que ser fuerte pero también dúctil y resistente a la fractura", dijo el codirector del proyecto Easo George, presidente de la cátedra del gobernador para teoría y desarrollo de aleaciones avanzadas en ORNL y la Universidad de Tennessee. "Por lo general, es un compromiso entre estas propiedades. Pero este material es ambas cosas, y en lugar de volverse quebradizo a bajas temperaturas, se vuelve más resistente". CrCoNi es un subconjunto de una clase de metales llamados aleaciones de alta entropía (HEA, High Entropy Alloy). Todas las aleaciones en uso actualmente contienen una alta proporción de un elemento con cantidades más bajas de elementos adicionales agregados, pero los HEA están hechos de una mezcla igual de cada elemento constituyente. Estas recetas atómicas equilibradas parecen otorgar a algunos de estos materiales una combinación extraordinariamente alta de resistencia y ductilidad cuando se someten a esfuerzos, lo que en conjunto constituye lo que se denomina "resistencia". Los HEA han sido un área candente de investigación desde que se desarrollaron por primera vez hace unos 20 años, pero la tecnología necesaria para llevar los materiales al límite en pruebas extremas no estuvo disponible hasta hace poco. "La dureza de este material cerca de las temperaturas del helio líquido (20 kelvin, -424 fahrenheit) es tan alta como 500 Mpa·√m (megapascuales por raíz cuadrada de metro, que son las unidades de tenacidad o dureza por fractura, fracture toughness en inglés, magnitud física en ciencia de materiales). En las mismas unidades, la dureza de una pieza de silicio es uno, el fuselaje de aluminio en los aviones de pasajeros es alrededor de 35, y la dureza de algunos de los mejores aceros es de alrededor de 100. Entonces, 500, es un número asombroso", dijo el codirector de investigación Robert Ritchie, científico sénior de la facultad en la División de Ciencias de los Materiales de Berkeley Lab y profesor de ingeniería de Chua. en la Universidad de Berkeley. Ritchie y George comenzaron a experimentar con CrCoNi y otra aleación que también contiene manganeso y hierro (CrMnFeCoNi) hace casi una década. Crearon muestras de las aleaciones y luego bajaron los materiales a temperaturas de nitrógeno líquido (alrededor de 77 K o -321 °F) y descubrieron una fuerza y dureza impresionantes. Inmediatamente quisieron continuar su trabajo con pruebas en rangos de temperatura de helio líquido, pero buscar instalaciones que permitieran probar muestras en un ambiente tan frío y reclutar miembros del equipo con las herramientas analíticas y la experiencia necesarias para analizar lo que sucede en el material en un nivel atómico tomó los próximos 10 años. Afortunadamente, los resultados valieron la pena la espera.

## Mirando en el cristal

Muchas sustancias sólidas, incluidos los metales, existen en forma cristalina caracterizada por un patrón atómico 3D repetitivo, llamado celda unitaria, que forma una estructura más grande llamada red. La fuerza y tenacidad del material, o la falta de ellas, provienen de las propiedades físicas de la red. Ningún cristal es perfecto, por lo que las celdas unitarias en un material inevitablemente contendrán "defectos", un ejemplo destacado son las dislocaciones: límites donde la red no deformada se encuentra con la red deformada. Cuando se aplica fuerza al material (piense, por ejemplo, en doblar una cuchara de metal), el cambio de forma se logra mediante el movimiento de dislocaciones a través de la red. Cuanto más fácil es que se muevan las dislocaciones, más suave es el material. Pero si el movimiento de las dislocaciones está bloqueado por obstáculos en forma de irregularidades reticulares, entonces se requiere más fuerza para mover los átomos dentro de la dislocación y el material se vuelve más fuerte. Por otro lado, los obstáculos suelen hacer que el material sea más frágil, propenso a agrietarse.

Usando difracción de neutrones, difracción de retrodispersión de electrones y microscopía electrónica de transmisión, Ritchie, George y sus colegas en Berkeley Lab, la Universidad de Bristol, Rutherford Appleton Laboratory y la Universidad de Nueva Gales del Sur examinaron las estructuras reticulares de muestras de CrCoNi que habían sido se fractura a temperatura ambiente y 20 K. (Para medir la resistencia y la ductilidad, se tira de una muestra de metal prístino hasta que se fractura, mientras que para las pruebas de tenacidad a la fractura, se introduce intencionalmente una grieta aguda en la muestra antes de que se tire y la tensión necesaria para crecer luego se mide la fisura.)

Las imágenes y los mapas atómicos generados a partir de estas técnicas revelaron que la dureza de la aleación se debe a un trío de obstáculos de dislocación que entran en vigor en un orden particular cuando se aplica fuerza al material. Primero, las dislocaciones en movimiento hacen que áreas del cristal se deslicen y se alejen de otras áreas que están en planos paralelos. Este movimiento desplaza capas de celdas unitarias para que su patrón ya no coincida en la dirección perpendicular al movimiento de deslizamiento, creando una especie de obstáculo. La fuerza adicional sobre el metal crea un fenómeno llamado nanotwinning, en el que las áreas de la red forman una simetría especular con un límite en el medio. Finalmente, si las fuerzas continúan actuando sobre el metal, la energía que se pone en el sistema cambia la disposición de las celdas unitarias, con los átomos de CrCoNi cambiando de un cristal cúbico centrado en la cara a otra disposición conocida como empaquetamiento cerrado hexagonal.

Esta secuencia de interacciones atómicas asegura que el metal siga fluyendo, pero también sigue encontrando nueva resistencia de obstáculos mucho más allá del punto en que la mayoría de los materiales se rompen por la tensión. "Entonces, mientras lo tira, el primer mecanismo comienza y luego comienza el segundo, luego comienza el tercero y luego el cuarto", explicó Ritchie. "Ahora, mucha gente dirá, bueno, hemos visto nanohermanamiento en materiales regulares, hemos visto deslizamiento en materiales regulares. Eso es cierto. No hay nada nuevo en eso, pero es el hecho de que todos ocurren en esta secuencia mágica". eso nos da estas propiedades realmente tremendas".

Los nuevos hallazgos del equipo, junto con otros trabajos recientes sobre HEA, pueden obligar a la comunidad científica de los materiales a reconsiderar nociones arraigadas sobre cómo las

características físicas dan lugar al rendimiento. "Es divertido porque los metalúrgicos dicen que la estructura de un material define sus propiedades, pero la estructura del NiCoCr es la más simple que puedas imaginar: son solo granos", dijo Ritchie. "Sin embargo, cuando se deforma, la estructura se vuelve muy complicada, y este cambio ayuda a explicar su excepcional resistencia a la fractura", agregó el coautor Andrew Minor, director de las instalaciones del Centro Nacional de Microscopía Electrónica de Molecular Foundry en Berkeley Lab y Profesor de Ciencia e Ingeniería de Materiales en UC Berkeley. "Pudimos visualizar esta transformación inesperada gracias al desarrollo de detectores de electrones rápidos en nuestros microscopios electrónicos, que nos permiten discernir entre diferentes tipos de cristales y cuantificar los defectos dentro de ellos con una resolución de un solo nanómetro: el ancho de solo unos pocos átomos, lo que resulta que es aproximadamente del tamaño de los defectos en la estructura deformada de NiCoCr".

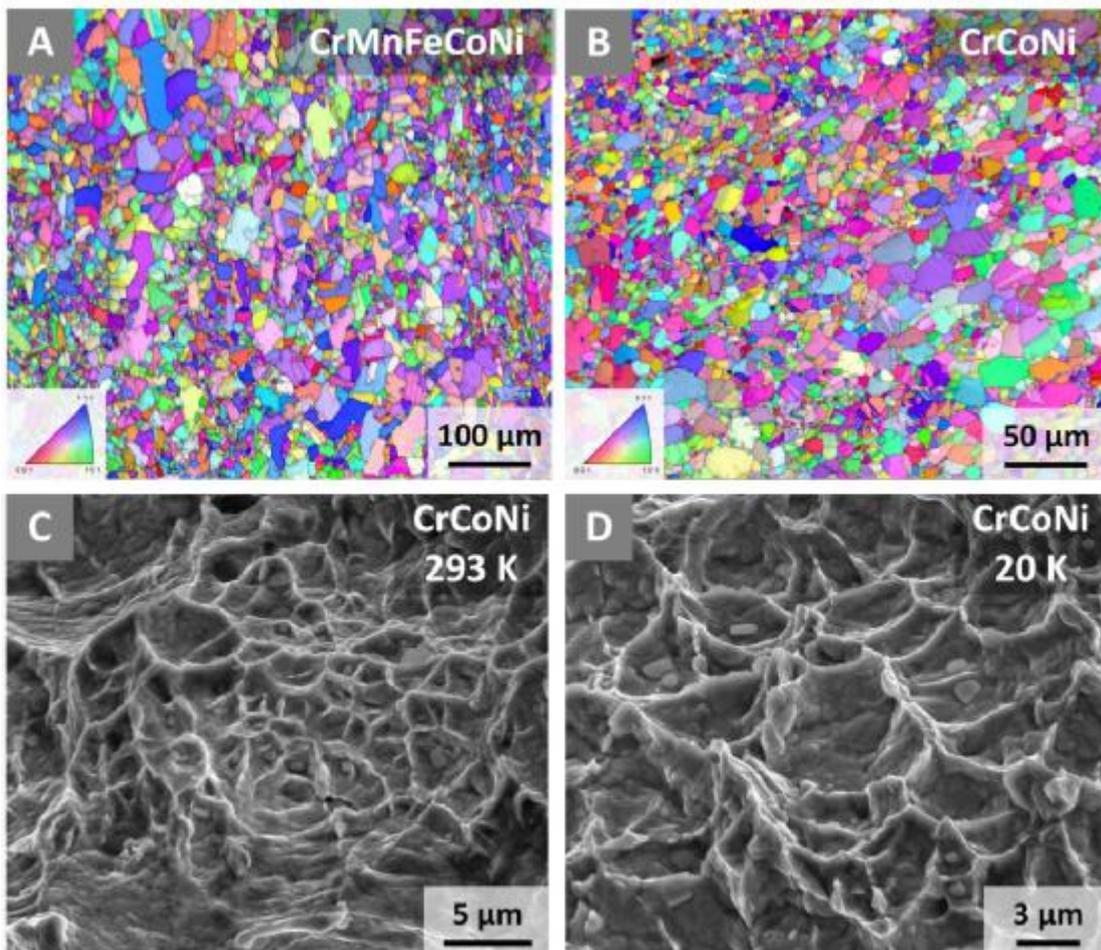
La aleación CrMnFeCoNi también se probó a 20 Kelvin y tuvo un desempeño impresionante, pero no logró la misma dureza que la aleación CrCoNi más simple.

### **Forjar nuevos productos**

Ahora que se comprende mejor el funcionamiento interno de la aleación CrCoNi, esta y otras HEA están un paso más cerca de su adopción para aplicaciones especiales. Aunque estos materiales son costosos de crear, George prevé usos en situaciones en las que los extremos ambientales podrían destruir las aleaciones metálicas estándar, como en las gélidas temperaturas del espacio profundo. Él y su equipo en Oak Ridge también están investigando cómo se podría persuadir a las aleaciones hechas de elementos más abundantes y menos costosos (hay una escasez mundial de cobalto y níquel debido a su demanda en la industria de las baterías) para que tengan propiedades similares.

Aunque el progreso es emocionante, Ritchie advierte que el uso en el mundo real aún podría estar lejos, por una buena razón. "Cuando vuelas en un avión, ¿te gustaría saber que lo que te salva de caer 40 000 pies es una aleación de fuselaje que se desarrolló hace solo unos meses? ¿O te gustaría que los materiales fueran maduros y se entendieran bien? Por eso los materiales estructurales pueden tardar muchos años, incluso décadas, en tener un uso real".

Esta investigación fue apoyada por la Oficina de Ciencias del Departamento de Energía (DOE). La prueba mecánica a baja temperatura y la difracción de neutrones se realizaron en la instalación ENGIN-X ISIS en el laboratorio Rutherford Appleton, dirigida por el primer autor Dong Liu. La microscopía se realizó en el Centro Nacional de Microscopía Electrónica en Molecular Foundry, una instalación para usuarios de la Oficina de Ciencias del DOE en Berkeley Lab. Los otros autores de este proyecto fueron Qin Yu, Saurabh Kabra, Ming Jiang, Joachim-Paul Forna-Kreutzer, Ruopeng Zhang, Madelyn Payne, Flynn Walsh, Bernd Gludovatz y Mark Asta.



**Figura 1.** Estas imágenes, generadas a partir de microscopía electrónica de barrido, muestran las estructuras de grano y las orientaciones de la red cristalina de (A) aleaciones CrMnFeCoNi y (B) CrCoNi. (C) y (D) muestran ejemplos de fracturas en CrCoNi a 293 K y 20 K, respectivamente. (Crédito: Robert Ritchie/Berkeley Lab).

## Referencias

[1] Science Daily: *Say hello to the toughest material on Earth: A new study reveals the profound properties of a simple metal alloy*, URL: <https://www.sciencedaily.com/releases/2022/12/221208114743.htm>

URL alternativa: <https://newscenter.lbl.gov/2022/12/08/say-hello-to-the-toughest-material-on-earth/>

[2] Dong Liu, Qin Yu, Saurabh Kabra, Ming Jiang, Paul Forna-Kreutzer, Ruopeng Zhang, Madelyn Payne, Flynn Walsh, Bernd Gludovatz, Mark Asta, Andrew M. Minor, Easo P. George, Robert O. Ritchie. *Exceptional fracture toughness of CrCoNi-based medium- and high-entropy alloys at 20 kelvin*. Science, 2022; 378 (6623): 978. DOI: [10.1126/science.abp8070](https://doi.org/10.1126/science.abp8070)

Artículo editado y traducido por Juan F. González.

# 11.55 Cancri e: el exoplaneta del infierno

[Editar](#)

## 55 Cancri e: un misterio infernal



**Figura 1.** Impresión artística del planeta 55 Cnc e (círculo naranja oscuro más pequeño) que bloquea la luz de su estrella anfitriona en rotación. Crédito de la imagen: Fundación Maggie Chiang/Simons.

**Vídeo 1.** 55 Cnc-e. Visión artística. Créditos: NASA/JPL-Caltech.

Este planeta infernal orbita su estrella cada 18 horas. ¿Cómo llegó allí? Los astrónomos descubrieron 55 Cancri e en 2004. Eso fue cinco años antes de que se lanzara la nave espacial de búsqueda de planetas Kepler de la NASA, y la ciencia de los exoplanetas ha avanzado mucho en los años intermedios. Los astrónomos descubrieron el planeta con el método de velocidad radial en lugar del método de tránsito de Kepler. 55 Cancri e fue la primera supertierra encontrada alrededor de una estrella de la secuencia principal. El sistema 55 Cancri también fue la primera estrella descubierta con cuatro y luego cinco planetas. El descubrimiento fue una gran noticia entonces; a lo largo de los años, el trabajo de seguimiento ha revelado más detalles, incluido que 55 Cancri e está extremadamente cerca de su estrella y tiene una superficie fundida. Pero una pregunta quedó sin respuesta: ¿Cómo llegó allí?

Un nuevo estudio publicado en Nature Astronomy muestra cómo 55 Cancri e debe haberse formado más lejos de la estrella en los tramos más fríos de su sistema solar. El estudio es "Alineación de la órbita de giro medida de la súper Tierra 55 Cancri e de período ultracorto"[1]. La autora principal es Lily Zhao, investigadora del Centro de Astrofísica Computacional (CCA) del Instituto Flatiron en la ciudad de Nueva York. 55 Cancri es un sistema estelar binario a unos

41 años luz de distancia. Una estrella (55 Cancri A) es una estrella de secuencia principal de tipo K y la otra (55 Cancri B) es una enana roja. 55 Cancri e no es el único planeta del sistema. Tiene cuatro hermanos. El nuevo documento se basa en observaciones realizadas con el instrumento EXtreme PREcision Spectrograph (EXPRES) en el Telescopio de descubrimiento del Observatorio Lowell de 4,3 m en el Observatorio Lowell en Arizona. Está diseñado para mediciones precisas de la velocidad radial de los planetas mientras orbitan sus estrellas.

Como sugiere el título del estudio, la órbita de rotación de los planetas es vital para comprender los planetas y su lugar en la evolución del sistema solar al que pertenecen. Es particularmente importante cuando se trata de planetas como 55 Cancri e porque los astrónomos no entienden cómo los planetas como este terminan tan cerca de sus estrellas. Más sobre eso más adelante. 55 Cancri e es conocido por estar extremadamente cerca de su estrella de secuencia principal, Cancri 55 A, a menudo denominada simplemente Cancri 55. Cancri 55 es más pequeña y menos masiva que el Sol, por lo que también es un poco más fría. Pero eso no le importa al planeta. 55 Cancri e está clasificada como una súper Tierra, pero está lejos de ser como la Tierra. (Muchos exoplanetas son interesantes debido a su habitabilidad potencial, pero ni siquiera mencionan la habitabilidad en este caso). Orbita tan cerca de la estrella que su superficie está fundida y alcanza una temperatura de 2000 grados celsius. (3600 fahrenheit.) Viaja tan rápido que su año dura solo 17.5 horas. Debido a que está tan cerca de su estrella y orbita tan rápido, 55 Cancri e se denomina planeta de período ultracorto (USP, Ultra Short Period exoplanets). Los planetas que completan una órbita en menos de 24 horas son USP.

El planeta no siempre fue un infierno abrasador y fundido. Eso es porque no se formó en su ubicación actual. "Los astrónomos esperan que este planeta se haya formado mucho más lejos y luego haya entrado en espiral en su órbita actual", dijo Debra Fischer. Ella es de la División de Ciencias Astronómicas de la Fundación Nacional de Ciencias y es autora principal del artículo. "Ese viaje podría haber expulsado al planeta del plano ecuatorial de la estrella, pero este resultado muestra que el planeta se mantuvo firme".

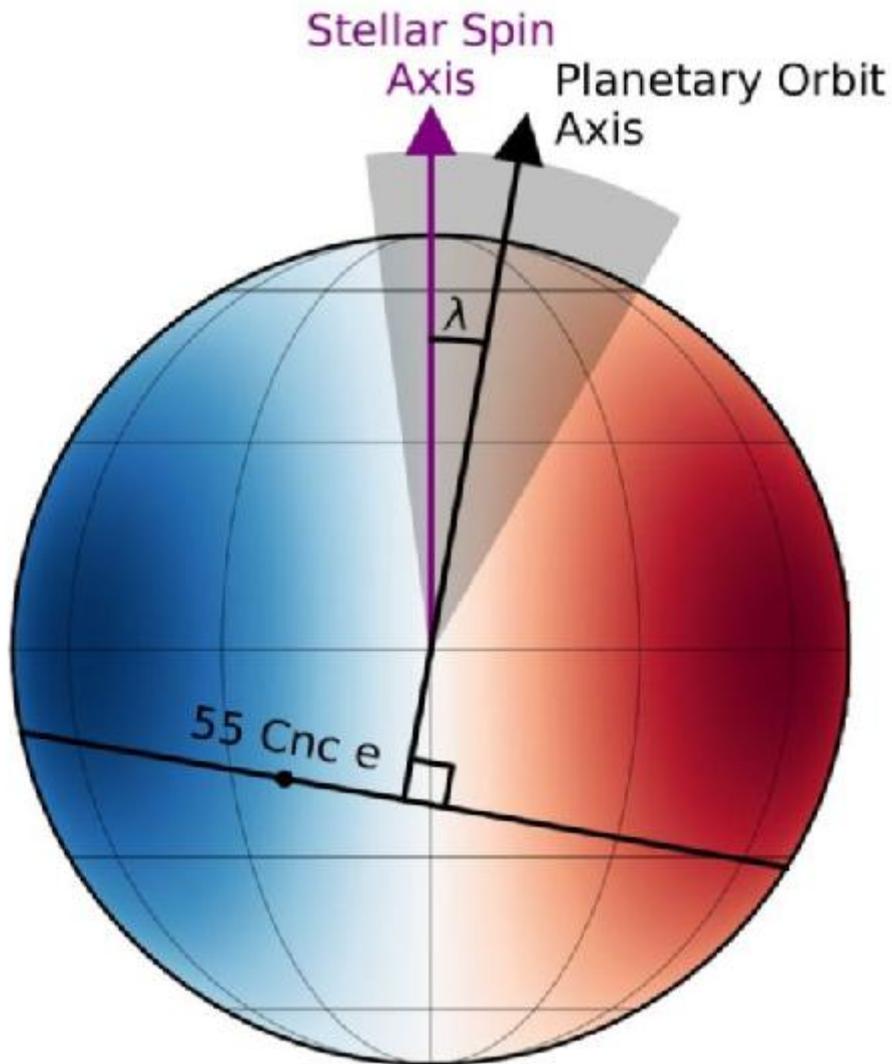
Pero a pesar de que el planeta se formó más lejos del Sol que donde reside ahora, y es una súper Tierra, probablemente nunca fue habitable. 55 Cancri e "... probablemente estaba tan caliente que nada de lo que somos conscientes podría sobrevivir en la superficie", dijo el autor principal Zhao.

55 Cancri e no es el único planeta que cambia de órbita con el tiempo. Lo mismo sucedió en nuestro Sistema Solar. La hipótesis de Grand Tack dice que Júpiter se formó a las 3,5 AU, migró hacia adentro a 1,5 AU y luego volvió a salir a 5,2 AU, donde orbita hoy. La hipótesis de Grand Tack explica algunas cosas sobre nuestro Sistema Solar, incluido por qué Marte es tan pequeño.

Las migraciones de Júpiter ayudaron a dar forma al Sistema Solar y pueden haber influido en el destino de Marte. Si Marte alguna vez fue habitable, y se ve cada vez más como lo era, la migración de Júpiter tuvo que haberlo afectado de alguna manera. Entonces, comprender cómo los exoplanetas como 55 Cancri e migran con el tiempo debería ayudarnos a comprender la habitabilidad de los exoplanetas en otros sistemas solares. Dicha información es fundamental para descubrir qué tan comunes podrían ser los entornos similares a la Tierra en el universo y, por extensión, qué tan abundante puede ser la vida extraterrestre.

El planeta excéntrico es fascinante porque es muy diferente a nuestro planeta o a cualquier otro planeta de nuestro Sistema Solar. Para los científicos curiosos, es más que un bicho raro. Quieren saber cómo terminó tan cerca de su estrella.

Eso nos lleva de vuelta a la inusual alineación del eje de giro del planeta.

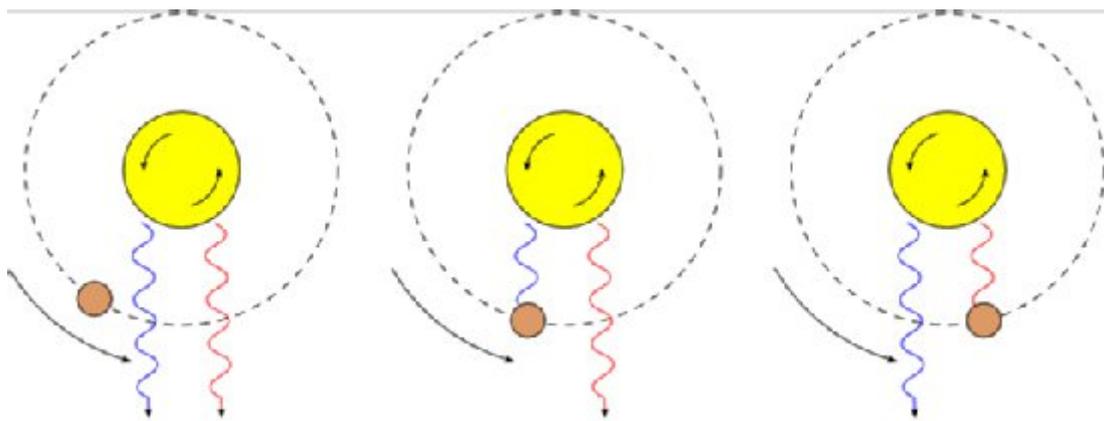


**Figura 2.** Esta imagen muestra el eje orbital de 55 Cancri e en relación con el eje de giro estelar de la estrella. 55 Cancri e es ese pequeño punto negro, y el círculo más grande representa la estrella. Las mitades roja y azul de la estrella representan cómo se desplaza la luz, un factor crítico para determinar el eje de giro de la órbita del planeta. Crédito de la imagen: L.Zhao et al./Nature Astronomy 2022.

Puede parecer contradictorio que los astrónomos utilicen un espectrógrafo, que mide la luz, para determinar el movimiento de un planeta. Pero funciona debido al efecto Doppler. El efecto Doppler explica cómo la luz que se aleja de nosotros se desplaza hacia el rojo y la luz que se acerca a nosotros se desplaza hacia el azul. La estrella anfitriona de Cancri 55 e está girando, lo que significa que la luz del lado que retrocede se desplaza hacia el rojo. Por el contrario, la luz del lado que se aproxima se desplaza hacia el azul.

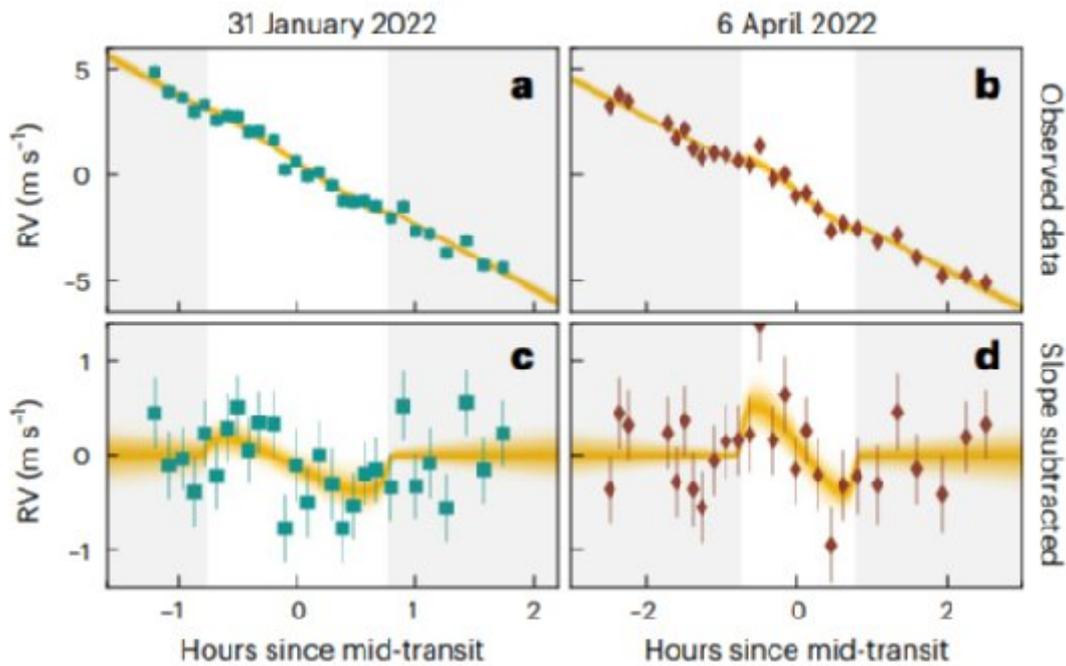
Mientras Cancri 55 e transita frente a la estrella, el instrumento EXPRES del Observatorio Lowell mide la luz de la estrella con precisión. Esas medidas revelan desviaciones aparentes, pero no reales, en la velocidad radial del planeta, y esas desviaciones informan a los astrónomos sobre la órbita y el giro del planeta en relación con la estrella. Los autores lo explican mejor cuando escriben: "La captura del desplazamiento rojo/azul neto resultante revela la orientación del vector normal orbital del planeta con respecto al vector de giro de su estrella anfitriona, es decir, la alineación de la órbita de giro estelar proyectada en el cielo o la rotación estelar oblicuidad."

El efecto específico que midió el equipo cuando el planeta transita por la estrella es el efecto Rossiter-McLaughlin (RM). Explicar eso en detalle significaría ir por la madriguera del conejo, y está más allá del alcance de este artículo. Pero la imagen de abajo arroja algo de luz al respecto. Es suficiente decir que la naturaleza de la luz cambia y EXPRES puede medirla con precisión, más precisión que los instrumentos más antiguos.



**Figura 3.** Esta imagen ilustra el efecto Rossiter-McLaughlin. El espectador se sitúa en la parte inferior. La luz de la estrella que gira en sentido contrario a las agujas del reloj se desplaza hacia el azul en el lado que se acerca y se desplaza hacia el rojo en el lado que se aleja. A medida que el planeta pasa frente a la estrella, bloquea secuencialmente la luz desplazada hacia el azul y hacia el rojo, lo que hace que la velocidad radial aparente de la estrella cambie, pero de hecho no cambia. Crédito de imagen: por Autiwaderivative work: Autiwa (hablar) – Rossiter-McLaughlin\_effect.png, CC BY 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9761976>

Aunque la velocidad radial real del planeta no cambia, el cambio aparente medido todavía muestra el ligero cambio gravitacional que el planeta induce en la estrella. Sin esa información, no es fácil reconstruir la historia de Cancri 55 e y cómo se acercó tanto a su estrella. Porque, como sabemos, no puede haberse formado allí.



**Figura 4.** Esta es una mirada interna a los datos reales recopilados por EXPRES. Muestra mediciones de velocidad radial para Cancri 55 e, capturadas en dos tránsitos separados del planeta con el instrumento EXPRES. Las regiones resaltadas en blanco abarcan la duración del tránsito del planeta, y las áreas fuera del blanco son directamente antes y después de los tránsitos. Crédito de la imagen: L.Zhao et al./Nature Astronomy 2022.

El hallazgo clave es que Cancri 55 e orbita a lo largo del ecuador de su estrella mientras que sus cuatro hermanos no lo hacen. Recuerde que el sistema Cancri 55 es un sistema binario, y la pequeña enana roja del par binario está bastante distante de la estrella más grande. Pero aún ejerce su gravedad más débil sobre el sistema, lo que explica por qué las cinco estrellas probablemente tenían una órbita que no estaba alineada con precisión con la rotación de la estrella más grande. Dado que es muy probable que el planeta inicialmente tuviera el mismo plano orbital que sus hermanos, muestra que a medida que migró hacia el interior, la fuerza gravitacional de la estrella principal alineó al planeta con el ecuador de la estrella.

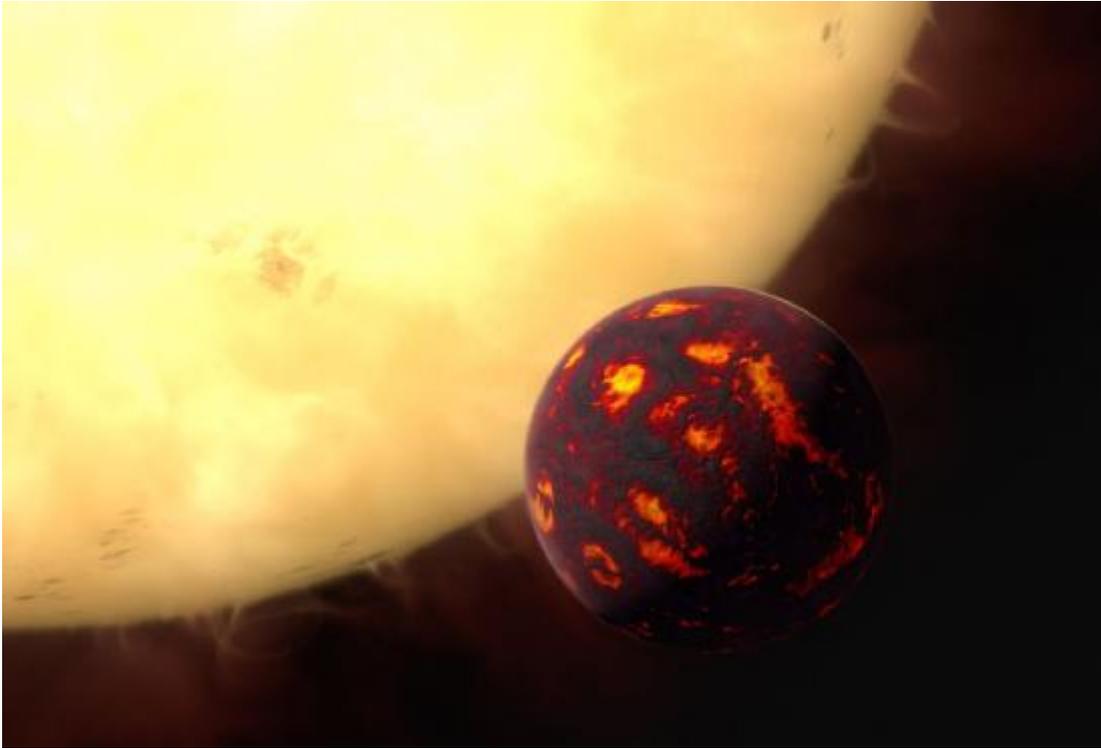
En cuanto a lo que llevó a Cancri 55 e a iniciar su migración hacia la estrella, las causas pueden ser varias. Los planetas están en constante movimiento, y cuando hay cinco de ellos, ejercen una influencia entre sí que puede causar que los planetas migren. También es posible que el planeta se haya formado a partir del disco circunestelar con una desalineación inicial.

“Hemos aprendido cómo este sistema de múltiples planetas, uno de los sistemas con la mayor cantidad de planetas que hemos encontrado, llegó a su estado actual”. Lily Ahao, autora principal, Centro de Astrofísica Computacional del Instituto Flatiron.

“Hemos aprendido cómo este sistema multiplanetario, uno de los sistemas con la mayor cantidad de planetas que hemos encontrado, llegó a su estado actual”, dijo la autora principal del estudio, Lily Zhao.

Si bien este estudio no puede concluir exactamente qué causó que Cancri 55 e se acercara tanto a su estrella, sigue siendo importante. Las mediciones anteriores de su alineación de giro-órbita

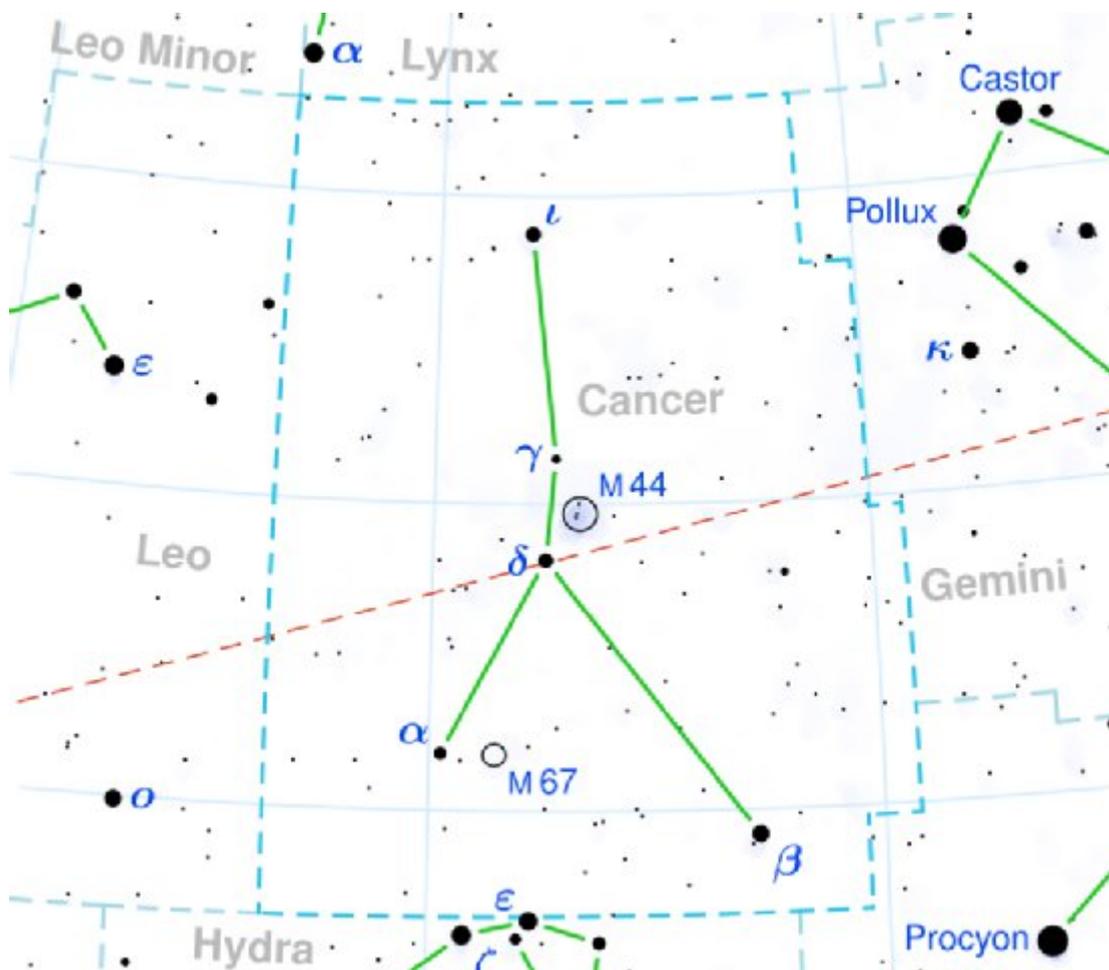
dieron resultados contradictorios porque los instrumentos utilizados para medir la alineación no eran tan precisos. Varias teorías intentan explicar cómo los planetas de período ultracorto terminan en lugares infernales. Una teoría dice que debido a la lejana enana roja, todos los planetas deberían estar desalineados con la rotación de la estrella principal. Otro dice que la resonancia secular entre 55 Cancri e y los otros planetas excitó la excentricidad e inclinación orbital del planeta, desalineándolo con los otros planetas y la estrella. Pero gracias a las mediciones precisas posibles con EXPRES, el equipo lo ha reducido.



**Figura 5.** Ilustración de un artista del llamado "Planeta Infierno", 55 Cancri e, orbitando alrededor de su estrella, 55 Cancri. Crédito de la imagen: ESA/Hubble, M. Kornmesser.

“La estrecha alineación de la órbita normal de la supertierra 55 Cnc e de período ultracorto con el eje de giro de su estrella anfitriona impone restricciones a las teorías sobre cómo los USP migran a sus posiciones actuales y cómo interactúan con otros planetas en multiplanetas compactos. sistemas”, escriben los autores en su conclusión. "Esta medida también da pistas sobre por qué ninguno de los otros planetas conocidos alrededor de 55 Cnc transita y el posible papel del compañero estelar distante de 55 Cnc".

Como suele ser el caso, mejores datos conducen a mejores conclusiones. En este caso, el poderoso instrumento EXPRES ayudó al equipo a comprender mejor este planeta inusual. “Los datos EXPRES utilizados en este análisis tienen una relación señal-ruido (SNR) constante y, a menudo, más alta, así como incertidumbres más bajas que las mediciones de RV utilizadas anteriormente”, escriben. Aquí se refieren a instrumentos como HARPS, el buscador de planetas de velocidad radial de alta precisión, otro espectrómetro diseñado para encontrar exoplanetas.



**Figura 6.** Cancri 55 está a 41 años luz de distancia en la constelación de Cáncer. Crédito de la imagen: CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=361148>

“Nuestra precisión con EXPRES hoy es más de 1000 veces mejor que la que teníamos hace 25 años...”

Debra Fischer, autora principal, División de Ciencias Astronómicas de la Fundación Nacional de Ciencias.

El equipo concluye que la estrecha alineación entre la órbita del planeta y el eje de la estrella anfitriona favorece una explicación sobre otras. "La estrecha alineación de la órbita normal de 55 Cnc e con el eje estelar de su estrella anfitriona favorece preliminarmente los modelos de marea de baja excentricidad y oblicuidad planetaria". La baja excentricidad significa que la órbita del planeta no era completamente circular pero no se desvió mucho de un círculo. La oblicuidad planetaria es el ángulo entre la órbita de un planeta y su eje de giro. Y eso es lo más profundo a lo que vamos.

Recuerda que este sistema estelar está a 41 años luz de distancia, ¡una distancia enorme! Y aunque Cancri 55 e es varias veces más masivo que la Tierra, sigue siendo increíblemente pequeño desde tan lejos. Es por eso que los instrumentos mejorados como EXPRESS son tan importantes en astronomía.

“Nuestra precisión con EXPRES hoy es más de 1000 veces mejor que la que teníamos hace 25 años cuando comencé a trabajar como cazador de planetas”, dijo Fischer. “Mejorar la precisión de

la medición fue el objetivo principal de mi carrera porque nos permite detectar planetas más pequeños mientras buscamos análogos de la Tierra”. EXPRES es más nuevo que HARPS y revela más detalles sobre los exoplanetas en tránsito que HARPS. Y el detalle nos está ayudando a comprender la dinámica del sistema solar en sistemas remotos como Cancri 55 y eventualmente puede ayudar a explicar la historia de nuestro propio Sistema Solar. “Con esta medición robusta que utiliza datos EXPRES, podemos imponer restricciones en las diferentes historias dinámicas propuestas para el sistema 55 Cnc”.

## Referencias

[1] *Measured Spin-Orbit Alignment of Ultra-Short Period Super-Earth 55 Cancri e*, URL:

<https://www.nature.com/articles/s41550-022-01837-2.epdf>, URL alternativa:

[https://assets.researchsquare.com/files/rs-1747082/v1\\_covered.pdf?c=1657031092](https://assets.researchsquare.com/files/rs-1747082/v1_covered.pdf?c=1657031092)

[2] Universe Today, December 9, 2022. Posted on December 9, 2022 by Evan Gough: *This Hellish Planet Orbits its Star Every 18 Hours. How Did it Get There?*. URL:

<https://www.universetoday.com/159093/this-hellish-planet-orbits-its-star-every-18-hours-how-did-it-get-there/>

Artículo editado y traducido por Juan F. González.

## 12. Dos nuevas supertierras "cercanas"

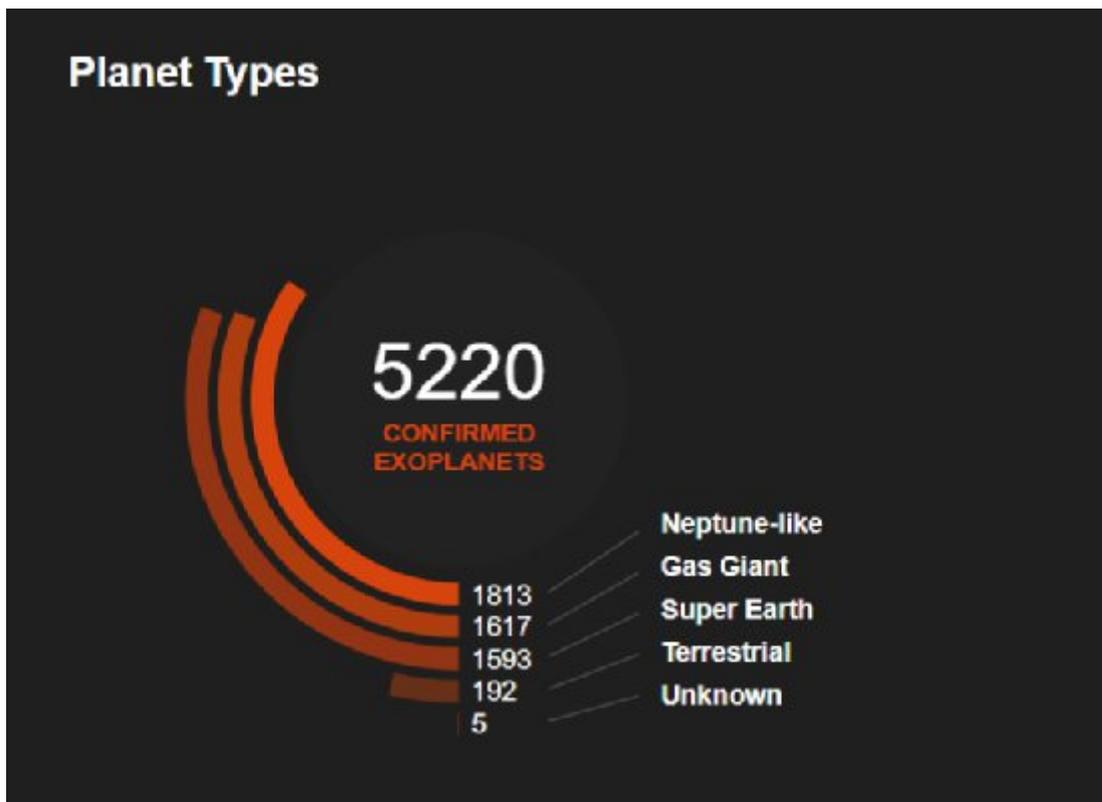
[Editar](#)



**Figura 1.** Los telescopios del Observatorio Austral SPECULOOS observan el impresionante cielo nocturno sobre el desierto de Atacama, Chile. ©ESO/P.Holárek.

**Los astrónomos han encontrado dos supertierras templadas que orbitan una enana roja cercana**

Un equipo de astrónomos ha encontrado dos Súper-Tierras que orbitan alrededor de una enana roja a unos 114 años luz de distancia (cerca es relativo, como siempre). La estrella, llamada LP 890-9, es la segunda estrella más fría encontrada que alberga planetas. Es probable que ambos planetas sean templados, y uno de ellos "... es el segundo planeta terrestre con zona habitable más favorable conocido hasta ahora", según el documento que presenta los resultados. Hay un problema desafiante en nuestra búsqueda de exoplanetas similares a la Tierra. Tres cuartas partes de los exoplanetas que hemos encontrado se detectaron con el método de tránsito, donde los planetas pasan frente a sus estrellas, lo que provoca una disminución de la luz de las estrellas que pueden ver las naves espaciales como Kepler y TESS. Esto significa que los planetas gigantes del tamaño de Júpiter que orbitan estrellas brillantes son más fáciles de detectar porque hay mucha luz estelar y un mundo masivo que crea una depresión más detectable.



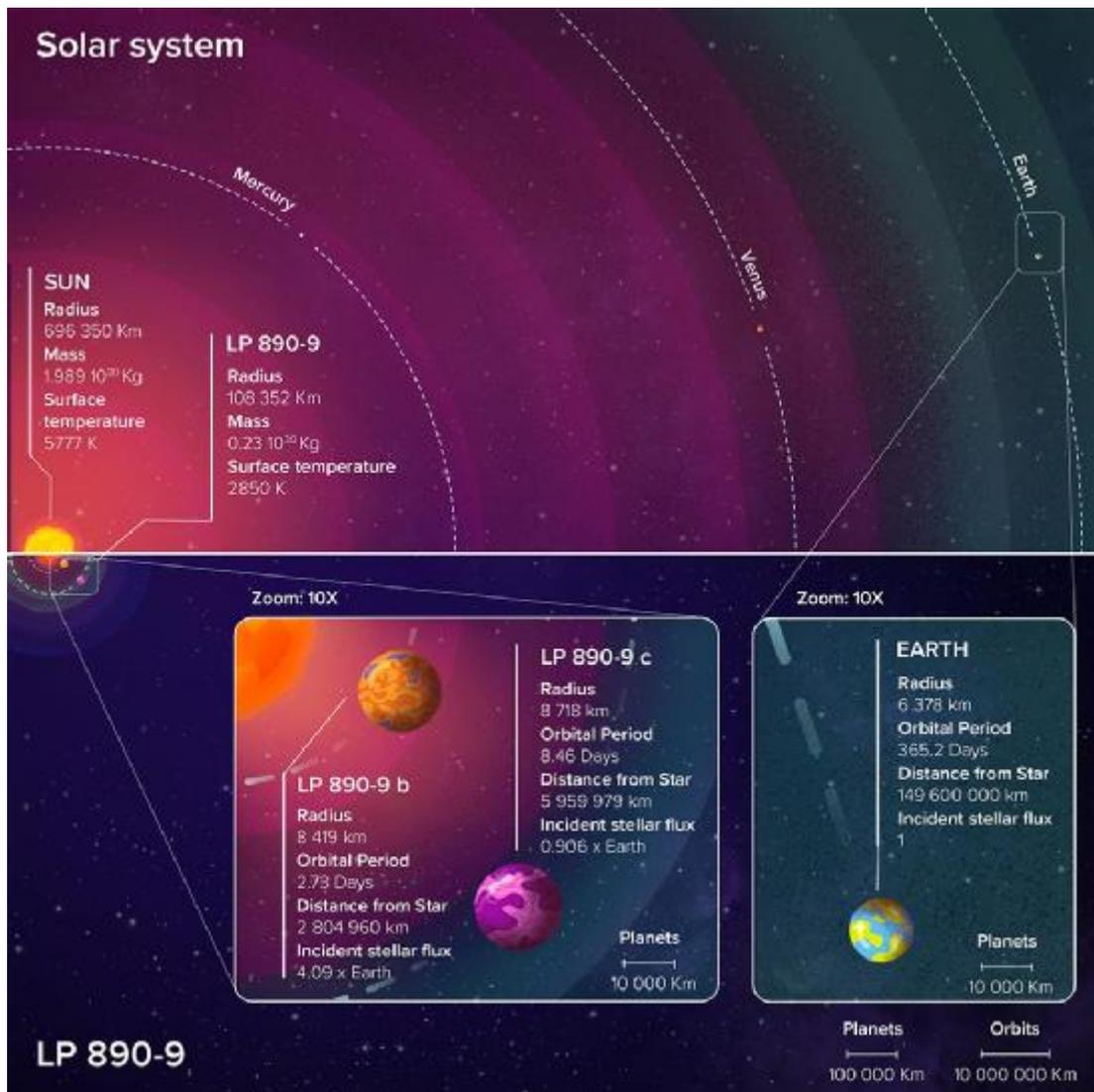
**Figura 2.** Esta es una captura de pantalla del Exoplanet Discovery Dashboard de la NASA. La mayoría de los exoplanetas descubiertos hasta ahora son planetas del tamaño de Neptuno. El siguiente tipo más descubierto son los gigantes gaseosos como Júpiter y Saturno. Las súper-Tierras no tienen una definición exacta, pero son planetas entre la masa de la Tierra y la de Neptuno. Pueden estar hechos de gas, roca o ambos. Los planetas terrestres constituyen el menor número de exoplanetas, pero SPECULOOS pretende cambiar eso. Crédito de la imagen: NASA.

Encontrar planetas gigantes del tamaño de Júpiter significa que estamos encontrando gigantes gaseosos inhabitables, muchos tan cerca de sus estrellas que son Júpiteres calientes. Pero estamos más interesados en encontrar planetas similares a la Tierra, planetas en el mismo rango de tamaño que la Tierra que orbitan en la zona habitable de su estrella. Estos planetas son más pequeños y no bloquean tanta luz, lo que los hace difíciles de detectar.

El deseo de encontrar planetas similares a la Tierra llevó al desarrollo de la Búsqueda de planetas habitables ECLipsing ULtra-cOOL Stars (SPECULOOS). Es un proyecto en el Observatorio Paranal del Observatorio Europeo Austral (ESO) en Chile. SPECULOOS es un estudio de alrededor de 1700 M enanas (enanas rojas) que utiliza el método de tránsito para detectar planetas similares a la Tierra. Dado que las enanas M son más frías que estrellas como nuestro Sol, la zona habitable está más cerca de la estrella. Entonces, los planetas similares a la Tierra en las zonas habitables de estas estrellas están más cerca de sus estrellas y son más fáciles de detectar cuando transitan. También son más fáciles de estudiar y los astrónomos pueden realizar mediciones más precisas de sus propiedades, como sus masas, radios, parámetros orbitales y, en el futuro, sus atmósferas. Estudiar las atmósferas de los planetas similares a la Tierra cercanos es un objetivo crítico porque ahí es donde podemos encontrar rastros de actividad biológica.

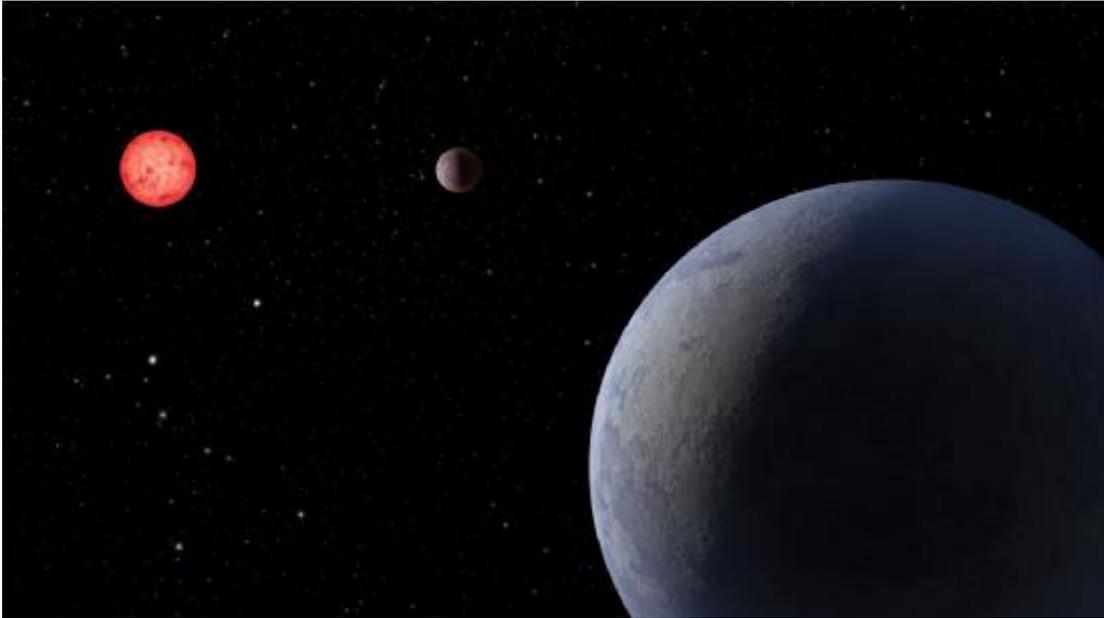
SPECULOOS ha pagado dividendos desde su creación en 2017, y los nuevos hallazgos provienen de la encuesta de SPECULOOS.

El artículo es "Dos supertierras templadas que transitan por una enana M de tipo tardío cercana"/"Two temperate super-Earths transiting a nearby late-type M dwarf" [1] y se publicó en la revista *Astronomy and Astrophysics*. La autora principal es Laetitia Delrez, investigadora postdoctoral en astrofísica en la Universidad de Lieja, Bélgica. La estrella de este estudio es una enana ultrafría (UCD) a unos 104 años luz de distancia llamada LP 890-9 (TOI-4306, SPECULOOS-2). Los planetas son súper-Tierras templadas llamadas LP 890-9 b y LP 890-9 c. El planeta más cercano a la estrella, LP 890-9 b, es aproximadamente un 30 % más grande que la Tierra, tiene un período orbital de 2,73 días y está a 0,019 UA de la estrella. El segundo planeta, LP 890-9 c, es un poco más grande que el primero, tarda más en orbitar con un período de 8,46 días y está a 0,040 UA de la estrella. Eso significa que ambos planetas encajan bien dentro de la órbita de Mercurio alrededor del Sol a modo de comparación.



**Figura 3.** Este gráfico muestra la situación en torno a la enana ultrafría LP 890-9 en comparación con nuestro Sistema Solar interior. El sistema LP 890-9 es mucho más compacto y sus dos planetas podrían caber fácilmente dentro de la órbita de Mercurio, el planeta más interno de nuestro Sistema Solar. Crédito de la imagen: Adeline Deward (RISE-Ilustración).

Pero mientras Mercurio sufre bajo el implacable ataque de la poderosa radiación del Sol, las cosas son muy diferentes en este sistema remoto. La estrella es mucho más fría que el Sol, lo que explica por qué ambos planetas se encuentran en la zona templada. Francisco J. Pozuelos es investigador del Instituto de Astrofísica de Andalucía y uno de los principales coautores del artículo. Explica cómo es el segundo planeta del sistema, LP 890-9 c, según SPECULOOS y observaciones de seguimiento con otros telescopios. “Aunque este planeta orbita muy cerca de su estrella, a una distancia unas 10 veces menor que la de Mercurio alrededor de nuestro Sol, la cantidad de radiación estelar que recibe es aún baja y podría permitir la presencia de agua líquida en la superficie del planeta, siempre y cuando tiene un ambiente suficiente”, dijo Pozuelos. “Esto se debe a que la estrella LP 890-9 es unas 6,5 veces más pequeña que el Sol y tiene una temperatura superficial la mitad de la de nuestra estrella. Esto explica por qué LP 890-9c, a pesar de estar mucho más cerca de su estrella que la Tierra del Sol, aún podría tener condiciones adecuadas para la vida”.

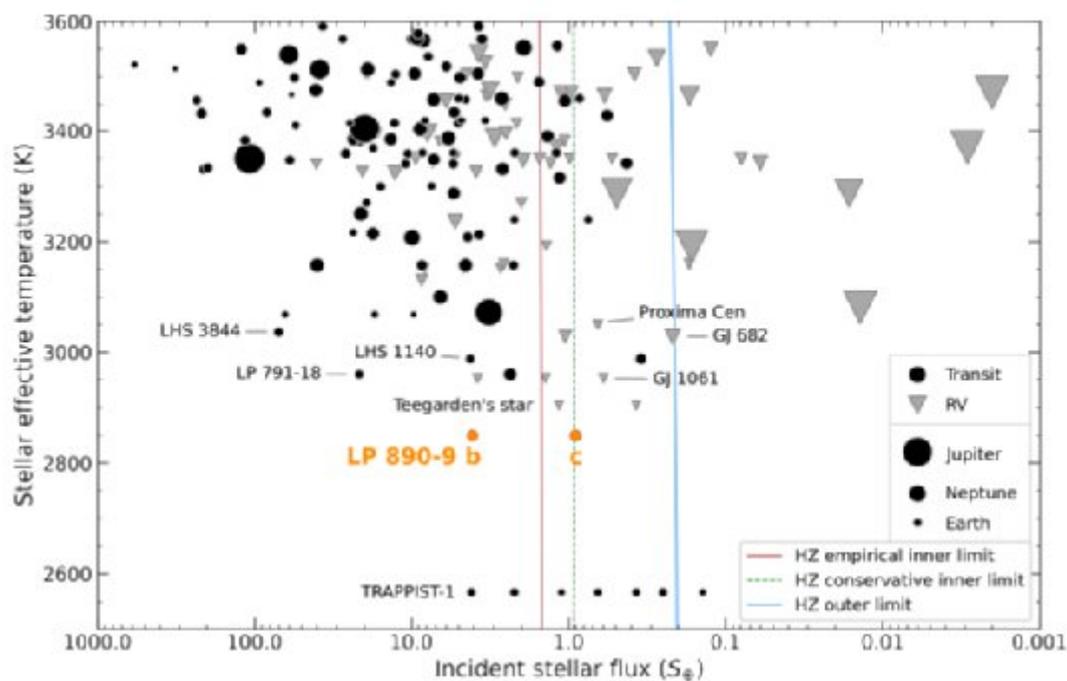


**Figura 4.** Esta es una ilustración artística de la Súper-Tierra LP 890-9 c y su planeta hermano, LP 890-9 b, orbitando una estrella enana roja a unos 100 años luz de la Tierra. A esa distancia, es un buen objetivo para el estudio atmosférico con el telescopio espacial James Webb. Crédito de la imagen: NASA/JPL-Caltech.

LP 890-9 c es un objetivo jugoso para el JWST. JWST tiene una poderosa capacidad espectroscópica que puede usar para estudiar la atmósfera del planeta. Ya estudió otro exoplaneta, WASP-39b, y nos dio nuestra comprensión más detallada de la atmósfera de un exoplaneta hasta el momento. Pero es un Júpiter caliente, a diferencia de la súper Tierra detectada por SPECULOOS.

LP 890-9 c solo es superado por los famosos planetas TRAPPIST-1, encontrados con la misión precursora de SPECULOOS, como un exoplaneta terrestre deseable y potencialmente habitable. Las comparaciones con la Tierra son inevitables, pero cada planeta tiene tantos detalles que la comparación solo llega hasta cierto punto. "Sin embargo, esta comparación no considera el hecho de que LP 890-9c se encuentra cerca del límite interior de la zona habitable y, por lo tanto, podría tener una atmósfera particularmente rica en vapor de agua, lo que aumentaría sus señales atmosféricas". explica el autor principal Delrez. "Además, los modelos a menudo difieren en cuanto a la posición exacta de este límite interior de la zona habitable según las características de la estrella. El descubrimiento de LP 890-9c, por lo tanto, ofrece una oportunidad única para comprender mejor y restringir las condiciones de habitabilidad alrededor de las estrellas más pequeñas y frías de nuestro vecindario solar.

¿Cómo se comparan estos planetas con otros exoplanetas alrededor de estrellas enanas frías? El equipo los trazó en un gráfico con otros exoplanetas alrededor de estrellas similares que se encuentran en el Archivo de Exoplanetas de la NASA. Restringieron los datos a planetas alrededor de estrellas con una temperatura superficial inferior a 3600 Kelvin. (La temperatura de la superficie del Sol es de 5778 K.).



**Figura 5.** Esta figura del estudio muestra los planetas encontrados hasta ahora alrededor de enanas frías utilizando las técnicas de tránsito y velocidad radial en función del flujo estelar que reciben y la temperatura efectiva de su estrella anfitriona. Las líneas verticales marcan los límites de las zonas habitables. LP 890-c está dentro del límite habitable. Todos estos sistemas son sistemas multiplanetarios, en línea con la observación de que los sistemas multiplanetarios compactos deberían ser un resultado relativamente común de la formación de planetas alrededor de estrellas de baja masa. Crédito de la imagen: Delrez et al. 2022.

Es importante señalar en todas las discusiones sobre exoplanetas potencialmente habitables que tenemos poca idea de si alguno de estos planetas es remotamente habitable. El término habitable es relativo. Los Júpiter calientes no son habitables de ninguna manera, por lo que nunca se los denomina potencialmente habitables. Pero el término “zona habitable” sí tiene utilidad. "La zona habitable (HZ) es un concepto que se puede utilizar para priorizar los exoplanetas rocosos detectados para las observaciones de seguimiento", explican los autores.

También es importante señalar que el tamaño de una zona habitable está determinado por varias cosas. “El ancho y la distancia de la región HZ dependen en una primera aproximación del flujo estelar incidente y de la composición atmosférica del planeta”, escriben los autores. La concentración de gases de efecto invernadero es un factor esencial. También depende de la superficie del planeta porque, como señalan los autores, "las estrellas frías calientan la superficie de un planeta similar a la Tierra con mayor eficacia que las estrellas más calientes", lo que podría ser contradictorio.

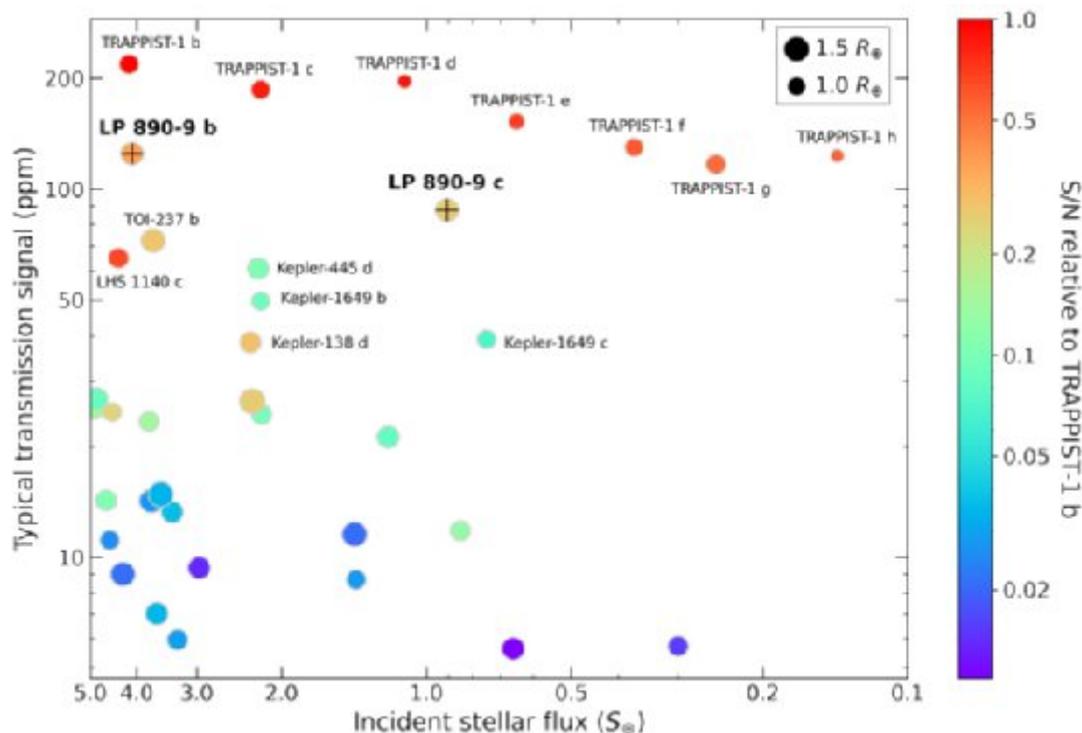
**Vídeo 1.** ¿Puede haber vida en planetas orbitando enanas rojas? Can There Be Life On Planets Around Red Dwarf Stars? Créditos: Fraser Cain.

Otro factor a considerar es la habitabilidad potencial de los planetas alrededor de las estrellas enanas rojas. Cierta evidencia muestra que pueden estallar violentamente, y cada destello produce una corriente de partículas poderosas que pueden despojar a los planetas de las atmósferas. Y

aunque las enanas rojas no son tan brillantes como estrellas como nuestro Sol, pueden producir rayos UV y rayos X más dañinos. Otra investigación muestra que las erupciones violentas solo provienen de sus polos, lo que no afectaría a los planetas en órbita. Hay grandes preguntas sobre la habitabilidad alrededor de las enanas rojas que no tienen nada que ver con la zona habitable o la atmósfera de un planeta.

Por otro lado, parece que LP 890-9 es una estrella relativamente tranquila. "LP 890-9 es una enana M de tipo tardío de actividad relativamente baja", explican los autores. Dicen que la estrella es relativamente joven para una enana roja, solo unos 7 mil millones de años. Las enanas rojas pueden durar decenas de miles de millones de años, y las más pequeñas duran billones. Otras estrellas enanas rojas parecían tranquilas antes de que las observaciones de seguimiento mostraran lo contrario.

LP 890-9 y sus planetas son excelentes candidatos para estudios de seguimiento, por lo que probablemente aprenderemos más sobre sus propiedades, no solo sobre su nivel de actividad, en el futuro. El documento muestra la fuerza y la confiabilidad esperadas de futuras observaciones de planetas en el sistema.



**Figura 6.** Esta figura del estudio muestra las relaciones señal-ruido para las señales esperadas de los exoplanetas terrestres en el Archivo de Exoplanetas de la NASA. Todos se comparan con TRAPPIST-1 b, un importante planeta comparativo que tiene aproximadamente la misma masa que la Tierra. El tamaño de los símbolos es proporcional al radio planetario. Las señales de transmisión de menos de 5 ppm se han eliminado para mejorar la legibilidad de la figura. LP 890-9 b se compara bien con los planetas exteriores TRAPPIST-1 en términos de potencial para la caracterización atmosférica, mientras que LP 890-9 c se destaca como el segundo planeta terrestre con zona habitable más favorable después de los planetas TRAPPIST-1. Crédito de la imagen: Delrez et al. 2022.

El JWST está trabajando en su lista de objetivos, y uno de sus cuatro objetivos científicos principales se refiere a las atmósferas de exoplanetas. Sus observaciones ya proporcionaron la base para un estudio, donde encontró dióxido de carbono en la atmósfera de WASP-39b, la primera vez que lo detectamos en un exoplaneta.

Con suerte, el poderoso telescopio espacial finalmente apuntará su espectrógrafo a estos planetas y revelará sus secretos.

“El descubrimiento de este notable sistema ofrece otra rara oportunidad para estudiar planetas terrestres templados alrededor de nuestros vecinos más pequeños y fríos”, concluyen los autores.

## Referencias

[1] “Two temperate super-Earths transiting a nearby late-type M dwarf”, L. Delrez, C.A. Murray, F.J. Pozuelos, et al. 2022, *A&A*, 667, A59. Disponible online en la URL: <https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/insu-03860263/document>

[2] Universe Today magazine, *Astronomers Have Found Two Temperate Super-Earths Orbiting a Nearby Red Dwarf* , URL: <https://www.universetoday.com/159044/astronomers-have-found-two-temperate-super-earths-orbiting-a-nearby-red-dwarf/>

[3] *SPECULOOS discovers a potentially habitable super-Earth.* URL: [https://www.news.uliege.be/cms/c\\_16795199/en/speculoos-discovers-a-potentially-habitable-super-earth](https://www.news.uliege.be/cms/c_16795199/en/speculoos-discovers-a-potentially-habitable-super-earth)

Artículo editado y traducido por Juan F. González

# 13. Algunos exoplanetas "favoritos" de los astrónomos

[Editar](#)

## ¿Los científicos de exoplanetas tienen exoplanetas favoritos?

Los exoplanetas se han convertido en toda una sensación durante la última década, con científicos que confirman nuevos exoplanetas de forma regular gracias a las misiones Kepler y TESS de la NASA, junto con el telescopio espacial James Webb que también examinó recientemente las atmósferas de los exoplanetas. Es debido a estos descubrimientos que la ciencia de los exoplanetas se ha convertido en un emocionante campo de intriga y maravilla, pero ¿los mismos científicos que estudian estos maravillosos y misteriosos mundos tienen sus propios exoplanetas favoritos? ¡Resulta que cuatro de estos científicos de exoplanetas, a veces denominados "exoplanetarios", tuvieron la amabilidad de compartir sus favoritos con Universe Today!

“Mi favorito es en realidad un sistema de exoplanetas: el sistema HR 8799”, dijo la Dra. Theodora Karalidi, profesora asistente en el Departamento de Física de la Universidad de Florida Central. “El sistema tiene cuatro planetas que son gigantes y todavía están lo suficientemente calientes y

lejos de su estrella madre para que podamos verlos con nuestros telescopios. Ver los planetas girando alrededor de su estrella madre es fascinante”.

HR 8799 se encuentra aproximadamente a 130 años luz de la Tierra dentro de la constelación de Pegaso, cuyos planetas, HR 8799 b, HR 8799 c, HR 8799 d y HR 8799 e, se descubrieron utilizando el método de imagen directa, con b, c y d se descubrió en 2008 y e se descubrió en 2010. Los cuatro exoplanetas tienen entre 8 y 10 veces la masa de Júpiter, y todos orbitan mucho más allá de la zona habitable de su estrella madre.



**Figura 1.** Interpretación artística de HR 8799 b observada desde la superficie de una posible luna cercana. (Crédito: NASA/Agencia Espacial Europea/G. Bacon (Instituto de Ciencias del Telescopio Espacial))

“Me encantan muchos exoplanetas y no soy bueno para elegir favoritos, pero supongo que tendría que elegir Kepler-9d porque lo descubrí”. Exclamó con orgullo el Dr. Darin Ragozzine, profesor asociado en el Departamento de Física y Astronomía de la Universidad Brigham Young. “El equipo de Kepler estaba trabajando activamente en Kepler-9, y tuve la idea de buscar señales adicionales y apareció Kepler-9d. ¡Es mi único descubrimiento personal de planetas, aunque he estado involucrado con muchos otros!”

Después de su descubrimiento utilizando lo que se conoce como el método de tránsito en 2010, el Dr. Ragozzine también fue el autor principal de un artículo histórico de 2018 sobre el sistema Kepler-9, que se encuentra aproximadamente a 2049 años luz de la Tierra. Como se dijo, el exoplaneta que descubrió el Dr. Ragozzine es Kepler-9d, que se supone que es un planeta rocoso un poco más de 3 veces más masivo que la Tierra. Si bien esto suena intrigante para las

perspectivas de vida, Kepler-9d orbita muy dentro de la zona habitable (HZ) de su estrella madre y mucho más cerca que Mercurio con un período orbital de solo 1,6 días.

“Me encanta HD 20782 b”, dijo el Dr. Stephen Kane, profesor de astrofísica planetaria con roles duales en el Departamento de Ciencias Planetarias y de la Tierra y el Departamento de Física y Astronomía de la Universidad de California, Riverside. "Es el exoplaneta más excéntrico conocido ( $e = 0,97!!$ ), y también lo es una increíble bola de demolición gigante que se acerca tanto a su estrella que casi se tocan".

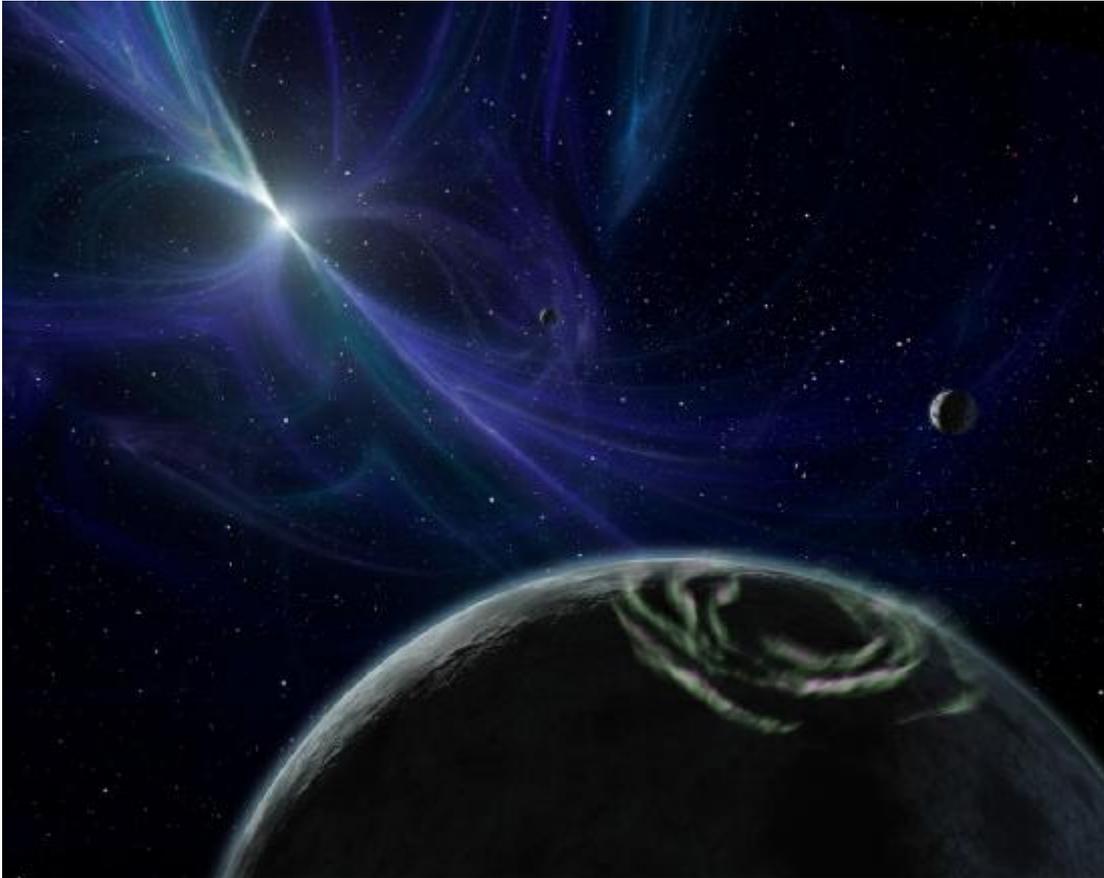
HD 20782 b es conocido como un exoplaneta altamente excéntrico que se encuentra aproximadamente a 117 años luz de la Tierra, lo que significa que su órbita es increíblemente alargada y en realidad viaja dentro y fuera de la ZH de su estrella durante el transcurso de una órbita. Fue descubierto en 2006 utilizando el método de la velocidad radial, es un poco más masivo que Júpiter y tarda más de un año y medio en orbitar su estrella. El Dr. Kane proporcionó un breve clip de la órbita de HD 20782 b y se puede encontrar aquí:

00:00

00:08

**Vídeo 1.** HD 20782 b y su órbita excéntrica.

El exoplaneta favorito final en nuestro viaje no es un exoplaneta o sistema exoplanetario específico, sino un tipo específico de exoplaneta conocido como planetas púlsares, que como su nombre lo indica, son exoplanetas que orbitan púlsares y son increíblemente raros. Estos exoplanetas son los favoritos del Dr. Alex Wolszczan, profesor de la Universidad Evan Pugh en el Departamento de Astronomía y Astrofísica de la Universidad Estatal de Pensilvania, y dice que son sus favoritos no solo porque los descubrió.



**Figura 2.** Interpretación artística del PSR B1257+12. (Crédito: NASA/JPL-Caltech/R. Hurt).

“Son los primeros exoplanetas confirmados, y ese descubrimiento trajo consigo la predicción de que los planetas deberían ser comunes alrededor de todo tipo de estrellas, que es exactamente lo que hemos descubierto en los últimos 30 años”, explica el Dr. Wolszczan. El descubrimiento al que se refiere el Dr. Wolszczan ocurrió en 1992 con dos exoplanetas en un sistema conocido como PSR B1257+12 ubicado aproximadamente a 1950 años luz de la Tierra, y se encontraron utilizando el método de sincronización de púlsares, con un tercer exoplaneta confirmado en 1994. Mientras Esto parece bastante intrigante, los planetas púlsares no serían un buen lugar para buscar vida debido a los intensos niveles de radiación que emanan del propio púlsar. ¿Cuáles son tus exoplanetas, sistemas exoplanetarios o tipos de exoplanetas favoritos?

Como siempre, ¡sigan haciendo ciencia y sigan mirando hacia arriba!

### Referencias

[1] Universe Today magazine, November 30, 2022 by Laurence Tognetti. *Do Exoplanet Scientists Have Favorite Exoplanets?* URL: <https://www.universetoday.com/158920/do-exoplanet-scientists-have-favorite-exoplanets/>

Artículo editado y traducido por Juan F. González.

## 14.JWST y la atmósfera de WASP 39-b

[Editar](#)

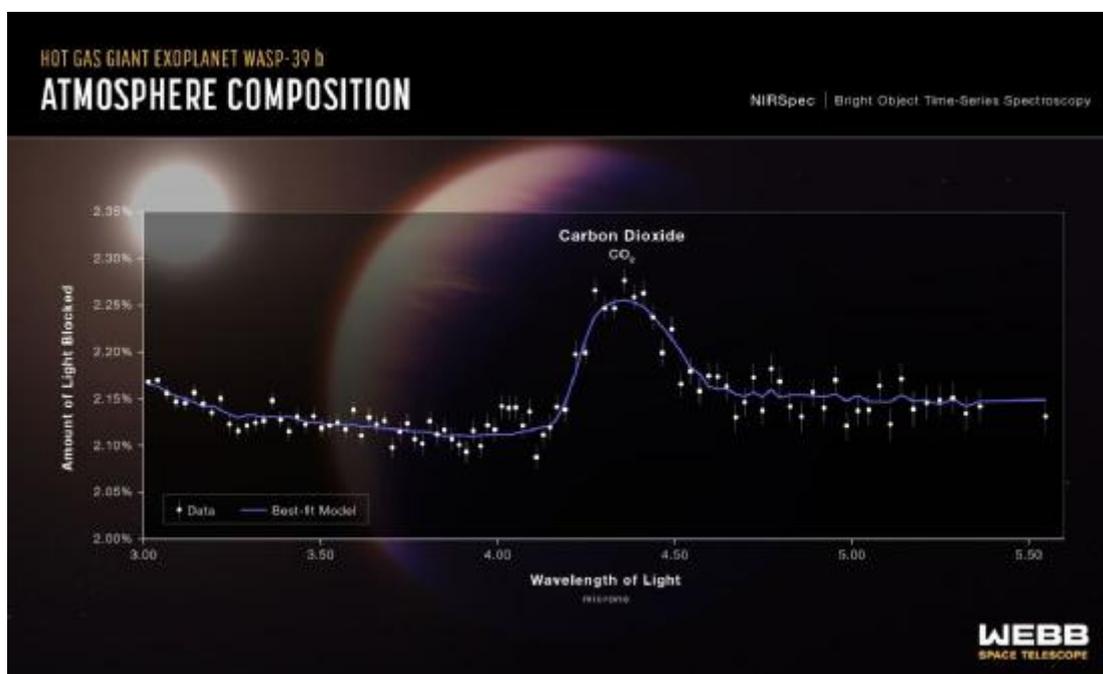
## JWST detecta signos de química activa y nubes en la atmósfera del exoplaneta WASP-39 b

Los datos del telescopio JWST de la NASA siguen ofreciendo descubrimientos sorprendentes. En julio, observó el exoplaneta WASP-39 b y encontró huellas dactilares de átomos y moléculas y reacciones químicas activas en sus nubes. Ahora, un equipo de científicos amplía ese descubrimiento con un análisis mucho más profundo de los datos. Según la Dra. Natalie Batalha, de la Universidad de California-Santa Cruz, los datos del JWST cambian las reglas del juego. “Observamos el exoplaneta con múltiples instrumentos que, juntos, brindan una amplia franja del espectro infrarrojo y una panoplia de huellas dactilares químicas inaccesibles hasta [esta misión]”, dijo. Las observaciones de julio fueron bastante emocionantes. El espectrógrafo de infrarrojo cercano (NIRSpec) de JWST registró la primera evidencia inequívoca de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en la atmósfera de un exoplaneta. También hizo la primera detección en la atmósfera de un exoplaneta de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ , que es un componente del smog aquí en la Tierra). El  $\text{SO}_2$  es producido por reacciones químicas provocadas por la luz de alta energía de la estrella del planeta. En la Tierra, la capa protectora de ozono en la atmósfera superior se crea de manera similar.

El siguiente paso fue hacer un análisis coordinado de todos los datos de NIRSpec. Los resultados publicados esta semana brindan una comprensión mucho más clara y rica de la espesa atmósfera del planeta.

### Cómo obtuvo JWST los datos de WASP-39 b

WASP-39b no es exactamente un planeta similar a la Tierra. En cambio, es un mundo gigante gaseoso con una masa similar a la de Saturno. Se encuentra más cerca (0,0486 AU) de su estrella tipo G que Mercurio de nuestro Sol, y orbita una vez cada cuatro días terrestres. El planeta resulta ser un mundo bastante hinchado, en gran parte porque hace calor (alrededor de 871 C o 1600 F). Sabemos la mayor parte de esto por observaciones anteriores realizadas por los telescopios espaciales Hubble y Kepler.



**Figura 1.** Un espectro de transmisión del exoplaneta gigante de gas caliente WASP-39 b capturado por el espectrógrafo de infrarrojo cercano de Webb (NIRSpec) el 10 de julio de 2022, revela la primera evidencia clara de dióxido de carbono en un planeta fuera del sistema solar. Este es también el primer espectro detallado de transmisión de exoplanetas jamás capturado que cubre longitudes de onda entre 3 y 5,5 micrones.

JWST rastreó el planeta cuando pasó frente a su estrella. La luz de las estrellas se filtró a través de la atmósfera y diferentes gases absorbieron diferentes colores del espectro de luz de las estrellas. Así es como NIRSpec detectó agua, dióxido de azufre, monóxido de carbono, sodio y potasio en WASP-39 b. También proporcionó datos sobre el CO<sub>2</sub> a una resolución muy alta. Finalmente, el instrumento reveló química activa en las nubes, que parecen estar rotas y dispersas, en lugar de cubrir el planeta con una capa monolítica.

### **Lo que nos dice la atmósfera**

Ahora que los astrónomos tienen un buen inventario de elementos químicos en WASP-39 b, también ven cuán abundante es cada químico en su atmósfera. Esa es información valiosa. Entre otras cosas, da pistas sobre las condiciones en el disco donde se formó el planeta, su estrella y cualquier otro planeta. De hecho, los gases en la atmósfera de WASP-39 b brindan pistas sobre una historia de fusiones y fusiones.

"La abundancia de azufre [en relación con] el hidrógeno indicó que el planeta presumiblemente experimentó una acumulación significativa de planetesimales que pueden entregar [estos ingredientes] a la atmósfera", dijo Kazumasa Ohno, investigadora de exoplanetas de UC Santa Cruz que trabajó en las mediciones de NIRSpec. "Los datos también indican que el oxígeno es mucho más abundante que el carbono en la atmósfera. Esto indica potencialmente que WASP-39 b se formó originalmente lejos de la estrella central".

### **Los resultados de WASP-39b llegan a los medios de comunicación**

El estudio de la química atmosférica que realizó JWST es el tema de cinco artículos científicos en revisión y publicación. Contienen algunas revelaciones bastante asombrosas. "Esta es la primera vez que vemos evidencia concreta de fotoquímica (reacciones químicas iniciadas por luz estelar energética) en exoplanetas", dijo Shang-Min Tsai, investigador de la Universidad de Oxford en el Reino Unido y autor principal de uno de los próximos estudios. documentos. "Veo esto como una perspectiva realmente prometedora para avanzar en nuestra comprensión de las atmósferas de los exoplanetas con [esta misión]".

La precisión con la que NIRSpec pudo detectar tantas firmas atmosféricas es un buen augurio para futuros estudios de exoplanetas. Esto es particularmente cierto cuando los astrónomos buscan planetas donde podría existir vida. Sus atmósferas contendrán pistas químicas que apuntan a esa vida. "Podremos ver el panorama general de las atmósferas de los exoplanetas", dijo Laura Flagg, investigadora de la Universidad de Cornell y miembro del equipo internacional. "Es increíblemente emocionante saber que todo va a ser reescrito. Esa es una de las mejores partes de ser científico".



**Figura 2.** Esta es una ilustración (impresión artística) que muestra cómo podría verse el exoplaneta WASP-39 b, según la comprensión actual del planeta. Cortesía NASA/JWST.

## Referencias

[1] *JWST Detects Signs of Active Chemistry and Clouds in the Atmosphere of Exoplanet WASP-39 b*, Universe Today por Carolyn Collins Petersen. 23 de Noviembre de 2022. URL: <https://www.universetoday.com/158761/jwst-detects-signs-of-active-chemistry-and-clouds-in-the-atmosphere-of-exoplanet-wasp-39-b/>

[2] Datos del JWST sobre WASP 39-b, en la URL: <https://webbtelescope.org/contents/news-releases/2022/news-2022-060>

Artículo editado y traducido por Juan F. González

## 15. ¿Existen las leyes de la Física?

[Editar](#)

¿Existen las leyes de la Física?

Lo que llamamos leyes de la física a menudo son solo descripciones matemáticas de alguna parte de la naturaleza. Las leyes físicas definitivas probablemente no existen y la física es mucho mejor por ello, dice el físico teórico Sankar Das Sarma.

Hace poco estaba leyendo un artículo antiguo del teórico de cuerdas Robbert Dijkgraaf en la revista Quanta titulado "No hay leyes de la física". Puede que le parezca un poco extraño que un físico argumente que no existen leyes de la física, pero estoy de acuerdo con él. De hecho, no solo estoy de acuerdo con él, creo que mi campo es mucho mejor por eso. Y espero convencerte de esto también. Lo primero es lo primero. Lo que a menudo llamamos leyes de la física son en realidad

solo teorías matemáticas consistentes que parecen coincidir con algunas partes de la naturaleza. Esto es tan cierto para las leyes del movimiento de Newton como para las teorías de la relatividad de Einstein, las ecuaciones de Schrödinger y Dirac en física cuántica o incluso la teoría de cuerdas. Entonces, estas no son realmente leyes como tales, sino formas precisas y consistentes de describir la realidad que vemos. Esto debería ser obvio por el hecho de que estas leyes no son estáticas; evolucionan a medida que mejora nuestro conocimiento empírico del universo.

**Aquí está la cosa. A pesar de que muchos científicos ven su papel como el descubrimiento de estas leyes fundamentales, simplemente no creo que existan.**

Hace cien años, una opinión como esta no habría sido controvertida. Antes de eso, la mayoría de las llamadas leyes de la física estaban directamente conectadas con aspectos concretos del mundo natural, como la ley de Hooke que describe cuánta fuerza se necesita para estirar un resorte o la ley de Boyle sobre la relación entre la presión, la temperatura y el volumen de un gas. Pero esto comenzó a cambiar a principios del siglo XX cuando personas como Albert Einstein emprendieron la búsqueda para encontrar la teoría definitiva de todo. Pasó los últimos 30 años de su vida buscando uno sin éxito. Dirac también creía en este punto de vista, habiendo dicho aparentemente que toda la química puede derivarse solo de su ecuación, aunque creo que ese comentario en particular es probablemente apócrifo.

Hay alrededor de 86 mil millones de neuronas en el cerebro humano. Esto es menos que la cantidad de estrellas en la Vía Láctea, que es solo una parte minúscula del universo conocido. El universo parece casi infinito en comparación con la capacidad finita del cerebro humano, lo que nos deja quizás pocas posibilidades de descifrar las leyes fundamentales. Lo sorprendente es que podemos dar sentido a algunos aspectos del universo a través de las leyes de la física. Pudo haber sido Richard Feynman quien dijo por primera vez que el problema no es cuán inteligentes somos los humanos para descubrir cómo funciona la naturaleza, ¡sino cuán inteligente es la naturaleza para seguir nuestras leyes!

A medida que descubrimos más sobre la naturaleza, podemos perfeccionar nuestras descripciones de ella, pero es interminable, como pelar una cebolla infinita, cuanto más pelamos, más hay para pelar.

Tomemos como ejemplo la teoría de cuerdas. Es una teoría matemáticamente muy estricta y bastante mágica en la forma en que trata la gravedad y la mecánica cuántica de manera equivalente, coincidiendo con muchas de nuestras observaciones del universo. Es muy prometedor, pero hasta ahora ha tenido problemas para proporcionar predicciones concretas comprobables más allá de nuestra comprensión actual.

También tiene un escollo bastante espinoso conocido como el problema del paisaje, donde literalmente millones de universos (alrededor de  $10^{500}$ , el número es tan grande que parece obscuro) son soluciones aceptables de la teoría. Si la teoría de cuerdas es correcta, uno puede declarar la victoria, ya que uno de esos trillones de universos debe ser nuestro universo, y todo lo que uno necesita hacer es encontrar de alguna manera esa solución particular para descubrir cuáles son las leyes de la física para nosotros. Por supuesto, esta es una tarea imposible debido a la cantidad excepcionalmente grande de universos posibles que existen en el paisaje, y todos con sus propias leyes distintas.

Este escenario a menudo se llama el multiverso. Todas las leyes posibles, concebibles e inconcebibles, están permitidas en algún universo posible, y las leyes de la física ya no son significativas o únicas desde un sentido fundamental, ya que dependen completamente de dónde se mire en el paisaje del multiverso. Es irónico que la teoría del todo resulte implicar un todo que es exponencialmente más grande que cualquier todo que cualquiera pudiera haber imaginado antes.

Una posible conclusión de esto es que el enfoque reduccionista convencional de la física de partículas, donde las leyes naturales se enfocan cada vez más en bloques de construcción cada vez más pequeños (como moléculas, átomos y partículas) y fuerzas fundamentales (como la gravedad y el electromagnetismo) que actúan entre ellos, no es de ser una forma fructífera de ver el mundo físico. No hay bloques de construcción fundamentales ni fuerzas fundamentales y, como tal, no hay leyes porque pensar rigurosamente en las leyes reduccionistas últimas ha llevado a la posible existencia de  $10^{500}$  universos, con solo uno de ellos quizás obedeciendo las leyes necesarias para acomodar al *Homo sapiens sapiens*.

Lo único que nos queda es el paisaje, donde las “leyes” dependen del universo específico con el que se está tratando. Esto es tan alucinantemente complejo que toda la idea de las leyes naturales debe modificarse. Es un final aparentemente extraño para un viaje valioso que comenzó con los átomos como hipotéticos constituyentes indivisibles de la materia hace 2500 años y fue testigo de un gran triunfo reciente con el descubrimiento experimental de la partícula de Higgs en 2012. Al final, nuestras leyes físicas no son intrínsecas en todo, dependiendo completamente de en qué parte del paisaje nos encontremos.

Como físico teórico de la materia condensada, no encuentro este escenario desalentador en absoluto, sino todo lo contrario. El hecho de que haya un número esencialmente infinito de leyes posibles solo hace que hacer ciencia sea más emocionante porque explorar el paisaje seguirá siendo una actividad activa y creativa para siempre. La física teórica nunca puede terminar porque el paisaje es simplemente demasiado vasto.

Sé por mis 40 años de experiencia trabajando en fenómenos físicos de la vida real que toda la idea de una ley última basada en una ecuación usando solo los bloques de construcción y las fuerzas fundamentales es inviable y esencialmente una fantasía. Nunca sabemos con precisión qué ecuación describe una situación particular de laboratorio. En cambio, siempre tenemos que construir modelos y aproximaciones para describir cada fenómeno, incluso cuando sabemos que la ecuación que lo controla es, en última instancia, alguna forma de la ecuación de Schrödinger.

"¿Qué pasa con la mecánica cuántica?" podrías preguntar. Ha tenido un gran éxito durante casi 100 años al igualar todos nuestros experimentos a escala cuántica. Pero la mecánica cuántica en realidad es más como un conjunto de reglas que usamos para expresar nuestras leyes en lugar de ser una ley última en sí misma. Por ejemplo, el modelo estándar de la física de partículas, la teoría de la superconductividad y la teoría de los espectros atómicos se construyen utilizando las reglas de la mecánica cuántica, pero tienen poco que ver entre sí. Además, el espacio y el tiempo son variables que hay que introducir a mano en la teoría, cuando el espacio y el tiempo deberían salir de forma natural de cualquier ley última de la física. Este sigue siendo quizás el mayor misterio de la física fundamental sin solución a la vista.

Es difícil imaginar que dentro de mil años los físicos seguirán utilizando la mecánica cuántica como la descripción fundamental de la naturaleza. Algo más debería reemplazar a la mecánica cuántica en ese momento, al igual que la mecánica cuántica misma reemplazó a la mecánica newtoniana. No tengo idea de qué podría ser ese algo más, pero no veo ninguna razón en particular por la que nuestra descripción de cómo parece funcionar el universo físico deba alcanzar el pináculo repentinamente a principios del siglo XXI y quedar estancada para siempre en la mecánica cuántica. ¡Ese sería un pensamiento verdaderamente deprimente!

Las leyes de Newton tuvieron un éxito extraordinario durante 300 años, pero tuvimos que ir más allá de ellas a medida que aprendimos más sobre el universo, y lo mismo debería suceder con las leyes cuánticas algún día en el futuro.

Cualquier nueva teoría desconocida del futuro debe basarse en la física de la mecánica cuántica e incorporarla, al igual que la mecánica cuántica se basó en la mecánica clásica y la incorporó. Nuestra comprensión del mundo físico debe continuar indefinidamente, sin impedimentos por la búsqueda de leyes últimas. Las leyes de la física evolucionan continuamente, nunca serán definitivas.

Sankar Das Sarma es un físico teórico de la Universidad de Maryland, College Park. Sus intereses son diversos, desde las extrañas propiedades de la materia hasta cómo debe entenderse la información en el ámbito cuántico.

## Referencias

[1] *Why the laws of physics don't actually exist*, New Scientist, por Sankar Das Sarma. URL: <https://www.newscientist.com/article/2349359-why-the-laws-of-physics-dont-actually-exist>

Artículo editado y traducido por Juan F. González

## 16. Nuevo método de producción de agujeros negros primordiales

[Editar](#)

### **Una nueva forma de producir agujeros negros primordiales en el universo primitivo.**

Los agujeros negros primordiales siguen siendo una opción intrigante para explicar potencialmente la materia oscura. Los agujeros negros primordiales son los agujeros negros que se produjeron en la fase post-inflacionaria del Universo, sin que se formaran por el colapso de ninguna estrella. Un nuevo estudio ha encontrado un escenario plausible para crearlos en el universo primitivo. Los astrónomos no comprenden aproximadamente el 80% de la masa de cada galaxia. La porción desconocida se conoce como materia oscura, y los astrónomos suelen suponer que es una forma de materia que no interactúa con la luz. Una opción para la materia oscura es que esté formada por agujeros negros, que como su nombre indica no emiten radiación. Sin embargo, estos agujeros negros no pueden formarse a través de la muerte de estrellas. Primero, no ha habido suficientes generaciones de estrellas en la edad del universo para producir suficientes agujeros negros. Y

segundo, incluso si el universo fuera más antiguo, simplemente no hay suficiente materia prima para hacer suficientes estrellas en primer lugar. Entonces, este tipo de formación de agujeros negros no puede explicar toda la materia oscura. En cambio, si queremos que la materia oscura esté formada por agujeros negros, esos agujeros negros tienen que ser primordiales. Eso significa que no están hechos de la muerte de estrellas masivas, sino de algún proceso exótico en el universo primitivo.

Sin embargo, una gran cantidad de observaciones cosmológicas han descartado la mayoría de los rangos de masas para estos agujeros negros primordiales, dejando atrás solo una ventana relativamente estrecha. Entonces, el desafío para los teóricos es encontrar un mecanismo plausible para generar agujeros negros primordiales en cantidades suficientes con las masas que se ajustan a las observaciones. En el Modelo Estándar de física de partículas no existe ningún mecanismo para crear agujeros negros en el universo primitivo. Pero sabemos que el modelo estándar está incompleto y que la nueva física está a la vuelta de la esquina. Un nuevo estudio ha examinado las extensiones del Modelo Estándar y ha encontrado una nueva forma de crear agujeros negros. La mayoría de los escenarios para crear agujeros negros primordiales se basan en lo que se llama una transición de fase de primer orden. En este caso, en el increíblemente primitivo universo, la naturaleza fundamental de los campos cuánticos que empapan todo el espacio-tiempo cambia su carácter de forma violenta y rápida. Esta transición comenzó con muchos puntos de nucleación que se expandieron en burbujas.

Es fácil formar agujeros negros primordiales en ese escenario porque es muy caótico y violento. Pero el nuevo estudio ha encontrado que incluso las transiciones suaves aún pueden conducir a la formación de agujeros negros. La clave es que algunos de los campos cuánticos permanecen fuertemente acoplados. A medida que avanzan lentamente, sus interacciones pueden aumentar, lo que lleva a bolsas de densidad de energía extremadamente alta. Estos colapsan en agujeros negros que luego inundan el universo. Si bien es intrigante, todavía hay mucho trabajo por hacer. Los físicos tendrán que desarrollar los detalles de esta teoría para ver si es físicamente plausible. Y los astrónomos tendrán que encontrar formas de observar directamente estas poblaciones de agujeros negros primordiales. Hasta entonces, el misterio de la materia oscura sigue abierto.

## Referencias

[1] A New Way to Produce Primordial Black Holes in the Early Universe, Posted on December 10, 2022 by Paul M. Sutter. Universe Today magazine, revista online. URL: <https://www.universetoday.com/158890/a-new-way-to-produce-primordial-black-holes-in-the-early-universe/>

[2] Primordial Black Hole Formation during a Strongly Coupled Crossover, Albert Escrivà and Javier G. Subils. ArXiv: <https://arxiv.org/pdf/2211.15674.pdf>

Artículo traducido y editado por Juan F. González

# 17.Si la materia oscura son axiones, ésta es una (buena) forma de encontrarlos

[Editar](#)

**Publicado el 9 de diciembre de 2022 por Andy Tomaswick**  
**Si la materia oscura está hecha de axiones, este podría ser el detector que los encuentre**

Como hemos señalado en muchos otros artículos, la ciencia también avanza por limitaciones. Comprender los límites de un fenómeno físico ayuda a desarrollar mejores métodos para buscarlo, especialmente en su ausencia. La materia oscura es un arquetipo de un fenómeno perdido, pero hay muchas explicaciones potenciales para ello. Uno de ellos se conoce como axión, que se desarrolló originalmente como una partícula hipotética que podría tapar un agujero en el modelo estándar de la física de partículas, pero que también podría resolver el problema de la energía oscura. Eso es si realmente existen. Ahora, un nuevo experimento de investigadores del CERN puede ayudar a la comunidad científica a definir mejor dónde buscar esos axiones.

Parte del problema con la búsqueda de axiones es cuán variadas podrían ser potencialmente sus propiedades. Tanto su fuerza de interacción con otras partículas como su masa, dos de las partes más fundamentales de cualquier partícula en el modelo estándar, están sujetas a debate en este momento. Y para cubrir tantas posibilidades, los físicos deben buscarlas por todas partes.

Sin embargo, generalmente están de acuerdo en una de las formas de hacerlo: los axiones pueden convertirse en fotones si están sujetos a un campo magnético lo suficientemente fuerte. Y los fotones pueden ser detectados. Como tal, la mayoría de los detectores de axiones consisten en potentes imanes y fotodetectores, y uno de los más capaces es el experimento CERN Axion Solar Telescope (CAST).

**Vídeo 1.** Video de UT sobre la más esquiva de todas las sustancias: la materia oscura. Créditos: Fraser Cain.

CAST es básicamente un tubo de metal gigante con un imán muy fuerte conocido como helioscopio y varios tipos de detectores de luz en su interior. Inicialmente fue diseñado para observar los axiones que podrían provenir de nuestro propio Sol. Hasta ahora, no ha podido encontrar ninguno, pero los científicos que trabajan en el experimento idearon una ligera modificación que les permitió observar aún más datos.

Sus modificaciones dieron como resultado que el imán fuera capaz de detectar axiones que se habrían desarrollado en el halo de materia oscura que rodea la Vía Láctea. Esta es otra posible fuente de axiones, pero que otros experimentos aún no habían explorado. El siguiente experimento, denominado haloscopio de axión, o CAST-CAPP, comenzó a recopilar datos en septiembre de 2019.

**Vídeo 2.** Otro video de UT sobre cómo lo estamos buscando. Créditos: Fraser Cain.

Dado que no está claro en qué frecuencia se convertirían los axiones de fotones con las intensidades de campo magnético proporcionadas por CAST-CAPP, el equipo científico tuvo que monitorear una amplia gama de posibles frecuencias, lo que llevó casi dos años completos. El equipo también tuvo que eliminar la posible contaminación por ruido, como la de las señales inalámbricas de 5 GHz.

Desafortunadamente, incluso después de eso, todavía no había señales de axiones. Pero, como se indicó al comienzo del artículo, incluso la falta de evidencia de algo puede ayudar a que la ciencia avance. Los investigadores ahora pueden reducir definitivamente la fuerza potencial máxima de la interacción de un axión con los fotones y adaptar sus experimentos en consecuencia. CAST, en todas sus diversas formas, aún no ha terminado con su misión.

## Referencias

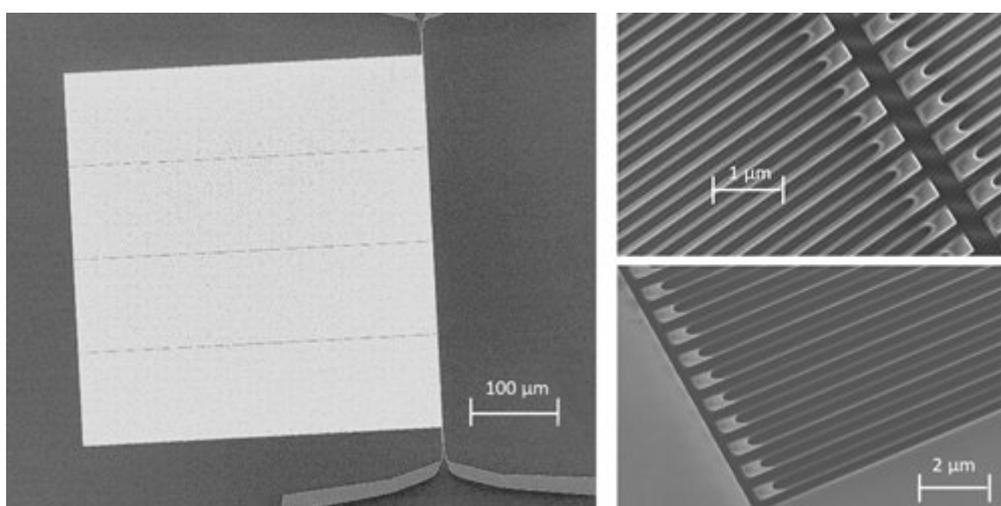
[1] *If Dark Matter is Made of Axions, This Could be the Detector That Finds Them*. Posted on December 9, 2022 by Andy Tomaswick. Revista online Universe Today, <https://www.universetoday.com/159115/if-dark-matter-is-made-of-axions-this-could-be-the-detector-that-finds-them/>

Artículo traducido y editado por Juan F. González.

# 18. Buscando materia oscura con cables superconductores

[Editar](#)

**La materia oscura se reduce al cable**  
9 de diciembre de 2022.



**Figura 1.** Y. Hochberg et al. [1].

Un detector de nanocables superconductores establece nuevos límites sobre cómo una hipotética partícula ligera de materia oscura interactúa con los electrones.

La búsqueda de partículas ligeras de materia oscura requiere detectores con umbrales de señal mucho más bajos que los experimentos tradicionales. Este requisito ha dado lugar a nuevas técnicas de detección, incluido el sondeo de las interacciones débiles que se producen entre las partículas de menos de MeV y los electrones. En un experimento de 180 horas de duración, Yonit Hochberg de la Universidad Hebrea de Jerusalén y sus colegas demostraron un dispositivo que distingue la hipotética materia oscura sub-MeV del ruido de fondo con una sensibilidad récord [1]. Su experimento impone las restricciones más fuertes hasta el momento en las interacciones entre la materia oscura ligera y la materia regular.

Hochberg y sus colegas grabaron una matriz de nanocables en una película de siliciuro de tungsteno (WSi) de 7 nm de espesor para producir un detector de fotones simples de nanocables superconductores, un sensor que es sensible a entradas de energía extremadamente pequeñas. Cuando la energía por encima de cierto umbral se deposita en un nanocable superconductor, el cable se convierte brevemente en un conductor regular, lo que da como resultado un pulso de voltaje.

El equipo hizo circular una corriente fija a través de su dispositivo y lo selló en una caja hermética a la luz durante 180 horas. Contaron cuatro pulsos de voltaje, cada uno correspondiente a una energía depositada de al menos 0,73 eV. En ausencia de cualquier otra fuente de energía detectable, estos conteos oscuros podrían atribuirse a muones generados por rayos cósmicos o partículas de alta energía excitadas por la descomposición radiactiva.

Para distinguir tales fuentes de fondo de las interacciones entre la materia oscura y los electrones por debajo de MeV, los investigadores utilizaron un enfoque que relaciona la tasa de interacción de la materia oscura con las propiedades dieléctricas del dispositivo. Específicamente, cuando la materia oscura deposita energía, los electrones en el material deben reorganizarse de una manera particular, lo que afecta el campo electromagnético del cable. Los cálculos del equipo proporcionan límites superiores en la dispersión de electrones y las tasas de absorción con partículas sub-MeV y sub-eV. Los investigadores dicen que estas restricciones mejoran los límites anteriores en varios órdenes de magnitud.

–Rachel Berkowitz.

Rachel Berkowitz es editora y corresponsal de Physics Magazine con sede en Vancouver, Canadá.

## Referencias

[1] Y. Hochberg et al., “New constraints on dark matter from superconducting nanowires,” [Phys. Rev. D 106, 112005 \(2022\)](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.106.112005).

Online: <https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.106.112005> . ArXiv: <https://arxiv.org/abs/2110.01586>

[2] *Dark Matter Goes Down to the Wire*. December 9, 2022 • Physics 15, s169APS news. URL: <https://physics.aps.org/articles/v15/s169>

Artículo editado y traducido por Juan F. González

## 19. La NASA prepara las velas de su "Solar Cruiser" (Crucero Solar)

[Editar](#)



**Figura 1.** Concepto artístico de la misión Solar Cruiser. Crédito: NASA. Artist's concept of the Solar Cruiser mission. Credit: NASA.

### La NASA prueba un segmento de vela solar de su enorme misión de crucero solar

Un equipo dirigido por el Marshall Space Flight Center (MSFC) de la NASA fue seleccionado recientemente para desarrollar una nave espacial de vela solar que se lanzaría en algún momento de 2025. Conocida como el crucero solar, esta misión de oportunidad mide 1653 m<sup>2</sup> (~17790 pies<sup>2</sup>) de área y es del mismo grosor que un cabello humano. Patrocinado por la División de Heliofísica de la Dirección de Misiones Científicas (SMD), este demostrador de tecnología integrará varias tecnologías nuevas de velas solares desarrolladas por varias organizaciones para madurar la tecnología de velas solares para futuras misiones.

En un video reciente publicado por la NASA, vemos a ingenieros y socios de la industria en el MSFC en Huntsville, Alabama, desplegando un segmento del prototipo de vela solar. El video, tomado el 13 de octubre, muestra cómo los equipos utilizaron dos botavaras compuestas livianas de 30,5 m (100 pies) para desplegar un cuadrante de 400 m<sup>2</sup> (4300 pies<sup>2</sup>) del prototipo de vela solar por primera vez. Una vez realizado, el demostrador Solar Cruiser validará tecnologías que

permitirán que futuras misiones estudien el Sol, su interacción con la Tierra y su atmósfera extendida (también conocida como heliosfera).

### **Vídeo 1.** NASA e ingenieros desplegando prototipo de vela solar.

El equipo de Solar Cruiser incluye socios de la industria como el desarrollador de naves espaciales y carga útil Ball Aerospace, el fabricante de sistemas críticos Rocco, LLC y el subcontratista NeXolve, que se especializa en producir estructuras y materiales delgados y livianos (como películas para velas solares). Junto con NASA Marshall, están aprovechando los avances en la tecnología de velas solares de la última década, incluidos elementos de misiones anteriores. Éstos incluyen:

- Misión NanoSail-D de la NASA.
- La misión Interplanetary Kite-craft de JAXA acelerada por la radiación del sol (IKAROS).
- Las misiones LightSail de la Sociedad Planetaria.
- Misión de exploración de asteroides cercanos a la Tierra (NEA) de la NASA.

El video presenta a los científicos de la NASA Les Johnson, el investigador principal de la misión NEO Scout, que se lanzó con Artemis I (una de las diez cargas útiles secundarias). Según explicó, el propósito de este despliegue era probar cómo se desplegaría la vela una vez que estuviera en el espacio:

“La prueba de despliegue de la vela que acabamos de completar aquí en NASA Marshall fue realmente una prueba de [la] funcionalidad de la vela. ¿Podrías enrollar estas botavaras de sesenta metros de largo, ponerlas en un desplegador, sujetarlas a una vela que tiene un área de más de cuatro mil pies cuadrados cuando está completamente doblada y enrollada, ponerlas en una caja pequeña y sacarlas? desplegar sin ayuda? Y la respuesta es sí. Tuvimos una prueba muy exitosa y los resultados son evidentes en las fotografías que se tomaron y los datos que recopilamos durante la prueba”.

Las velas solares se basan en un material liviano altamente reflectante y una presión continua de fotones de los rayos del sol (viento solar) para generar empuje. Esto elimina la necesidad de propulsor que constituye la mayor parte de la masa previa al vuelo de una misión o los pesados sistemas de propulsión eléctrica que alimentan los propulsores de efecto Hall (motores de iones). Además de aumentar la masa de una misión, también limitan su vida útil y los lugares de observación. Este es el propósito del Solar Cruiser, que demostrará la capacidad de una vela solar para realizar observaciones desde una posición orientada hacia el sol en L1.

00:00

03:38

### **Vídeo 2.** Despliegue de vela solar en el laboratorio.

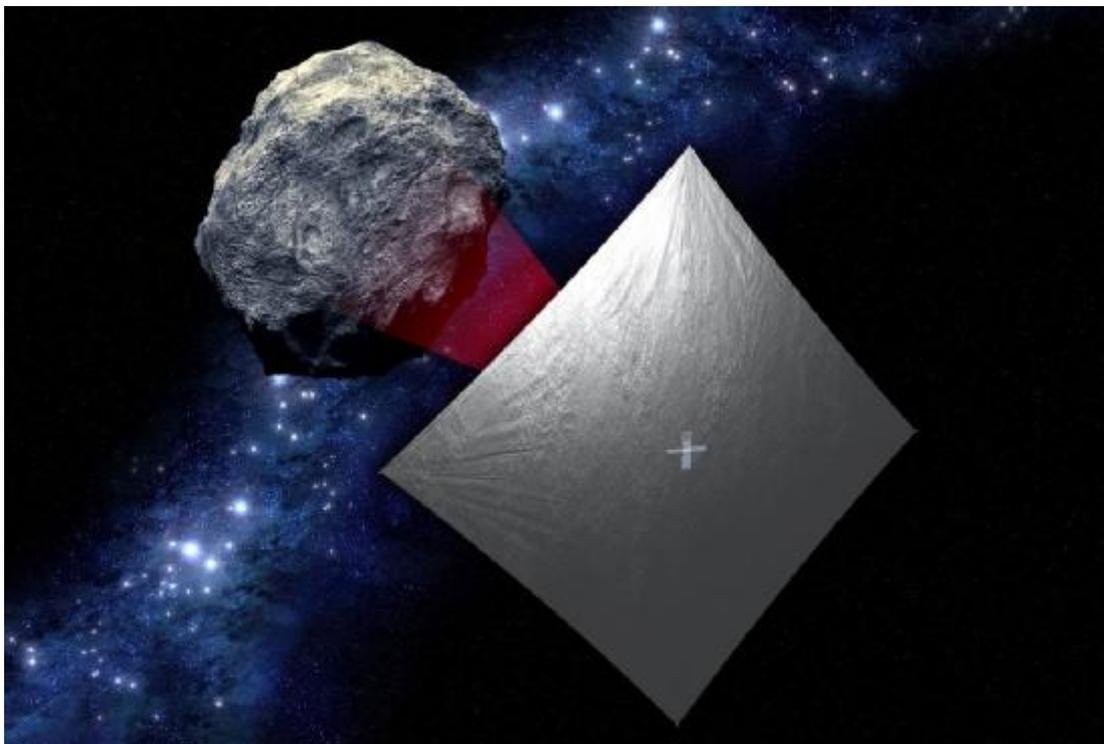
El diseño también incluye cuatro brazos ligeros de 29,5 m (~97 pies), similares a los brazos triangulares, enrollables y comprimibles (TRAC™) metálicos utilizados por la misión NEA Scout.

Diseñados por la Fuerza Aérea de los EE. UU. y con licencia de Rocco, LLC, estos brazos son similares a los utilizados por el telescopio espacial James Webb (JWST) para desplegar su protector solar. Por el bien del Solar Cruiser, Rocco desarrolló brazos TRAC utilizando materiales compuestos más livianos a través del programa Small Business Innovation Research (SBIR) de la NASA.

La vela también tiene dispositivos de control reflectante (RCD) integrados que proporcionan control de actitud sin propulsor y ayudan a mantener la vela estable. La membrana de la vela consiste en una poliimida de película delgada volada con éxito en NanoSail-D recubierta con aluminio para que sea reflectante. Se seleccionó este material debido a sus propiedades probadas en vuelo y a que es escalable a velas de cualquier tamaño, desde la vela de 10 m<sup>2</sup> (~33 ft<sup>2</sup>=33pies<sup>2</sup>) en NanoSail-D hasta velas de más de 10 000 m<sup>2</sup> (~32 800 pies<sup>2</sup>). Esto es consistente con uno de los principales objetivos del Solar Cruiser, que es la capacidad de construir velas de tamaño creciente.

“La clave para permitir algunas de estas misiones es tener velas cada vez más grandes que sean muy livianas”, dijo. “Y es por eso que estamos pasando de velas del tamaño de NEA Scout, novecientos veinticinco pies cuadrados, a diecisiete mil ochocientos pies cuadrados. Y en el futuro, fabricaremos velas aún más grandes. Y cuanto más grande es la vela, en términos generales, mejor tiene la capacidad de propulsión y mayor empuje”.

El estudio de la heliofísica es vital para la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) y el Departamento de Defensa. Estas organizaciones gubernamentales son responsables de emitir alertas y pronósticos del clima espacial y monitorear cosas como las erupciones solares que causan interferencia con las comunicaciones o los satélites. El Solar Cruiser también demostrará la capacidad de realizar mediciones in situ sostenidas de la cola magnética de la Tierra, la interacción entre la magnetosfera de la Tierra y el viento solar.



**Figura 2.** Ilustración artística de NEA Scout visitando un asteroide cercano a la Tierra (NEA).  
Crédito: NASA

El monitoreo de la actividad solar y el clima espacial también es de interés para los programas de exploración humana de la NASA. Antes de que termine esta década, el Programa Artemis enviará astronautas a la Luna por primera vez en más de cincuenta años. El objetivo a largo plazo de Artemis es crear un “programa sostenido de exploración lunar” que incluirá la creación de infraestructura y estancias de larga duración en la superficie lunar. Para la década de 2030, la NASA planea enviar misiones tripuladas a Marte que consistirán en operaciones científicas y de tránsito de seis a nueve meses en la superficie marciana.

Saber cómo predecir eventos solares garantizará la salud y seguridad de los astronautas y que sus equipos permanezcan operativos. Solo otro emocionante campo de estudio que la NASA y otras agencias espaciales seguirán en los próximos años. Y es justo decir que estos esfuerzos permitirán que nuevas misiones amplíen nuestra comprensión del Sistema Solar y el Universo.

### Referencias

[1] *NASA Tests a Solar Sail Segment of its Enormous Solar Cruiser Mission*. Posted on December 9, 2022 by Matt Williams. Universe Today magazine. URL: <https://www.universetoday.com/159083/nasa-tests-a-solar-sail-segment-of-its-enormous-solar-cruiser-mission/>

[2] *Solar Cruiser: Enabling new vistas for Heliophysics Science*. Programa del Crucero Solar de la NASA. URL: <https://science.nasa.gov/heliophysics/programs/solar-cruiser>

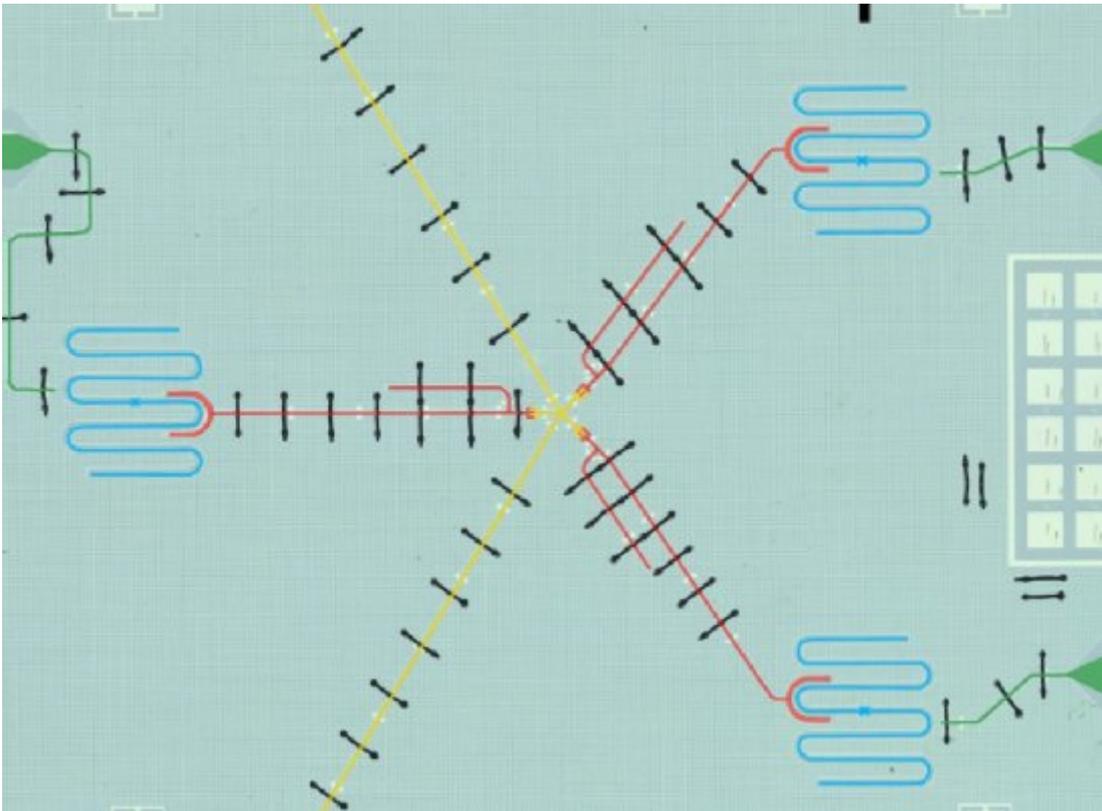
Artículo editado y traducido por Juan F. González.

## **20.Unimon: el nuevo qubit que no es un pokemon o digimon.**

[Editar](#)

**Te presento a Unimon, el nuevo Qubit en el bloque**

8 de diciembre de 2022.



**Figura 1.** Una imagen de microscopio muestra un chip de silicio que contiene tres qubits unimon (azul). Las "líneas de transmisión" (verde) proporcionan vías para que los pulsos de microondas cambien el estado de cualquier unimon y así lleven a cabo los pasos lógicos. Los resonadores (rojos) permiten leer los estados de los qubits.

En las pruebas iniciales, una versión simplificada de un popular qubit superconductor logra altas precisiones de cálculo, lo que lo hace atractivo para futuras computadoras cuánticas.

Los físicos que desarrollan computadoras cuánticas recurren cada vez más a un elemento superconductor llamado transmon para almacenar información cuántica y protegerla del ruido. Ahora, los investigadores han demostrado un elemento de circuito relacionado, el unimon, que dicen que es menos propenso a sufrir interrupciones por el ruido [1]. Con un mayor desarrollo, el equipo detrás del unimon cree que podría usarse para construir sistemas de computación cuántica con mayor precisión informática que los que usan transmons.

Un desafío clave en la fabricación de una computadora cuántica es proteger los elementos informáticos sensibles del ruido ambiental, que puede causar errores en los cálculos. El transmon más preciso, un qubit superconductor popular, logra hoy en día precisiones de entre 99,98 y 99,99 % para un solo paso de computación (un transmon que realiza una operación lógica). Aunque esta precisión parece impresionante, un dispositivo hipotético que contenga 100 transmones y ejecute cálculos con diez pasos de cómputo solo tendría un 50 % de posibilidades de arrojar un resultado correcto, dice Mikko Möttönen de la Universidad de Aalto, Finlandia, e IQM Quantum Computers, la compañía detrás del unimon. Es probable que las futuras computadoras cuánticas contengan muchos más qubits y sus cálculos muchos más pasos, por lo que funcionarán mucho peor.

Algunos métodos de computación cuántica pueden corregir parcialmente tales errores. Aun así, los investigadores coinciden en la necesidad de aumentar la precisión de los cálculos de un solo paso mucho más allá del 99,99 %. Para hacerlo, Möttönen y sus colegas diseñaron lo que dicen es un qubit "sorprendentemente simple", al que llaman el unimon.

Los transmons se construyen a partir de circuitos superconductores y elementos clave llamados uniones Josephson, con condensadores y otros elementos también incluidos para reducir la sensibilidad al ruido. Como cualquier elemento qubit, un transmon puede adoptar múltiples estados cuánticos diferentes. Los investigadores generalmente usan los dos estados más bajos para almacenar información cuántica. Luego cambian los transmones de un estado a otro utilizando un pulso de fotones de microondas que tiene una frecuencia que coincide con la diferencia de energía entre los estados, que están igualmente espaciados entre sí.

Este espaciado igual, conocido como armonicidad, está detrás de una limitación clave de los transmones actuales, ya que significa que pueden excitarse fácilmente en estados que no se usan para la computación cuántica. Por ejemplo, si un transmón absorbe dos fotones en lugar del normal, pasará a un estado superior a los dos utilizados para el almacenamiento de información, lo que provocará un error. La armonía también limita la velocidad de cálculo porque el uso de pulsos de microondas más cortos, que hacen que los cálculos sean más rápidos, aumenta la probabilidad de errores.

Por estas razones, Möttönen y sus colegas buscaron crear un qubit superconductor con una alta anarmonía: niveles de energía desigualmente espaciados. En el proceso, también simplificaron su estructura. "Cuando empezamos, queríamos un circuito muy simple, ya que es más fácil construir sistemas informáticos más grandes usando elementos simples", dice Möttönen. Finalmente, el equipo eligió un diseño con una sola unión Josephson colocada dentro de un resonador superconductor. El dispositivo es "el dispositivo más simple que pudimos encontrar [con] que podría actuar como un buen qubit", agrega.

En una serie de pruebas en tres dispositivos unimon diferentes, el equipo encontró precisiones informáticas de un solo paso de alrededor del 99,9 %, no muy por debajo de la precisión actual de los mejores sistemas transmon. Como resultado, esperan que el unimon ocupe un lugar importante en la investigación informática en curso. "El hecho de que los primeros unimon[s] funcionaran tan bien da mucho espacio para una mayor optimización", dice Möttönen.

El unimon "es un nuevo qubit importante" en la caja de herramientas de computación cuántica superconductora, dice el ingeniero eléctrico e informático Thomas Roth de la Universidad de Purdue en Indiana. "Además de la anarmonicidad más grande, este qubit debería ser fácil de fabricar y debería permitir a los diseñadores muchas opciones de optimización que no eran posibles con los diseños de qubit anteriores".

El próximo paso para el equipo, dice Möttönen, es demostrar precisiones comparables en circuitos más complicados de dos unimon-qubit, que serán necesarios para construir sistemas informáticos más complejos. El grupo también espera optimizar el diseño para lograr precisiones superiores al 99,99%.

—Mark Buchanan.

Mark Buchanan es un escritor científico independiente que divide su tiempo entre Abergavenny, Reino Unido, y Notre Dame de Courson, Francia.

## Referencias

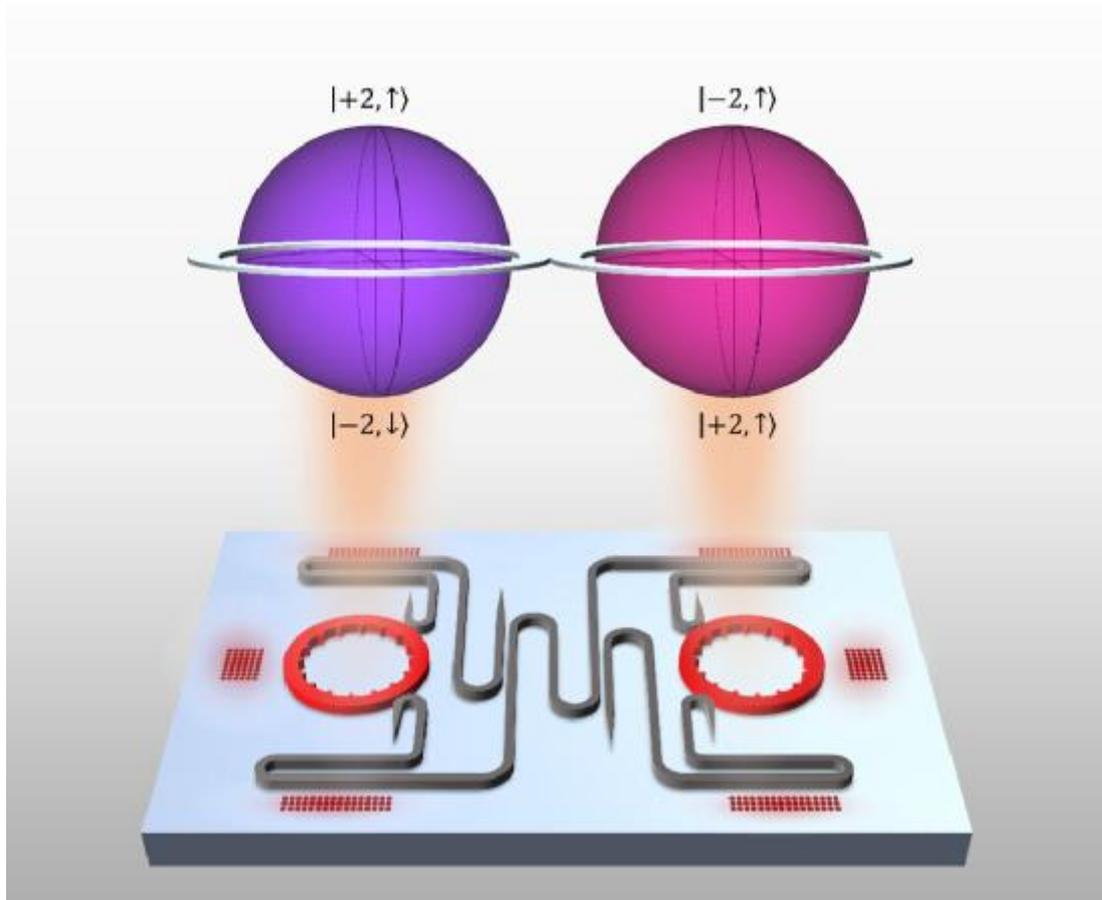
[1] E. Hyypä et al., “Unimon qubit,” [Nat. Commun. 13, 6895 \(2022\)](#).

[2] *Meet the Unimon, the New Qubit on the Block*, December 8, 2022, Physics 15, 191APS news, URL: <https://physics.aps.org/articles/v15/191>

Artículo traducido y editado por Juan F. González.

## 21.Nuevas dimensiones en computación cuántica

[Editar](#)



**Figura 1.** Con solo dos niveles de superposición, los qubits utilizados en las tecnologías de comunicación cuántica actuales tienen un espacio de almacenamiento limitado y una baja tolerancia a las interferencias. El microláser hiperdimensional de Feng Lab (arriba) genera qudits, fotones con cuatro niveles simultáneos de información. El aumento de la dimensión hace que la tecnología de comunicación cuántica robusta sea más adecuada para aplicaciones del mundo real. Crédito: Haoqi Zhao.

## **El chip con microláser añade nuevas dimensiones a la comunicación cuántica por Devorah Fischler, Universidad de Pensilvania**

Los investigadores de Penn Engineering han creado un chip que supera la seguridad y la solidez del hardware de comunicaciones cuánticas existente. Su tecnología se comunica en "qudits", duplicando el espacio de información cuántica de cualquier láser en chip anterior.

Liang Feng, profesor en los Departamentos de Ciencia e Ingeniería de Materiales (MSE) y Sistemas e Ingeniería Eléctrica (ESE), junto con el becario postdoctoral de MSE Zhifeng Zhang y ESE Ph.D. estudiante Haoqi Zhao, presentó la tecnología en un estudio reciente publicado en Nature. El grupo trabajó en colaboración con científicos de la Universidad Politécnica de Milán, el Instituto de Física Interdisciplinaria y Sistemas Complejos, la Universidad de Duke y la Universidad de la Ciudad de Nueva York (CUNY).

### **Bits, qubits y qudits**

Mientras que los chips no cuánticos almacenan, transmiten y calculan datos mediante bits, los dispositivos cuánticos de última generación utilizan cúbits. Los bits pueden ser 1 o 0, mientras que los qubits son unidades de información digital capaces de ser 1 y 0 al mismo tiempo. En mecánica cuántica, este estado de simultaneidad se denomina "superposición".

Un bit cuántico en un estado de superposición superior a dos niveles se denomina qudit para indicar estas dimensiones adicionales.

"En las comunicaciones clásicas", dice Feng, "un láser puede emitir un pulso codificado como 1 o 0. Estos pulsos pueden ser clonados fácilmente por un interceptor que busque robar información y, por lo tanto, no son muy seguros. En las comunicaciones cuánticas con qubits, el pulso puede tener cualquier estado de superposición entre 1 y 0. La superposición hace que no se pueda copiar un pulso cuántico. A diferencia del cifrado algorítmico, que bloquea a los piratas informáticos mediante matemáticas complejas, la criptografía cuántica es un sistema físico que mantiene la información segura".

Los qubits, sin embargo, no son perfectos. Con solo dos niveles de superposición, los qubits tienen un espacio de almacenamiento limitado y una baja tolerancia a la interferencia.

Los qudits de cuatro niveles del dispositivo Feng Lab permiten avances significativos en la criptografía cuántica, elevando la tasa máxima de claves secretas para el intercambio de información de 1 bit por pulso a 2 bits por pulso. El dispositivo ofrece cuatro niveles de superposición y abre la puerta a mayores aumentos de dimensión.

"El mayor desafío", dice Zhang, "era la complejidad y la falta de escalabilidad de la configuración estándar. Ya sabíamos cómo generar estos sistemas de cuatro niveles, pero requería un laboratorio y muchas herramientas ópticas diferentes para controlar todos los parámetros asociados". con el aumento de la dimensión. Nuestro objetivo era lograr esto en un solo chip. Y eso es exactamente lo que hicimos".

### **La física de la ciberseguridad**

La comunicación cuántica utiliza fotones en estados de superposición estrictamente controlados. Propiedades como la ubicación, el momento, la polarización y el espín existen como multiplicidades a nivel cuántico, cada una de las cuales está gobernada por probabilidades. Estas probabilidades describen la probabilidad de que un sistema cuántico (un átomo, una partícula, una onda) adquiera un solo atributo cuando se mide.

En otras palabras, los sistemas cuánticos no están ni aquí ni allá. Ambos están aquí y allá. Es solo el acto de observación (detectar, mirar, medir) lo que hace que un sistema cuántico adquiera una propiedad fija. Como un juego subatómico de estatuas, las superposiciones cuánticas adquieren un estado único tan pronto como se observan, lo que hace imposible interceptarlas sin detección o copiarlas.

El microláser de órbita giratoria hiperdimensional se basa en el trabajo anterior del equipo con microláseres de vórtice, que ajustan con sensibilidad el momento angular orbital (OAM) de los fotones. El dispositivo más reciente mejora las capacidades del láser anterior al agregar otro nivel de control sobre el giro fotónico.

Este nivel adicional de control, poder manipular y acoplar OAM y giro, es el avance que les permitió lograr un sistema de cuatro niveles.

La dificultad de controlar todos estos parámetros a la vez es lo que había estado obstaculizando la generación de qudit en fotónica integrada y representa el mayor logro experimental del trabajo del equipo.

"Piense en los estados cuánticos de nuestro fotón como dos planetas apilados uno encima del otro", dice Zhao. "Antes, solo teníamos información sobre la latitud de estos planetas. Con eso, podíamos crear un máximo de dos niveles de superposición. No teníamos suficiente información para apilarlos en cuatro. Ahora, también tenemos la longitud. Esto es la información que necesitamos para manipular los fotones de forma acoplada y lograr un aumento dimensional. Estamos coordinando la rotación y el giro de cada planeta y manteniendo a los dos planetas en una relación estratégica entre sí".

### **Criptografía cuántica con Alice, Bob y Eve**

La criptografía cuántica se basa en la superposición como un sello de seguridad. En un protocolo de criptografía popular conocido como distribución de claves cuánticas (QKD), los estados cuánticos generados aleatoriamente se envían de un lado a otro entre el remitente y el receptor para probar la seguridad de un canal de comunicaciones.

Si el remitente y el receptor (siempre Alice y Bob en el mundo de la criptografía) descubren una cierta discrepancia entre sus mensajes, saben que alguien ha intentado interceptar su mensaje. Pero, si la transmisión permanece casi intacta, Alice y Bob entienden que el canal es seguro y usan la transmisión cuántica como clave para los mensajes encriptados.

¿Cómo mejora esto la seguridad de la comunicación no cuántica? Si imaginamos el fotón como una esfera girando hacia arriba, podemos hacernos una idea aproximada de cómo un fotón podría codificar clásicamente el dígito binario 1. Si lo imaginamos girando hacia abajo, entendemos el 0.

Cuando Alice envía fotones clásicos codificados en bits, Eve, la espía, puede robarlos, copiarlos y reemplazarlos sin que Alice o Bob se den cuenta. Incluso si Eve no puede descifrar los datos que ha robado, es posible que los guarde para un futuro cercano cuando los avances en la tecnología informática le permitan abrirse camino.

La comunicación cuántica agrega una capa más fuerte de seguridad. Si imaginamos el fotón como una esfera que gira hacia arriba y hacia abajo al mismo tiempo, codificando 1 y 0 simultáneamente, nos hacemos una idea de cómo un qubit mantiene la dimensión en su estado cuántico.

Cuando Eve intente robar, copiar y reemplazar el qubit, su capacidad para capturar la información se verá comprometida y su manipulación será evidente en la pérdida de superposición. Alice y Bob sabrán que el canal no es seguro y no usarán una clave de seguridad hasta que puedan demostrar que Eve no lo ha interceptado. Solo entonces enviarán los datos cifrados previstos utilizando un algoritmo habilitado por la clave qubit.

Sin embargo, si bien las leyes de la física cuántica pueden evitar que Eve copie el qubit interceptado, es posible que pueda perturbar el canal cuántico. Alice y Bob deberán continuar generando claves y enviándolas de un lado a otro hasta que ella deje de interferir. Las perturbaciones accidentales que colapsan la superposición a medida que el fotón viaja por el espacio también contribuyen a los patrones de interferencia.

El espacio de información de un qubit, limitado a dos niveles, tiene una baja tolerancia a estos errores.

Para resolver estos problemas, la comunicación cuántica requiere dimensiones adicionales. Si imaginamos un fotón girando (la forma en que la tierra gira alrededor del sol) y girando (la forma en que la tierra gira sobre su propio eje) en dos direcciones diferentes a la vez, tenemos una idea de cómo funcionan los qudits de Feng Lab.

Si Eve intenta robar, copiar y reemplazar el qudit, no podrá extraer ninguna información y su manipulación será clara. El mensaje enviado tendrá una tolerancia mucho mayor al error, no solo por la interferencia de Eve, sino también por fallas accidentales introducidas a medida que el mensaje viaja por el espacio. Alice y Bob podrán intercambiar información de manera eficiente y segura.

"Hay mucha preocupación", dice Feng, "de que el cifrado matemático, sin importar cuán complejo sea, se vuelva cada vez menos efectivo debido a que estamos avanzando muy rápido en las tecnologías informáticas. La dependencia de la comunicación cuántica en las barreras físicas en lugar de las matemáticas la hace inmune a estas amenazas futuras. Es más importante que nunca que continuemos desarrollando y refinando las tecnologías de comunicación cuántica".

## Referencias

[1] Zhifeng Zhang et al, *Spin-orbit microlaser emitting in a four-dimensional Hilbert space*, Nature (2022). DOI: [10.1038/s41586-022-05339-z](https://doi.org/10.1038/s41586-022-05339-z)

[2] *Micro laser chip adds new dimensions to quantum communication* by Devorah Fischler, University of Pennsylvania. Phys.org news, URL: <https://phys.org/news/2022-11-microlaser-chip-dimensions-quantum-communication.html>

### **Apéndice matemático: qubits, qutris, qudits y quits, los estados cuánticos de la computación cuántica.**

Una descripción sencilla de qué es un qubit es un vector en una base compleja bicomponente con dos coeficientes complejos  $c_0, c_1$  indeterminados. Matemáticamente

$$|\psi\rangle = c_0|0\rangle + c_1|1\rangle$$

tales que  $|c_0|^2 + |c_1|^2 = 1$ . El qutrit sería la versión de 3 estados y 3 coeficientes complejos  $c_0, c_1, c_2$  de forma que

$$|\psi\rangle = c_0|0\rangle + c_1|1\rangle + c_2|2\rangle$$

tales que  $|c_0|^2 + |c_1|^2 + |c_2|^2 = 1$ . El qudit es la versión  $d$ -dimensional que generaliza los casos anteriores, suponiendo que hay  $d$  coeficientes  $(c_0, c_1, \dots, c_{d-1})$  en superposición lineal

$$|\psi\rangle = \sum_{i=0}^{d-1} c_i|i\rangle = c_0|0\rangle + c_1|1\rangle + \dots + c_{d-1}|d-1\rangle$$

Finalmente, la versión infinito dimensional es una suerte de campo cuántico que podemos llamar quit (quantum infinity bit)

$$|\psi\rangle = \sum_{i=0}^{\infty} c_i|i\rangle = c_0|0\rangle + c_1|1\rangle + \dots$$

donde se tiene la normalización (suponiendo dicha suma exista y converja apropiadamente):

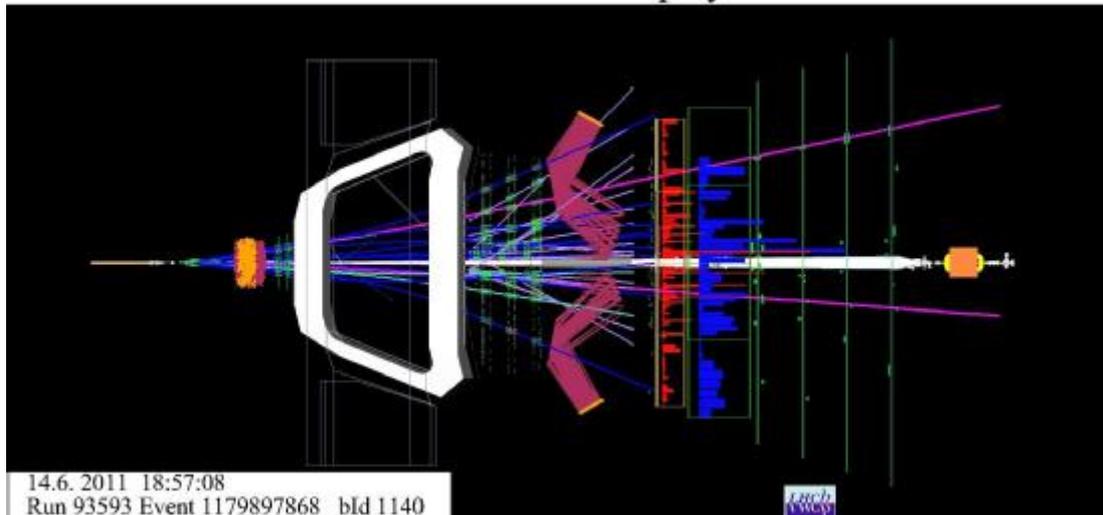
$$\sum_{i=0}^{\infty} |c_i|^2 = 1$$

Artículo editado y traducido por Juan F. González.

## **22.LHCb libera datos en abierto para Ciencia ciudadana**

[Editar](#)

## LHCb Event Display



**Figura 1.** Visualización de eventos LHCb de 2011 que muestra un mesón B que se descompone en un par de muón y antimuón. Crédito: CERN.

El experimento Belleza del Gran Colisionador de Hadrones (LHCb) del CERN es el principal experimento del mundo en física del sabor de los quarks con un amplio programa de física de partículas. Sus datos de las Ejecuciones 1 y 2 del Gran Colisionador de Hadrones (LHC) se han utilizado hasta ahora para más de 600 publicaciones científicas, incluidos varios descubrimientos importantes.

Si bien todos los resultados científicos de la colaboración LHCb ya están disponibles públicamente a través de documentos de acceso abierto, los datos utilizados por los investigadores para producir estos resultados ahora son accesibles para cualquier persona en el mundo a través del portal de datos abiertos del CERN. La publicación de datos se realiza en el contexto de la Política de ciencia abierta del CERN, lo que refleja los valores de transparencia y colaboración internacional consagrados en la Convención del CERN durante más de 60 años.

"Los datos recopilados en LHCb son un legado único para la humanidad, especialmente porque ningún otro experimento cubre la región que analiza LHCb", dice Sebastian Neubert, líder del proyecto de datos abiertos LHCb. "Se ha obtenido a través de un gran esfuerzo de colaboración internacional, que fue financiado por el público. Por lo tanto, los datos pertenecen a la sociedad".

La muestra de datos disponible asciende al 20% del conjunto de datos total recopilado por el experimento LHCb en 2011 y 2012 durante la ejecución 1 del LHC. Comprende 200 terabytes que contienen información obtenida de eventos de colisión protón-protón filtrados y registrados con el detector.

La colaboración LHCb ha preprocesado los datos mediante la reconstrucción de firmas experimentales, como las trayectorias de partículas cargadas, a partir de la información sin procesar proporcionada por su complejo sistema detector. Los datos se filtran, se clasifican según aproximadamente 300 procesos y decaimientos, y se ponen a disposición en el mismo formato que utilizan los físicos del LHCb.

El análisis de los datos del LHC es un ejercicio complejo y lento. Por lo tanto, para facilitar el análisis, las muestras van acompañadas de una extensa documentación y metadatos, así como de un glosario que explica varios cientos de términos especiales utilizados en el preprocesamiento.

Los datos se pueden analizar utilizando algoritmos LHCb dedicados, que están disponibles como software de código abierto.

Los datos son adecuados para diferentes tipos de estudios de física y cualquiera puede descargarlos directamente. "Está destinado a ser utilizado por científicos profesionales y su interpretación requiere algunos conocimientos de física de partículas, pero todos están invitados a probarlo", continúa Neubert. "Sería fantástico si los datos inspiran nuevas direcciones de investigación y son utilizados por investigadores en otros campos, como la ciencia de datos y la inteligencia artificial. Estamos ansiosos por saber qué encuentran los usuarios de los datos".

Se planean más lanzamientos de datos de la colaboración LHCb en el futuro.

## Referencias

[1] December 9, 2022. *Large Hadron Collider Beauty releases first set of data to the public*, by CERN. Phys.org news, URL: <https://phys.org/news/2022-12-large-hadron-collider-beauty.html>

[2] CERN opendata portal. URL: <http://opendata-ga.cern.ch/search?page=1&size=20&experiment=LHCb&subtype=Collision&type=Dataset>

Artículo editado y traducido por Juan F. González.

# 23. Visualización de agujeros negros

[Editar](#)

## Visualización de agujeros negros con trazado de rayos relativista general

13 de marzo de 2022, artículo originalmente escrito en primera persona por sholloway (Sean Holloway).

De acuerdo, se terminó haciendo este artículo demasiado largo, así que antes de entrar en la jerga, echemos un vistazo al producto terminado:

00:00

00:10

**Vídeo 1.** Orbitando alrededor del ecuador de un agujero negro supermasivo, con un disco de acreción fuera del eje.

00:00

00:08

**Vídeo 2.** Orbitando lateralmente desde el ecuador hasta el polo norte de un agujero negro ligeramente menos supermasivo.

00:00

00:10

**Vídeo 3.** Sentado cerca del disco de acreción de un agujero negro muy, muy supermasivo.

### **Parte 1: un poco de información de fondo**

Entonces, ¿qué es este artículo y proyecto? Es un renderizador de trazado de rayos relativista general que simula un agujero negro de Schwarzschild y su disco de acreción, está escrito en lenguaje de sombreado HLSL y se ejecuta en Unity con C#. ¡Ahí está esa jerga! Desglosemos cada uno de estos términos: ¿Qué es la relatividad? En resumen, la relatividad es la teoría que describe la física de las cosas que son muy grandes, muy pesadas o se mueven muy rápido. Allá por el año 1905, un tipo llamado Albert Einstein irrumpió en escena y publicó cuatro artículos revolucionarios de física en el transcurso del año. Entre ellos se encontraba un artículo cuyo título se traduce como "Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento", que introdujo la teoría ahora conocida como Relatividad Especial. La relatividad especial evoluciona a partir de la simple idea de que las leyes de la física deben comportarse de la misma manera, sin importar en qué dirección te muevas o qué tan rápido. Einstein observó que las Ecuaciones de Maxwell, que describen el electromagnetismo, no dependen de la dirección ni de la velocidad, por lo que la velocidad de la luz, establecida teóricamente por Maxwell, debe ser constante. Este hecho también se observó recientemente en el famoso Experimento de Michelson-Morley, que intentó medir el movimiento de un supuesto medio de luz de fondo pero no encontró ninguno. A partir de una velocidad constante de la luz, puede derivar un montón de fenómenos extraños pero verificados experimentalmente. Lo más significativo es que los períodos de tiempo y las distancias en el espacio se distorsionan cuando los observadores se mueven unos respecto a otros. Las longitudes se acortan, el tiempo se mueve más rápido, los eventos parecen ocurrir en diferentes órdenes para diferentes observadores, etc. Da dolor de cabeza pero es muy interesante, y si desea profundizar más, el canal de YouTube Minute Physics tiene una excelente serie de introducción. . La relatividad especial es útil, matemáticamente bastante sencilla, pero limitada. Especial se refiere al hecho de que la teoría solo funciona si todo se mueve a una velocidad constante, no acelerando. El caso general es mucho más difícil, y pasaron 10 años hasta que Einstein publicó su acertadamente llamada teoría de la Relatividad General. La relatividad general se reduce a la idea de que en lugar de solo espacio y tiempo, tienes un espacio-tiempo de 4 dimensiones, y que en lugar de ser plano e isotrópico, ese espacio-tiempo puede curvarse. Lo realmente alucinante entra en acción cuando revela que esta curvatura es, de hecho, equivalente a la gravedad, y que la masa y la energía crean la curvatura. Si bien la mayor parte de la teoría es un poco difícil de penetrar, hay una metáfora adecuada de cómo un espacio curvo puede atraer cosas en diferentes direcciones, como la gravedad. Imagina que estás volando de Los Ángeles a Madrid, como en el siguiente gráfico:



**Figura 1.**Imagen cortesía de Cayetano Benevant.

Si asumes que la Tierra es plana, pensarías que la línea roja sería la ruta de vuelo, ya que es la más corta en tu mapa, pero cuando te subes al avión terminas tomando la ruta verde. Esto es simplemente porque el espacio es curvo. En una esfera, la línea verde es el camino más corto de A a B, pero para el observador que la mira como si fuera un espacio plano, es como si una fuerza misteriosa empujara su avión hacia Groenlandia. De manera similar, un objeto que toma el camino más corto a través del espacio-tiempo curvo parece ser empujado a través del espacio plano, manifestando lo que consideramos como gravedad.

Las líneas como el arco verde de arriba se llaman geodésicas y describen el camino más corto entre dos puntos en un espacio curvo. Una conclusión clave de la relatividad general es que los objetos que se mueven libremente siguen las geodésicas en el espacio-tiempo. Esta es la gran idea que hace posible nuestro algoritmo de trazado de rayos, así que tenlo en cuenta.

### **¿Qué es un agujero negro?**

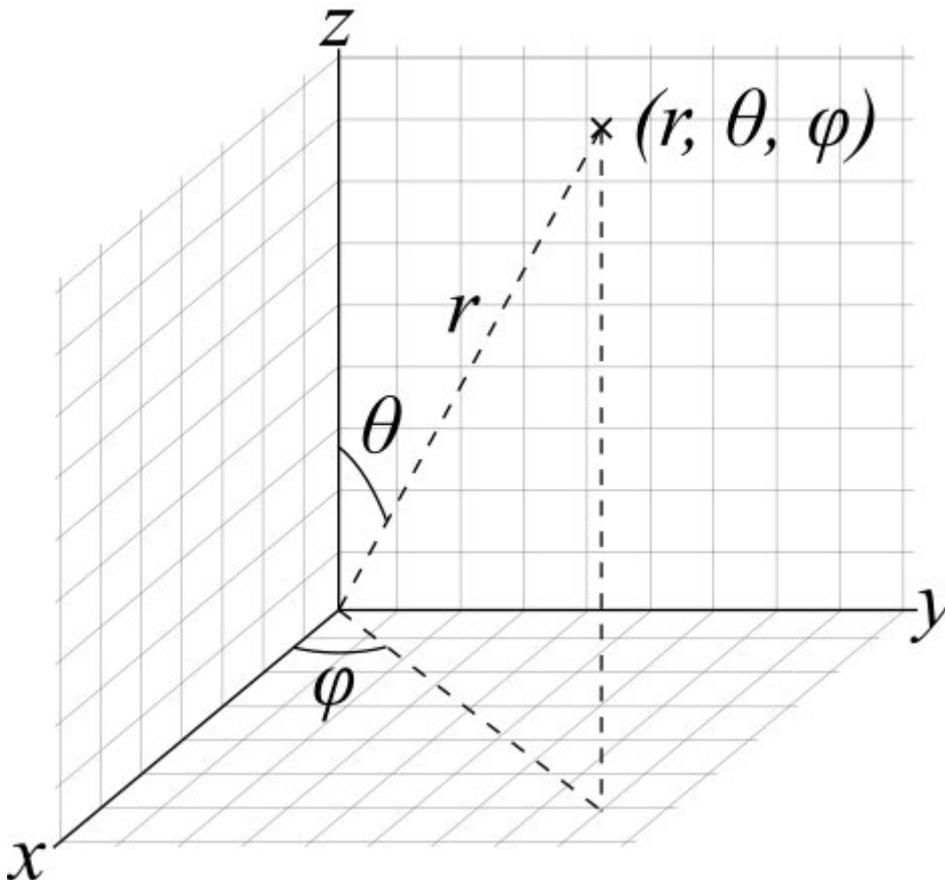
La versión corta es que es un objeto que es tan denso que la atracción de la gravedad es lo suficientemente fuerte como para evitar que la luz se escape. La definición real rigurosa es un poco más complicada, pero no difiere sustancialmente de la definición intuitiva.

La versión un poco menos corta plantea la pregunta, ¿cómo describimos la curvatura del espacio-tiempo? La respuesta amplia es usar un objeto matemático llamado métrica. La métrica de un espacio describe cómo las tres dimensiones del espacio y la dimensión del tiempo se acortan y alargan, intercambiándose entre sí. Estas métricas satisfacen un sistema de ecuaciones conocido como las ecuaciones de campo de Einstein, y después de que Einstein publicara su artículo sobre la relatividad general, físicos y matemáticos se esforzaron por encontrar soluciones a estas ecuaciones.

Una de esas soluciones se conoce como la métrica de Schwarzschild, que describe la forma del espacio-tiempo que rodea una masa esféricamente simétrica. Lo he presentado aquí, cortesía de Wikipedia:

$$g = -c^2 d\tau^2 = -\left(1 - \frac{r_s}{r}\right) c^2 dt^2 + \left(1 - \frac{r_s}{r}\right)^{-1} dr^2 + r^2 g_\Omega$$

En caso de que no esté familiarizado, esto se basa en las coordenadas esféricas estándar,  $r$ ,  $\theta$  y  $\varphi$ ,  $(r, \theta, \varphi)$ , como se ve aquí, nuevamente cortesía de Wikipedia:



**Figura 2.** Coordenadas esféricas.

Si los símbolos no le son familiares, no se preocupe demasiado, la parte más importante es el factor de  $A = (1 - r_s/r)$  que aparece delante de  $dt^2$ , que denota la distancia en el tiempo, y  $dr^2$ , que denota la distancia hacia o desde el centro de la esfera.

Veamos qué hace este factor cuando cambias  $r$ , la distancia al centro. Cuando  $r$  tiende al infinito, el factor  $A$  tiende a 1, por lo que el espacio y el tiempo son normales y planos cuando estás muy, muy lejos del objeto. Eso tiene sentido. Ahora hagamos  $r$  más pequeña. A medida que se hace más pequeña,  $r_s/r$  se hace más grande, por lo que  $A$  se hace más pequeña.  $A$  se multiplica en  $dt$ , por lo que las diferencias en el tiempo se vuelven “más pequeñas”, pero  $A$  divide  $dr$ , por lo que el espacio comienza a hacerse cada vez más grande. Al permanecer en la geodésica, comienzas a moverte más a través del espacio y disminuyes la velocidad al moverte a través del tiempo.

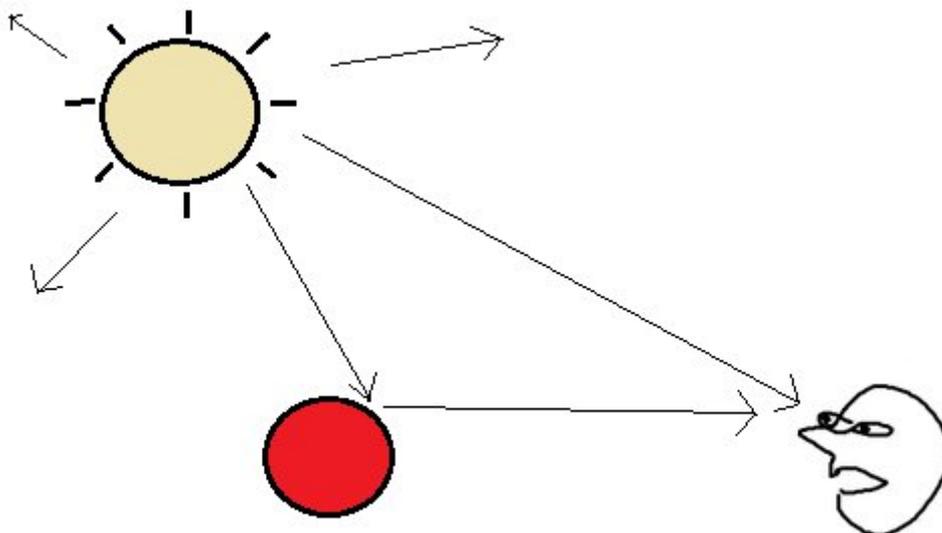
Si reduce  $r$  completamente a  $r_s$ , entonces  $A$  se vuelve cero. El tiempo ya no contribuye con ninguna "longitud" a la métrica, y las diferencias en el espacio se vuelven infinitamente grandes. No extenderé lo que esto significa en un sentido físico, pero no hace falta decir que ¡esto es extraño! El radio en el que ocurre esta rareza se llama radio de Schwarzschild y es igual a  $2GM/c^2$ , donde  $M$  es la masa central,  $G$  es la constante de Newton y  $c$  es la velocidad de la luz. Esto coincide con el radio en el que una masa tendría una velocidad de escape igual a la velocidad de la luz, simplemente usando los principios básicos de Física 101. ¡Excelente!

Lo que esto significa es que si tienes un objeto con toda su masa por debajo del radio de Schwarzschild, tienes un objeto en el que la luz puede entrar pero no salir. Por lo tanto, un agujero negro. Ese fenómeno se manifiesta específicamente como una esfera negra, pero lo interesante sucede alrededor de ese radio, debido a la forma en que la luz se curva alrededor de un objeto masivo, como veremos pronto.

### ¿Qué es el trazado de rayos?

El trazado de rayos es un método para representar imágenes en una pantalla al tratar la luz como un rayo que rebota desde las fuentes de luz hacia el ojo. Esta es una aproximación, ¡pero realmente buena! El algoritmo es conceptualmente simple y extremadamente poderoso, a costa de ser un poco costoso computacionalmente. El trazado de rayos se utiliza en todo tipo de software de renderizado 3D basado en la física, e incluso se está incorporando últimamente en algunos videojuegos de alto rendimiento para efectos visuales en tiempo real.

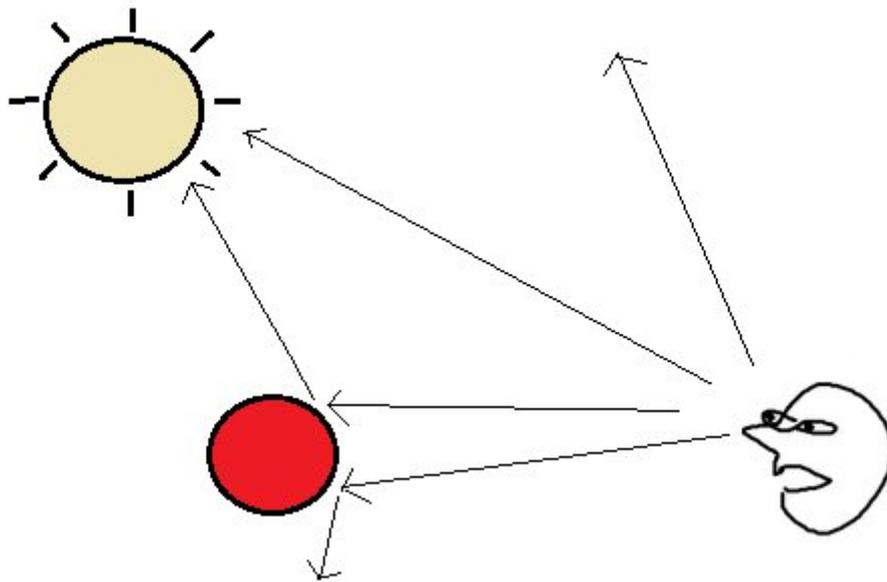
Echemos un vistazo a cómo la luz pasa del sol a tus ojos. Imagina que estás pasando el rato en un gran espacio vacío, solo con el sol y una fría esfera roja:



**Figura 3.** Trazado de rayos(I).

La idea básica de lo que sucede es que el sol envía rayos de luz, algunos de ellos van directamente a tu ojo, algunos rebotan en objetos y luego a tu ojo, y la mayoría de ellos simplemente se disparan

hacia la nada. No nos importa ninguna luz que no llegue a nuestros ojos, así que ajustemos nuestro marco de referencia a lo que técnicamente se llama trazado de rayos hacia atrás:

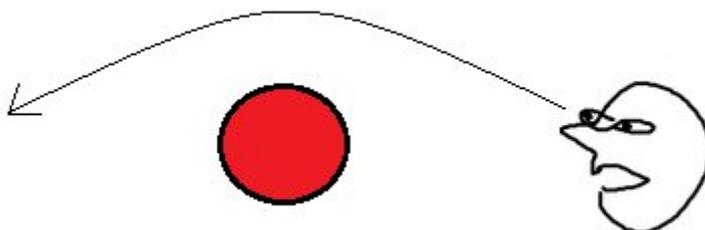


**Figura 4.** Trazado de rayos(II).

Ahora, estamos mirando en cada dirección que el ojo puede ver (que corresponderá a cada píxel de la pantalla), y lanzamos un rayo hacia adelante, viendo lo que golpea. Esto termina siendo muy simple conceptualmente, y las escenas simples se pueden implementar fácilmente, utilizando pruebas de intersección entre rayos y objetos geométricos, que existen desde Euclides. Esta técnica también es bastante poderosa, ya que de esta manera se pueden implementar muchos fenómenos visuales interesantes, como la reflexión, la refracción y varios modelos de iluminación.

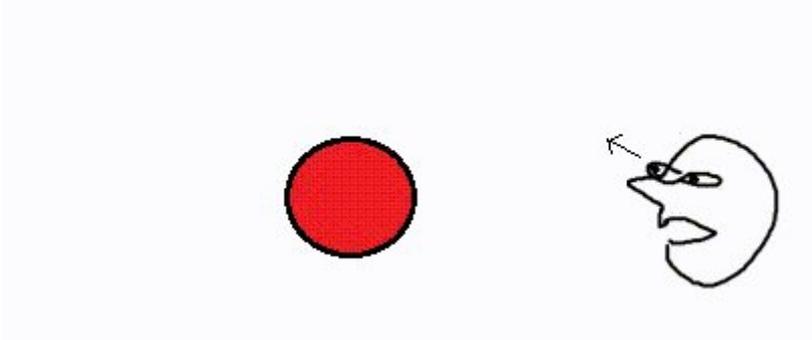
Los proyectos de trazado de rayos lineales son divertidos y algo aptos para principiantes y se ven geniales, por lo que si está interesado, le recomiendo la amada serie de artículos de Three Eyed Games sobre el trazado de rayos en el motor de juegos de Unity. Son un excelente tutorial y terminan con un punto de partida perfecto para futuras expansiones.

Sin embargo, para nuestros propósitos, las cosas deben complicarse un poco más. El trazado de rayos básico que usa solo líneas rectas (a veces llamado emisión de rayos) no nos ayuda cuando nos movemos en un espacio curvo. Las situaciones que estamos tratando de representar son un poco más como esto:



**Figura 5.** Trazado de rayos(III).

Afortunadamente, Calculus 101 viene a nuestro rescate. Si una función se comporta bastante bien, puede aproximarla como una línea recta para distancias muy cortas. Dependiendo de qué tan cortas sean esas distancias, puede obtener una buena aproximación arbitraria, y se ve así:

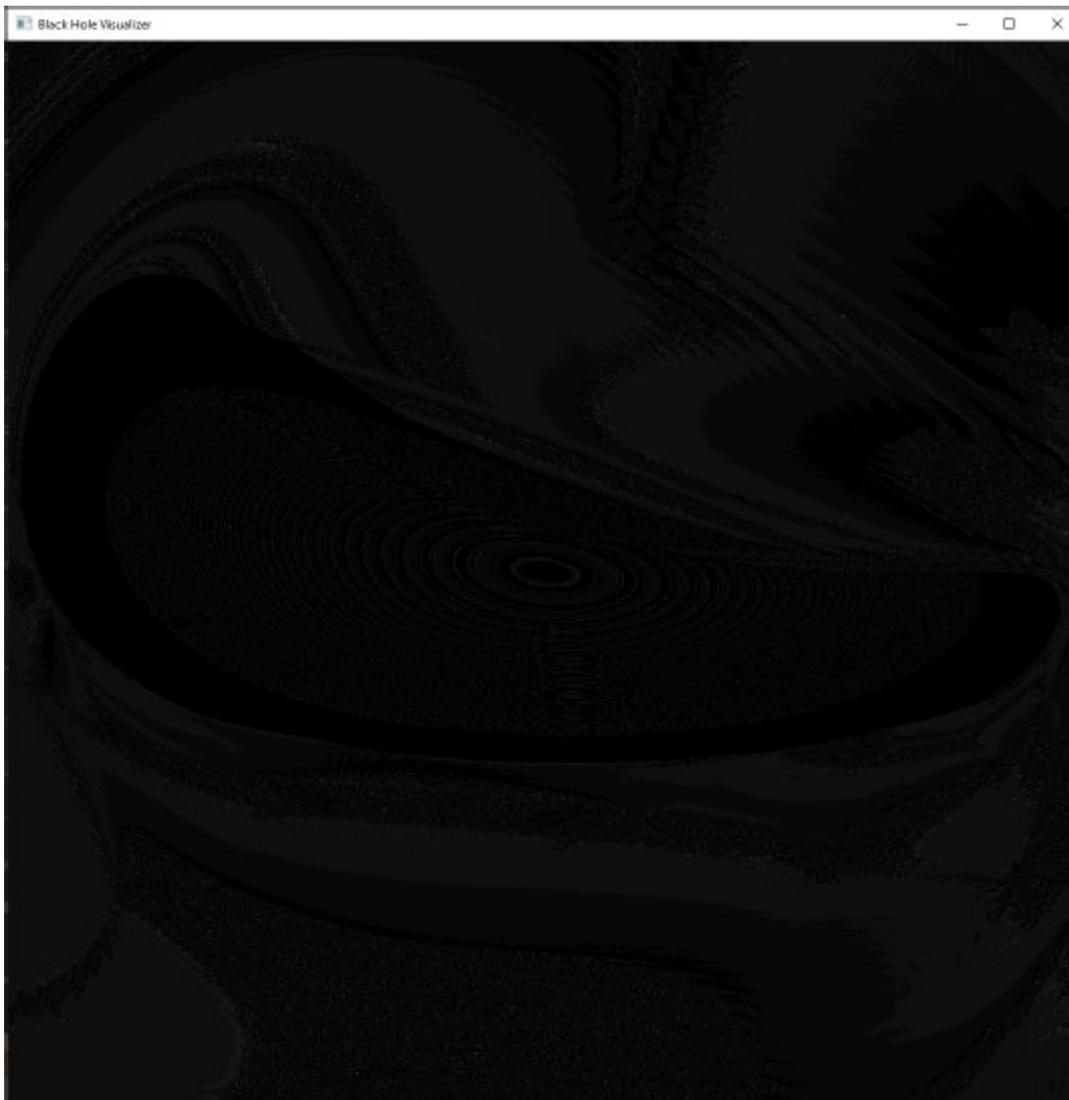


**Figura 6.** Trazado de rayos(IV).

En el contexto del trazado de rayos, esto a veces se denomina marcha de rayos. Dado que las curvas geodésicas con las que estamos armados son un sistema de ecuaciones diferenciales, podemos usar métodos de integración numérica para realizar este paso.

**Parte 2: construcción del renderizador**

Para mi primera oportunidad en este proyecto, inmediatamente sucumbí al instinto más venenoso que un ingeniero puede tener y pensé: "Debería hacerlo de la manera más difícil". Así que reescribí minuciosamente el controlador OpenGL que hice para mi último proyecto en C++, coloqué todas las ecuaciones en un sombreador de fragmentos sin ninguna buena forma de depurar y presioné compilar para obtener esta hermosa obra de arte:



**Figura 7.** La pieza es más una metáfora, de verdad.

Luego pasé unos días golpeándome la cabeza contra la pared sin poder solucionar los patrones extraños que estaba viendo, antes de finalmente admitir "derrota" y hacer las cosas de manera inteligente, usando el motor de juego Unity, con el que me siento 100 veces más cómodo. y tienen mucha más capacidad para depurar visualmente. "Las herramientas adecuadas para el trabajo", dirían algunos.

### **Viendo el agujero negro**

Entonces, de vuelta en el terreno familiar, comencé poco a poco escribiendo un trazador de rayos lineal simple que generaría las tres partes básicas del agujero negro: una esfera negra, un disco brillante a su alrededor y un fondo estrellado. Esto se unió de manera bastante simple:



**Figura 8.** Videotest.

¡Ahora viene la parte difícil! Primero, implementar la marcha de rayos. Para esto, dividí el sombreador en dos partes, una que usa las matrices de proyección de la cámara para crear un rayo para cada píxel y otra que hace avanzar el rayo un paso. Creé cuatro texturas, correspondientes a la posición del rayo, la dirección del rayo, el color de salida para renderizar y un valor entero que indica si el rayo estaba "terminado" de marchar.

Esta sección es probablemente donde ocurrió la mayor parte de la dificultad, pero nada de eso es tan interesante de mostrar porque fue antes de que lograra el primer resultado visual. Básicamente, tuve que lidiar con muchas sutilezas de la conversión de coordenadas cartesianas a esféricas, y luego más sutilezas al hacer la transición a las coordenadas de Schwarzschild.

El algoritmo se inspiró principalmente en dos artículos. Este artículo de Riazuelo, que me ayudó a empezar, y este artículo de Bacchini et al., que me llevó a la meta. El artículo de Riazuelo fue mi inspiración inicial para el proyecto y me dio muchos consejos sobre cosas como establecer pasos de tiempo, pero finalmente sus ecuaciones llevaron a problemas numéricos y su método para generar vectores de cámara seguía dándome problemas. El artículo de Bacchini me presentó

algo llamado formalismo ADM, que encajaba fácilmente con mi función de integración numérica y solucionó mis problemas numéricos.

Después de una buena cantidad de retoques y rascarse la cabeza, terminé con mi primer renderizado exitoso de un agujero negro, sin disco y con un fondo estrellado:



**Figura 9.**

Estaba en la luna al ver esto, puedes distinguir claramente algunas de las características visuales clásicas, como la esfera de fotones (el anillo de luz más interno) y el anillo de Einstein (la parte "más elástica" donde la imagen se voltea).

### **El disco de acreción**

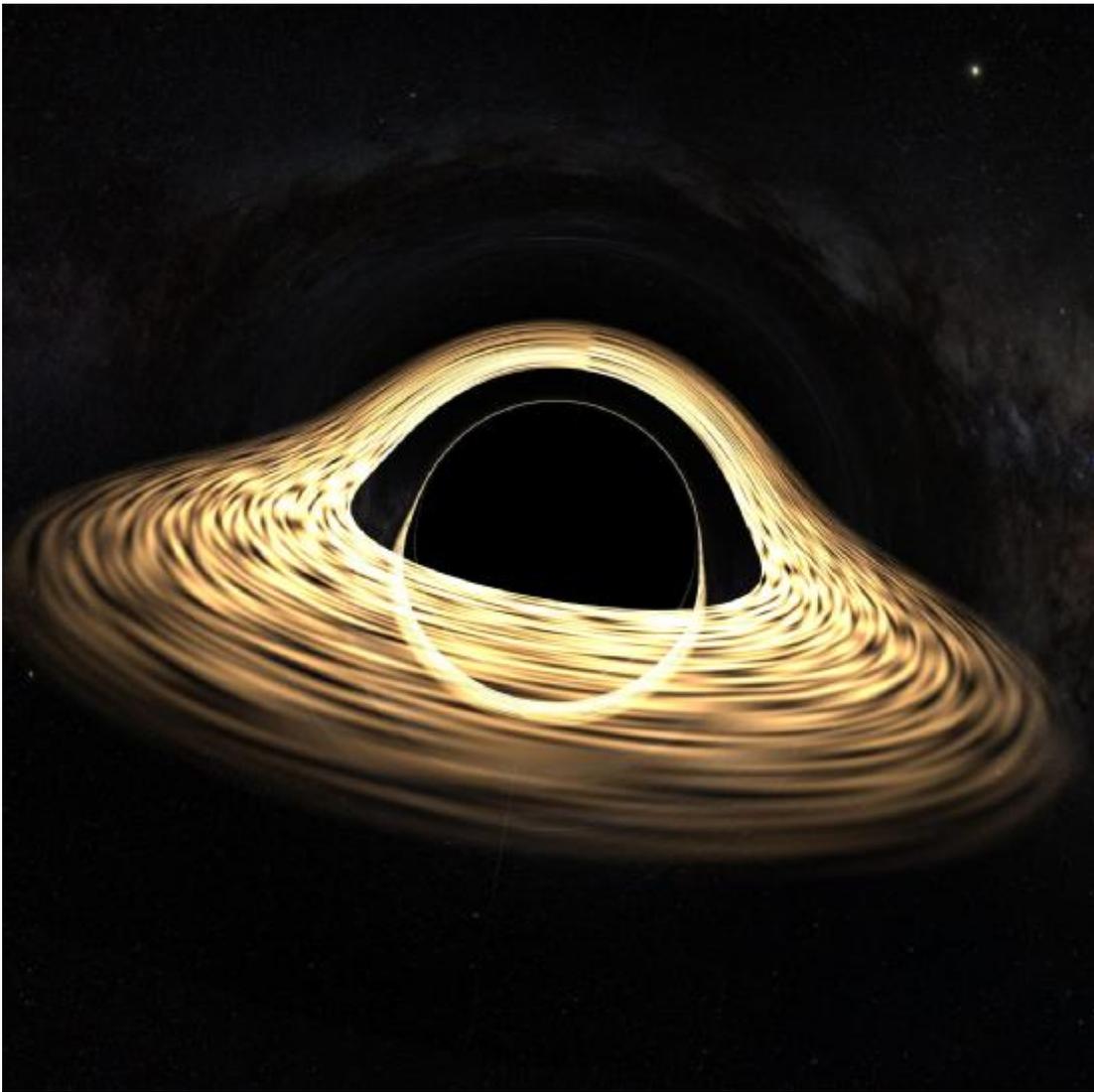
En este punto, ¡técnicamente hemos renderizado un agujero negro! ¡Pero parece aburrido! Mi objetivo para el producto terminado es que luzca al menos un 10 % tan bueno como el agujero negro en Interestelar, por lo que necesitamos el componente visual real, el disco de acreción, básicamente un montón de gas caliente que orbita alrededor de la masa central. Para comenzar, solo coloquemos un anillo blanco:



**Figura 10.**

¡Bien! ¡Eso ya está mejor! Vale la pena señalar que esta es la misma perspectiva que en el renderizado lineal anterior, pero ahora se ve el blanco adicional arriba y abajo debido a que la luz se dobla alrededor del agujero negro y golpea el disco del otro lado, que normalmente estaría ocluido.

Todo el resto del proyecto está dedicado a mejorar el disco, y solo lo presentaré en el orden en que logré las cosas. Lo primero es lo primero, basta de blanco aburrido, pongámosle una textura de ruido, ingenuamente opté por el ruido de Perlin. Ah, y agrega un poco de mezcla alfa también, para la transparencia.



**Figura 11.**

¡Parece falso como el infierno! Hay una costura en la parte de atrás, todo es en espiral y extraño, y el brillo simplemente cae linealmente. Lento pero seguro, agreguemos realismo nuevamente, comenzando con: Color.

¿De qué color es un disco de gas caliente? Bueno, muchas cosas que son lo suficientemente calientes como para brillar pueden modelarse bastante bien como radiación de cuerpo negro, que sigue una curva de brillo versus frecuencia conocida como la ley de Planck. Si alguna vez miró una tabla de gama de colores, compró bombillas elegantes o trabajó como herrero, probablemente haya visto la escala Kelvin que asocia el rojo con temperaturas más bajas y el azul con temperaturas más altas.

Para algo como una estrella, puede buscar directamente el color en función de la temperatura exterior. Sin embargo, el disco de acreción de un agujero negro complica las cosas, debido al fenómeno del corrimiento al rojo y al azul, o el aumento/disminución de la longitud de onda cuando la luz gana o pierde energía.

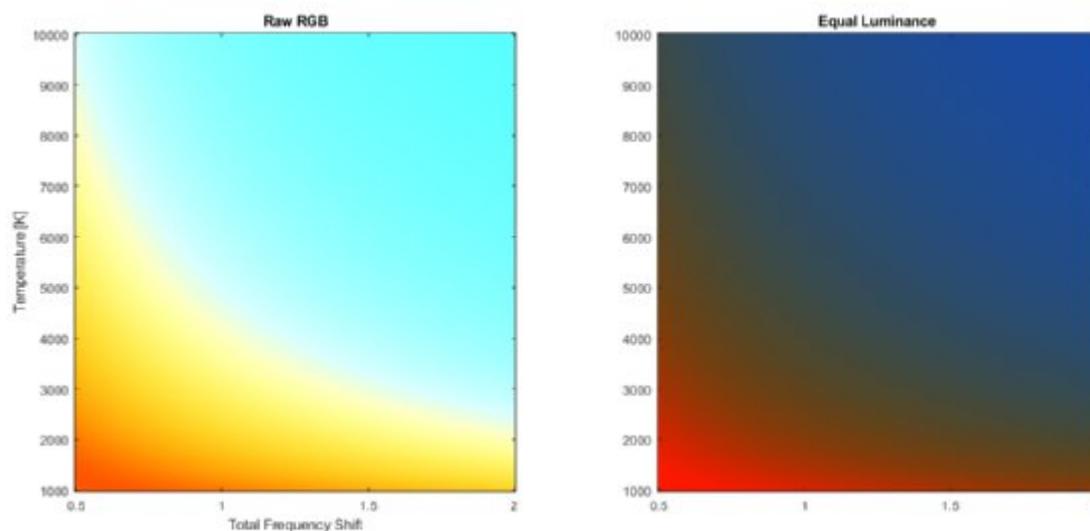
Hay dos fuentes de desplazamiento en un agujero negro, el "desplazamiento al rojo gravitacional", que hace que la luz sea más roja debido a la energía necesaria para escapar de un fuerte pozo de

gravidad, y el efecto Doppler, que hace que la luz de un objeto que se mueve hacia ti sea más azul. y uno alejándose de ti más rojo. Además, los objetos que se mueven hacia ti también emitirán una luz más brillante, debido al fenómeno del “rayo relativista”.

Eso es un montón de cosas que entran en el color del disco en cualquier lugar. El proceso completo implica:

- Muestra el brillo del disco.
- Calcular el cambio de frecuencia.
- Use la curva de Planck desplazada para determinar la curva de brillo frente a frecuencia.
- Convertir la curva en un valor RGB.
- Iluminar/oscurer el valor debido a la transmisión.

Ya implementamos 1, podemos obtener 2, 3 y 5, de directores físicos, pero 4 era todo nuevo para mí. ¿Cómo se corresponden las longitudes de onda de la luz con los valores RGB? Después de leer esta excelente guía sobre la teoría del color de Chandler Abraham y comenzar a comprender el espacio de color CIE, me di cuenta de que esto implicaría mucha integración para una temperatura y un cambio determinados. Para subcontratar este cálculo, abrí mi copia de MATLAB, felizmente vi que todavía tenía 10 días en mi licencia de empleador anterior y usé un script para generar una textura.



**Figura 12.** Texturas. Izquierda: Salidas RGB crudas. Derecha: Salidas normalizadas a igual luminancia.

Con esta textura, podemos simplemente muestrear el color en el valor de cambio y temperatura calculado, para obtener el color del disco. Eso está muy bien, pero eso simplemente plantea la pregunta, ¿a qué temperatura está el disco? En este punto recurrí a algunas notas de conferencias realmente perspicaces sobre astrofísica, del profesor Cole Miller de la Universidad de Maryland en College Park. Aquí deriva de la mecánica de fluidos la temperatura de un disco de acreción en función tanto de la distancia desde el centro como de la masa del agujero negro.

De estos resultados resulta que la mayoría de los agujeros negros son azules. Esto me sorprendió, ya que todo mi entendimiento provenía del agujero negro en la película Interestelar, que estaba

coloreado más como una fogata que cualquier otra cosa. Sin embargo, a medida que aumenta la masa de un agujero negro, aumenta la órbita estable más interna, disminuye la energía en la órbita y disminuye la temperatura.

Entonces, hay una manera de obtener agujeros negros rojos/amarillos, solo tienen que ser muy, muy, muy, muy grandes. ¡Y estoy bien con ese movimiento de la mano! El equipo que simuló Interstellar lo fue, ya que, como puede ver en sus representaciones a la mitad de esta página, su disco de acreción es principalmente azul, pero se vuelve de un naranja rojizo en los puntos más desplazados hacia el rojo. Así que configuré un parámetro deslizante de "temperatura máxima" entre 1000 K y 10 000 K, y simplemente lo configuré en lo que se viera mejor. Sin más preámbulos, aquí es donde nos lleva:



**Figura 12.** Tras texturas, el renderizado del agujero negro mejora.

¡Pulcro! Pero estoy harto de esa textura de marcador de posición. Es hora de descubrir cómo hacer un buen ruido, aprendiendo del gurú de los sombreadores de Internet, Iñigo Quilez, e inspirándose en el código de The Book of Shaders de Patricio Gonzalez Vivo y Jen Lowe. Con una nueva comprensión de cuándo y cómo usar diferentes tipos de ruido, cambié al movimiento browniano

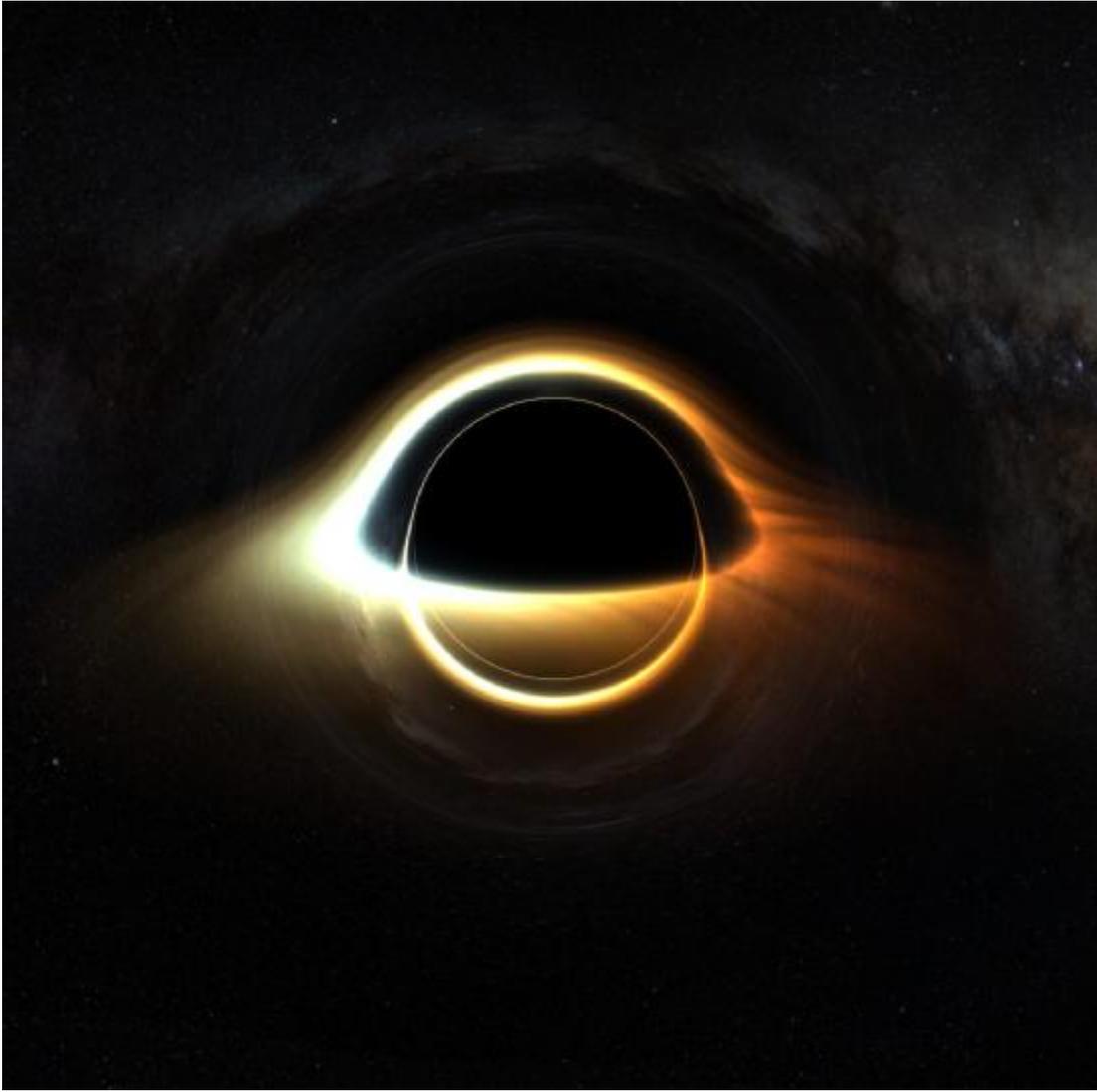
fraccional y agregué un poco de inclinación dependiente del radio para que pareciera que está girando:



**Figura 13.**

Muuuuucho mejor, pero todavía no del todo, me parece un poco falso todavía, esos bordes circulares. De vuelta a la pizarra. Estas son básicamente nubes arremolinadas, ¿verdad? ¿Cómo se representan las nubes? Esto me llevó por la madriguera del conejo de la representación volumétrica utilizando la marcha de rayos. Eventualmente aterricé en esta pequeña y maravillosa guía sobre nubes volumétricas del blog de gráficos de Chris.

Después de averiguar un poco, pude convertir el código de Chris de uno que genera nubes en función de cómo reflejan la luz, a uno que genera gas brillante en función de la atenuación y la emisión. Ah, e introduce un efecto que simplemente olvidé, donde el brillo escala con la cuarta potencia de la temperatura, de acuerdo con la ley de Stefan-Boltzmann.



**Figura 14.**

Ahora estoy feliz con ESTO, estoy realmente emocionado. Dicho esto, hay un efecto más que quiero incluir antes de darlo por terminado. Hasta ahora no he tenido en cuenta el hecho de que la luz tarda un poco en llegar a nuestros ojos, especialmente cuando el tiempo se desvía y miramos a distancias enormes como esta. Entonces, en lugar de ver la rotación del disco en un momento dado, deberíamos ver su rotación en el momento en que golpea el rayo. Con eso obtenemos esta nítida curvatura de la forma del disco a lo largo de un lado:



**Figura 15.**

### **¿Eso es todo?**

A pesar de lo feliz que estoy con esto, todavía hay algunas cosas que quiero implementar. Finalmente. Por ahora estoy cansado y necesito reenfocarme en otros proyectos. Pero más adelante hay revisiones futuras:

#### *Cambiar agujero negro a métrica de Kerr*

- La métrica de Schwarzschild es poderosa, pero realmente solo describe un cuerpo que no está girando, y eso rara vez sucede en la naturaleza, es muy difícil mantener exactamente un momento angular cero. Cuando los agujeros negros giran, terminas obteniendo una nueva física realmente interesante, cosas como el espacio-tiempo mismo siendo arrastrado en un círculo.
- El problema con la métrica de Kerr es que es algebraicamente muy desordenada. Si bien me gustaría dejarlo caer durante esta primera revisión, necesito tomar algunos derivados de la métrica y son demasiado complicados para mí para hacerlo a mano y no estropearlos. Espero aprender algún tipo de sistema de álgebra computacional para que lo haga por mí.

## Simulación de fluidos/partículas para disco de acreción

- En última instancia, todavía estoy configurando la rotación del disco de acreción a mano, y todo lo que se configura a mano no es completamente físico. Existe una teoría profunda sobre cómo los pequeños fragmentos viscosos del disco se agrupan y se separan, pero todo es material nuevo para mí y realmente necesito absorberlo antes de intentar implementarlo.
- He escrito simulación de fluidos y simulación de partículas antes, y son divertidas de hacer, así que espero encontrar una forma efectiva de usarlas para hacer un disco de acreción que luzca realmente realista. Si puedo incorporar algo como la "teoría de la onda de densidad", tal vez pueda hacer que generen naturalmente cosas como brazos espirales. Podría ser genial.

### Parte 3: Entonces, ¿qué estoy mirando exactamente?

Finalmente, echemos un vistazo a algunos de los fenómenos interesantes que puedes ver en una de estas imágenes.

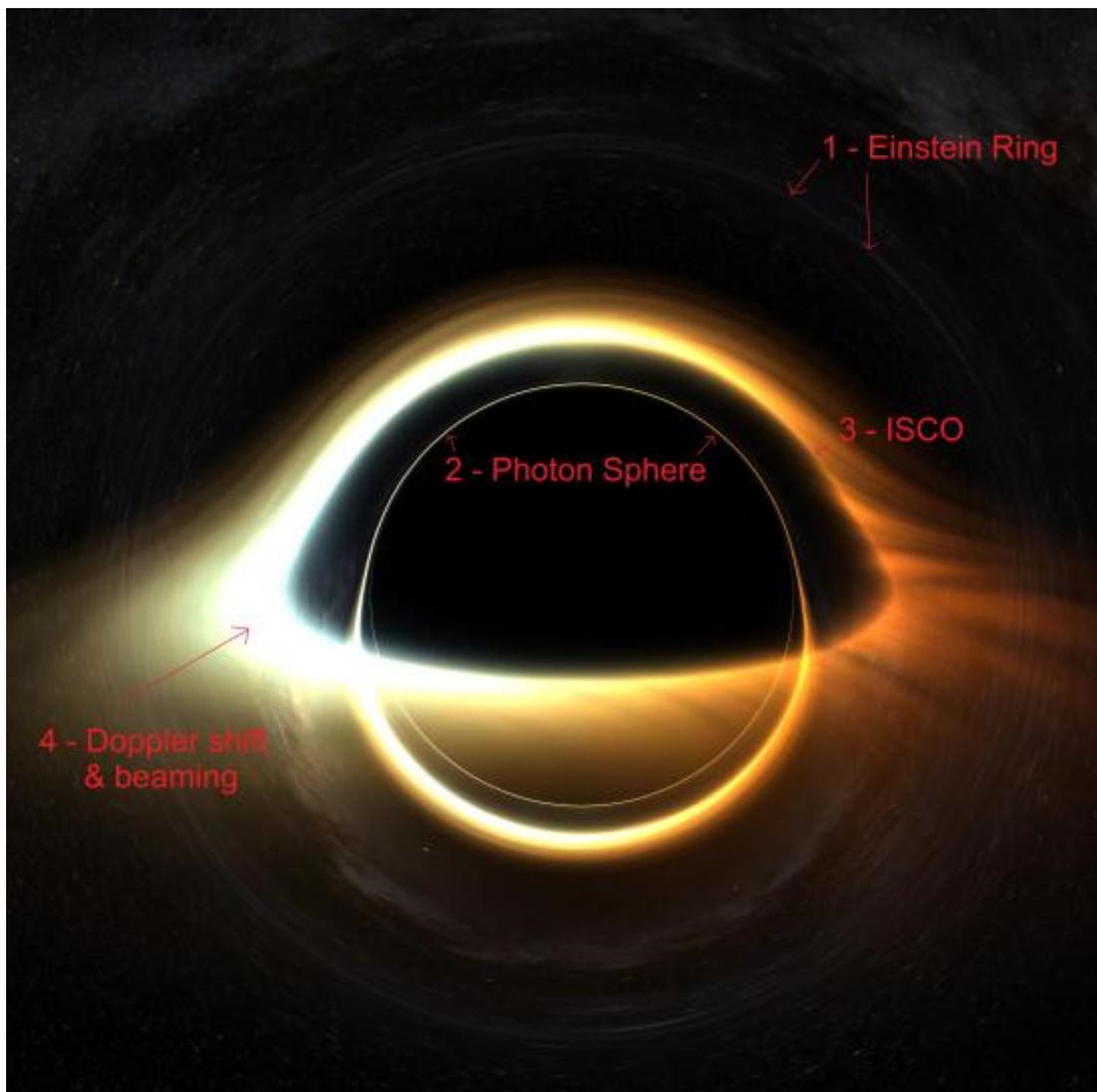


Figura 16.

1 – Anillo de Einstein

Alrededor del agujero negro se puede ver un anillo borroso en la imagen de fondo. Este es el punto donde la "lente" gravitacional se enfoca, conocida como el "anillo de Einstein". Si mira más adentro, verá la misma imagen que afuera, pero volteada y sesgada.

Un buen efecto secundario de esto es que si coloca un objeto directamente en este punto focal detrás del agujero negro, aparecerá como un anillo alrededor del agujero negro. Wikipedia tiene algunas imágenes claras de esto que ocurre en la naturaleza.

## 2 – Esfera de fotones

El delgado anillo de luz más interno corresponde a la órbita inestable más estrecha de un haz de luz, la "esfera de fotones". Estaba muy emocionado cuando esto apareció en el renderizado, ya que es completamente un resultado de la métrica. Nunca ha habido una imagen de suficiente resolución de un agujero negro para ver este fenómeno en la vida real, pero para mí es la parte visualmente más interesante.

## 3 – Órbita circular estable más interna

También conocido como ISCO. Este es el radio más cercano en el que cualquier objeto masivo puede orbitar sin ser absorbido por el agujero negro y, por lo tanto, es donde comienza el disco. El ISCO es un fenómeno completamente relativista, ya que para un objeto no relativista siempre puedes orbitar más cerca si te mueves más rápido.

## 4 – Desplazamiento y transmisión Doppler

En el lugar que se muestra en la imagen, la materia en el disco de acreción se dirige hacia el observador, muy rápido. Esto provoca los efectos combinados de que se vuelve más brillante y más azul.

El cambio Doppler, que hace que la luz sea azul, es el mismo que el cambio Doppler que hace que la sirena de la policía suene más aguda cuando se dirige hacia usted, excepto que con ondas de luz en lugar de ondas de sonido. El brillo se debe a la emisión relativista, o el "efecto de faro", un resultado de la relatividad que hace que los objetos brillantes sean más brillantes cuando se dirigen hacia ti.

## Referencias

- [1] Minute Physics – Intro to Special Relativity – <https://www.youtube.com/watch?v=1rLWVZVWfdY>
- [2] Cayetano Benavent – Geographica: Geodesic Lines & GIS – <http://www.blog-geographica.com/2015/06/11/geodesic-lines-gis/>
- [3] Wikipedia – Schwarzschild Metric – [https://en.wikipedia.org/wiki/Schwarzschild\\_metric](https://en.wikipedia.org/wiki/Schwarzschild_metric)
- [4] Wikipedia – Spherical Coordinate System – [https://en.wikipedia.org/wiki/Spherical\\_coordinate\\_system](https://en.wikipedia.org/wiki/Spherical_coordinate_system)
- [5] Three Eyed Games – GPU Ray Tracing in Unity – <http://three-eyed->

- [games.com/2018/05/03/gpu-ray-tracing-in-unity-part-1/](https://games.com/2018/05/03/gpu-ray-tracing-in-unity-part-1/)
- [6] Riazuelo, Alain – Seeing Relativity – <https://arxiv.org/pdf/1511.06025.pdf>
  - [7] Bacchini, F. et al. – Generalized, Energy-conserving Numerical Simulations of Particles in General Relativity – <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4365/aac9ca/pdf>
  - [8] Chandler Abraham – A Beginner-s Guide to (CIE) Colorimetry – <https://medium.com/hipster-color-science/a-beginners-guide-to-colorimetry-401f1830b65a>
  - [9] Cole Miller – ASTR 498, Lectures on High Energy Astrophysics – <https://www.astro.umd.edu/~miller/teaching/astr498/>
  - [10] Cern Courier – Building Gargantua – <https://cerncourier.com/a/building-gargantua/>
  - [11] Inigo Quilez – fBM – <https://www.iquilezles.org/www/articles/fbm/fbm.htm>
  - [12] Vivo & Lowe – The Book of Shaders: Fractal Brownian Motion – <https://thebookofshaders.com/13/>
  - [13] Chris' Graphics Blog – Volumetric Rendering Part 1 & 2 – <https://wallisc.github.io/rendering/2020/05/02/Volumetric-Rendering-Part-1.html>
  - [14] Wikipedia – Einstein Ring – [https://en.wikipedia.org/wiki/Einstein\\_ring](https://en.wikipedia.org/wiki/Einstein_ring)

Artículo traducido del original por Juan F. González. Créditos y código cortesía (con los derechos oportunos) de Sean Holloway [https://web.archive.org/web/20220422113100/https://github.com/HollowaySean/BlackHoleViz\\_v2](https://web.archive.org/web/20220422113100/https://github.com/HollowaySean/BlackHoleViz_v2)

## 24. ¿Agujeros de gusano en procesadores cuánticos?

[Editar](#)

Ha resultado polémica la publicación en los medios de los resultados del siguiente artículo:

***Traversable wormhole dynamics on a quantum processor***  
Nature. DOI: [10.1038/s41586-022-05424-3](https://doi.org/10.1038/s41586-022-05424-3) (live November 30 2022 16:00 UTC) Daniel Jafferis, Alexander Zlokapa, Joseph D. Lykken, David K. Kolchmeyer, Samantha I. Davis, Nikolai Lauk, Hartmut Neven, and Maria Spiropulu.



**Figura 1.** Representación gráfica del agujero de gusano transitado en un procesador cuántico. Un qubit se transmite utilizando el mismo mecanismo microscópico de teletransportación cuántica que aparece en un agujero de gusano atravesable. El qubit se visualiza aquí como una función de onda: posee propiedades ondulatorias y se propaga a través del espacio-tiempo, lo que representa la compleja mancha de la información del qubit a medida que atraviesa el agujero de gusano. Nuestro experimento codificó toda la información del espacio-tiempo en un circuito cuántico en una computadora cuántica, por lo que representamos el espacio-tiempo como tejido a partir de un diagrama de circuito cuántico. Las cajas y las conexiones entrelazadas a través de los cables qubit en el diagrama del circuito muestran puertas cuánticas. Se destacan algunas puertas, ya que manipulamos puertas particulares para extraer diferentes propiedades del espacio-tiempo en diferentes instancias en el tiempo. Crédito de la imagen: inqnet/A. Müller.

Se recomienda la lectura o visualización previa de los siguientes recursos:

**Vídeo 1.**

**Vídeo 2.**

[Caltech note.](#)

[Fermilab note.](#)

[MIT note.](#)

[Google note.](#)

## **Forthcoming: Harvard Press Notice (coming).**

### **Resumen sencillo**

En 2015, Alexei Kitaev demostró que un sistema dinámico cuántico simple de fermiones, llamado modelo Sachdev-Ye-Kitaev (SYK), exhibe una "dualidad holográfica" explícita, lo que significa que tiene una dinámica cuántica que se parece a los efectos de la gravedad cuántica en un estado emergente. espacio. Esto sugiere la posibilidad de hacer experimentos de gravedad cuántica en procesadores cuánticos.

En 2019, Gao y Jafferis demostraron que al entrelazar dos modelos SYK, uno debería poder realizar una "teletransportación de agujeros de gusano", produciendo y midiendo las propiedades dinámicas esperadas de un agujero de gusano transitable en un espacio emergente. Un agujero de gusano (como lo acuñó John Wheeler) es un puente de Einstein-Rosen entre dos regiones remotas del espacio-tiempo. En la teoría general de la relatividad, no se permite que nada pase a través de un agujero de gusano si las fluctuaciones de energía positiva y negativa están equilibradas. Como lo demostraron Gao, Jafferis y Wall en 2016, una onda de choque de energía negativa puede mantener abierto el agujero de gusano y permitir la transitabilidad. Hawking en 1975 ya señaló que la radiación de Hawking de un agujero negro, vista por un observador fiduciario cerca del horizonte, también parece pulsos de energía negativa que entran en el agujero negro.

Un equipo de físicos realizó este tipo de dinámica de agujero de gusano de forma experimental en un dispositivo cuántico de Google, a saber, el procesador cuántico Sycamore. Usando puertas cuánticas, el equipo insertó un qubit en un sistema similar a SYK y observó la información que emerge del otro sistema similar a SYK en el mismo procesador cuántico. Se considera que la dinámica del proceso es consistente con el comportamiento esperado de un sistema cuántico dual a un agujero de gusano en un espacio-tiempo bidimensional anti-de Sitter (AdS). Estas dinámicas requerirían nominalmente un sistema cuántico con una cantidad arbitrariamente grande de fermiones, es decir, una cantidad arbitrariamente grande de qubits en un experimento. A medida que se reduce el número de fermiones, el comportamiento gravitacional resultante se vuelve menos conocido desde una perspectiva teórica debido a las correcciones de la teoría de cuerdas. Aunque es difícil a priori escribir un sistema cuántico que se asemeje a la gravedad cuando se consulta a través del diccionario de "dualidad holográfica", el equipo empleó técnicas de aprendizaje para encontrar un sistema cuántico tan pequeño y simple que pudiera codificarse en las arquitecturas cuánticas actuales. y eso preservaría las propiedades gravitatorias.

El sistema cuántico producido por técnicas de aprendizaje y fue sometido a una serie de controles adicionales. En este trabajo, los físicos informan sobre el comportamiento esperado tanto desde la perspectiva de la gravedad como desde la información cuántica. Por ejemplo, mientras que los efectos de la mecánica cuántica pueden transmitir información a través de un sistema cuántico en una variedad de formas, el orden temporal causal de los eventos debe cumplirse si la información que se propaga a través de un sistema cuántico es dual a las señales que viajan a través del espacio-tiempo. El equipo muestra que si el agujero de gusano se mantiene abierto durante el tiempo suficiente por las ondas de choque de energía negativa, se establece un camino causal entre los dos sistemas cuánticos SYK. Verificaron estas y otras propiedades con cálculos informáticos clásicos.

En el procesador Sycamore, midieron cuánta información cuántica pasó de un sistema SYK a otro al aplicar una onda de choque de energía negativa versus positiva. Se transfirió más información cuántica cuando se usó una onda de choque de energía negativa, es decir, la dinámica observada fue consistente con el sistema cuántico siendo dual a un agujero de gusano atravesable. Debido a la sensibilidad del protocolo al ruido, la alta fidelidad del procesador cuántico utilizado fue fundamental. Por ejemplo, si las tasas de error fueran un 50% más altas, la señal se habría oscurecido por completo. Si las tasas de error fueran la mitad, se observaría unas diez veces la señal.

El trabajo constituye un paso hacia un programa más amplio de sondeo de física gravitacional utilizando una computadora cuántica. No sustituye a las pruebas directas de la gravedad cuántica de la misma manera que otros experimentos futuros planificados que podrían probar los efectos de la gravedad cuántica en el futuro utilizando la detección cuántica, pero ofrece un poderoso banco de pruebas para ejercitar ideas sobre la gravedad cuántica.

### **Protocolo de agujero de gusano transitable**

Discutimos el circuito cuántico que describe una partícula que atraviesa un agujero de gusano en el dual holográfico. A lo largo de los siguientes pasos, requerimos un sistema cuántico (al que los físicos se refieren como "Hamiltoniano", la descripción microscópica del sistema) denotado por  $H$ . Solo algunos sistemas  $H$  son duales a la gravedad; el [modelo SYK](#) es un ejemplo de  $H$  conocido por los físicos teóricos por tener un dual gravitatorio. En este trabajo, a través de un proceso de aprendizaje que comienza con un modelo SYK, los investigadores diseñaron un nuevo sistema  $H$  similar a SYK con propiedades gravitacionales. Una vez que se identifica un sistema lo suficientemente pequeño, y aún dual a la gravedad, se sabe que el siguiente protocolo es equivalente a atravesar un agujero de gusano.

1. Prepare un estado entrelazado entre dos copias de  $H$ : una es el lado izquierdo del agujero de gusano y la otra es el lado derecho del agujero de gusano. Este estado entrelazado es dual a un agujero de gusano en el tiempo  $t=0$ . El pequeño sistema similar a SYK ideado a través del aprendizaje tiene 7 fermiones de Majorana a la izquierda y 7 fermiones de Majorana a la derecha; codificar los 14 fermiones en qubits superconductores requiere 7 qubits.

1. Evolucionar el agujero de gusano hacia atrás en el tiempo según  $H$ . Esto mueve los horizontes de las bocas izquierda y derecha del agujero de gusano.

1. Prepare dos qubits entrelazados al máximo: llame a uno el qubit de "referencia" y al otro el qubit de "sonda". Más tarde intentamos enviar el qubit de sonda a través del agujero de gusano y podremos verificar si lo logró comparándolo con el qubit de referencia. Estos dos qubits adicionales elevan el tamaño total del circuito a 9 qubits.

1. Intercambie el qubit de la sonda con uno de los qubits en el sistema cuántico izquierdo del agujero de gusano. Esto inserta el qubit de la sonda de entrelazamiento en el agujero de gusano.

1. Haga evolucionar el agujero de gusano hacia adelante en el tiempo de acuerdo con  $H$ . Mientras esto sucede, la información del qubit de la sonda se codifica caóticamente en todo el sistema cuántico.

1. Aplique una interacción entrelazada entre los dos lados del agujero de gusano. En el dual gravitacional, esto corresponde al envío de una onda de choque de energía a través del espacio-tiempo. Podemos aplicar una interacción que proporcione energía negativa a esta onda de choque

para abrir el agujero de gusano y hacerlo transitable, o podemos elegir una onda de choque de energía positiva para cerrar el agujero de gusano y evitar que la información se transmita.

1. Haga evolucionar el agujero de gusano hacia delante en el tiempo de acuerdo con H. Mientras esto sucede, la información del qubit de la sonda sufre una dinámica caótica adicional. La dinámica reenfoca la información en el lado derecho del agujero de gusano.

1. Mida la cantidad de entrelazamiento entre el qubit más a la derecha del sistema correcto y el qubit de referencia. Más entrelazamiento significa que se transfirió más información del sistema izquierdo al sistema derecho. En nuestro experimento, observamos más enredos cuando se utilizó una onda de choque de energía negativa en comparación con una onda de choque de energía positiva, lo que es consistente con la interpretación de que parte de la información cuántica se transfirió a través del mecanismo de agujero de gusano transitable.

## **Glosario**

### *principio holográfico/dualidad*

Un diccionario, desarrollado por Juan Maldacena de IAS Princeton y otros físicos teóricos, que traduce entre 1) física en un tipo especial de espacio-tiempo con gravedad y 2) un sistema cuántico sin gravedad pero con entrelazamiento cuántico. Se dice que un sistema cuántico es "dual" a una configuración de espacio-tiempo cuando las dos configuraciones describen una física equivalente. El tipo especial de espacio-tiempo se denomina espacio anti-de Sitter (AdS); a diferencia del espacio-tiempo ordinario en el que vivimos, el espacio anti-de Sitter tiene una curvatura negativa constante.

Nótese bien: Para el sistema cuántico implementado en este trabajo, al que se puede hacer referencia como SYK 'bebé', se desconoce el dual gravitacional exacto; sin embargo, la dinámica y las propiedades del sistema cuántico son consistentes con la existencia de un dual gravitacional.

### *ER = conjetura EPR*

Conjetura de los físicos teóricos Lenny Susskind de Stanford y Juan Maldacena de IAS, Princeton (2013) de que los agujeros de gusano son equivalentes al entrelazamiento cuántico. La conjetura es que los agujeros de gusano y la física cuántica, específicamente el entrelazamiento (un fenómeno en el que dos partículas pueden permanecer conectadas a través de grandes distancias), pueden tener una conexión. Los físicos especularon que los agujeros de gusano (o "ER") eran equivalentes al entrelazamiento (también conocido como "EPR" por Albert Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen en trabajos del siglo anterior (1935)).

### *agujero de gusano holográfico / agujero de gusano atravesable*

Un puente entre dos regiones del espacio-tiempo en un modelo especial de espacio-tiempo (espacio anti-de Sitter), tal que una partícula puede entrar por un lado del agujero de gusano y emerger por el otro lado del agujero de gusano. No todos los agujeros de gusano son transitables; una partícula que entra en un agujero de gusano no atravesable no emergerá por el otro lado. Los únicos agujeros de gusano que se sabe que se pueden atravesar también se describen mediante un sistema cuántico dual (en nuestro caso, el llamado sistema cuántico SYK) a través del principio holográfico.

### *gravedad cuántica*

Una teoría de la gravedad que describe los fenómenos gravitacionales en el lenguaje de la mecánica cuántica.

### *procesador cuántico*

Un chip que consta de qubits que implementa interacciones físicas entre los qubits para realizar efectos mecánicos cuánticos.

### *qubit*

Una generalización cuántica del bit clásico (0 o 1). Se describe mediante una superposición de estados 0 y 1 con una fase relativa mecánica cuántica entre los dos estados.

### *modelo SYK*

Un sistema cuántico que consta de fermiones de Majorana acoplados con fuerzas de acoplamiento aleatorias. En nuestro experimento, usamos un modelo similar a SYK ya que tiene acoplamientos que se aprenden en lugar de aleatorios. Nombrado en honor a los físicos Alexei Kitaev, Subir Sachdev y Jinwu Ye.

## **Preguntas y respuestas**

P: ¿Qué es un agujero de gusano en términos sencillos? ¿El equipo creó una ruptura en el espacio-tiempo en este experimento?

R: Un agujero de gusano (acuñado por John Wheeler) es un puente de espacio-tiempo teórico entre dos regiones remotas del universo. Tales agujeros de gusano son consistentes con la teoría de la relatividad general de Einstein, pero no se han visto ni observado experimentalmente. En su configuración más simple, los agujeros de gusano no permiten que nada los atraviese: no son transitables.

No, en este experimento no se creó ninguna ruptura del espacio-tiempo en el hardware del espacio físico. Se dedujo que había surgido un agujero de gusano transitable en función de la información cuántica que se teletransportaba utilizando códigos cuánticos en el procesador cuántico.

P: ¿Puede explicar el papel de la computación clásica en el modelo "bebé" de gravedad cuántica que construyó?

R: Para encontrar un sistema cuántico pequeño que tenga propiedades gravitatorias, usamos técnicas de aprendizaje automático. Esto requería una computadora clásica para ejecutar simulaciones y producir sistemas cuánticos candidatos que se pensaba que preservaban la dinámica gravitacional. Luego, el equipo realizó más simulaciones y verificaciones en computadoras clásicas para identificar el comportamiento gravitacional. Dada una computadora cuántica con tasas de error más bajas, todas las técnicas de aprendizaje y simulaciones adicionales podrían ejecutarse de manera más eficiente utilizando una computadora cuántica.

P: En el documento, el equipo se refiere a esto como un experimento cuántico en lugar de una simulación cuántica. ¿Puedes explicar? ¿Es esta una sonda de gravedad cuántica, digamos, como la supersimetría de las sondas del LHC?

R: El equipo llama a esto un "experimento cuántico" porque prepararon un sistema altamente entrelazado y midieron directamente los observables del sistema físico. Uno puede "simular" el sistema en una computadora convencional y, de hecho, esto se hizo como se informa en este documento, no se crea ningún sistema físico en una simulación convencional que es la manipulación de bits clásicos (ceros y unos). El uso del término "experimento cuántico" en lugar de "simulación cuántica" resalta esta diferencia. Se teoriza que el sistema cuántico que el equipo realizó es dual al comportamiento gravitacional de acuerdo con una teoría de la gravedad cuántica en un tipo de espacio-tiempo diferente al nuestro (el AdS). Esto es completamente diferente de los experimentos en el LHC, que producen y miden la física natural del mundo que nos rodea.

## **Historia**

Se agregará aquí una sección de importantes desarrollos teóricos de la historia del siglo XX y especialmente del siglo XXI relevantes para este trabajo. Hay un enorme motor teórico de ingenio sobre el que descansa este trabajo. Vuelve pronto para leer sobre ello.

## **Posibles malentendidos de "Dinámica de agujero de gusano transitible en un procesador cuántico"**

P: ¿Afirmamos haber producido u observado una deformación de agujero de gusano del espacio-tiempo de 3+1 dimensiones?

R: No.

P: ¿Qué observamos?

R: Observamos fenómenos producidos por el procesador cuántico Sycamore que son consistentes con la dinámica de un agujero de gusano atravesable. Los fenómenos observados pueden caracterizarse igualmente como una forma particular de teletransportación cuántica. El hecho de que haya dos descripciones aparentemente equivalentes es consistente con la hipótesis ER=EPR de Maldacena y Susskind.

P: ¿Era esto una simulación entonces?

R: Es convencional llamar a cualquier proceso en un dispositivo cuántico digital o analógico una "simulación cuántica", por lo que no nos oponemos a esta caracterización. Sin embargo, existe una diferencia crucial entre una simulación clásica (en una computadora convencional) de teletransportación cuántica y un protocolo de teletransportación cuántica en un procesador cuántico. En una simulación clásica, no se produce un entrelazamiento cuántico en la CPU, mientras que cuando nos damos cuenta del protocolo en una QPU hay un entrelazamiento y la teletransportación cuántica en realidad ocurre como un evento físico. En la medida en que se aplique la hipótesis ER=EPR, la dinámica del agujero de gusano atravesable es una descripción equivalente de este evento físico.

P: Si no abrimos un agujero en el espacio-tiempo real, ¿cómo puede ser que la dinámica del agujero de gusano atravesable sea una característica de un evento físico real?

R: Maldacena, Stanford y Yang demostraron en 2017 que debería ser posible usar dos copias entrelazadas del modelo SYK para exhibir la dinámica de un agujero de gusano transitable en un espacio-tiempo casi  $AdS^2$ . La dinámica de SYK no depende de las coordenadas espaciales, mientras que  $AdS^2$  tiene una dimensión espacial que proporciona la ruta transitable del agujero de gusano. En analogía con la física de la materia condensada, se puede decir que la dimensión espacial es "emergente" de la dinámica cuántica. Esto también debería aplicarse a nuestro experimento, con las advertencias de que usamos una versión dispersa del modelo SYK, un régimen algo diferente de los parámetros del modelo, y no pudimos escribir el dual gravitatorio explícito del sistema cuántico. Si bien  $AdS^2$  es relevante para la descripción "en bloque" emergente, para nuestro modelo de  $N$  pequeña no conocemos todas las correcciones de  $N$  pequeña.

P: ¿Qué es lo nuevo que aprendimos sobre la gravedad cuántica en este estudio?

R: Aprendimos que la conjetura del tamaño del devanado, que el grupo de Stanford propuso solo a partir del único ejemplo del modelo SYK, puede ser correcta también en el límite de  $N$  pequeño, ya que surgió en nuestro hamiltoniano aprendido "naturalmente", es decir, lo hicimos no imponerlo en la caja de herramientas de aprendizaje automático que usamos para dispersar los 210 términos  $N = 10$  hamiltonianos.

P: ¿Nuestros resultados tienen alguna relevancia entonces para la posibilidad de realizar otros experimentos útiles de gravedad cuántica?

R: Sí. Nuestros resultados respaldan la idea de que es posible sondear la dinámica de agujeros de gusano atravesables utilizando sistemas cuánticos relativamente pequeños realizables en procesadores cuánticos. En nuestro caso, el sistema era lo suficientemente pequeño como para poder simularlo completamente de forma clásica también, pero era demasiado grueso para que pudiéramos investigar preguntas detalladas. Ahora imagine escalar hasta versiones de  $\sim 100$  qubit: tales sistemas no se pueden simular en computadoras clásicas, y uno anticipa una descripción general lo suficientemente detallada como para sondear algunas características detalladas del interior del agujero de gusano emergente.

### **Expresiones de gratitud/Agradecimientos**

El experimento se realizó en colaboración con el equipo de hardware de Google Quantum AI, bajo la dirección de A. Megrant, J. Kelly e Y. Chen. Reconocemos el trabajo del equipo en la fabricación y empaque del procesador; construir y equipar los sistemas criogénicos y de control; ejecutar calibraciones de referencia; optimizar el rendimiento del procesador; y proporcionar las herramientas para ejecutar el experimento. El equipo de físicos dirigido por V. Smelyanskiy desarrolló métodos de calibración de dispositivos especializados. En particular, agradecemos a X. Mi y P. Roushan por su apoyo técnico en la realización del experimento y agradecemos a B. Kobrin por sus útiles debates y estudios de validación. Este trabajo cuenta con el apoyo de la subvención SC0019219 del programa QuantISED de la Oficina de Física de Alta Energía del Departamento de Energía sobre Canales de Comunicación Cuántica para Física Fundamental. Además, A. Z.

reconoce el apoyo de la Fundación Hertz, el Departamento de Defensa a través del Programa de Becas para Graduados en Ingeniería y Ciencias de la Defensa Nacional y el programa de investigación de Redes y Tecnologías Cuánticas Inteligentes (INQNET) de Caltech. S.I.D cuenta con el apoyo parcial de la Fundación Brinson. Fermilab es operado por Fermi Research Alliance, LLC bajo el número de contrato DEAC02-07CH11359 con el Departamento de Energía de los Estados Unidos. Agradecemos a A. Kitaev, J. Preskill, L. Susskind, P. Hayden, A. Brown, S. Nezami, J. Maldacena, N. Yao, K. Thorne y D. Gross por sus interesantes debates y comentarios que ayudaron a mejorar el manuscrito. También agradecemos al estudiante graduado O. Cerri por el análisis de errores de los datos experimentales. EM. agradece a los miembros del QCCFP QuantISED Consortium y reconoce a P. Dieterle por la minuciosa inspección del manuscrito.

La representación gráfica/artística del agujero de gusano atravesable fue realizada por el estudiante graduado A. Mueller.

Cita para amar (¡de este artículo de PRL en 1988[2]!)

“Uno puede imaginar una civilización avanzada sacando un agujero de gusano de la espuma cuántica y agrandándolo al tamaño clásico. Esto podría analizarse mediante técnicas que ahora se están desarrollando para el cálculo de la producción espontánea de agujeros de gusano mediante túneles cuánticos”.

### **El equipo QCCFP de 'Gusanos'**

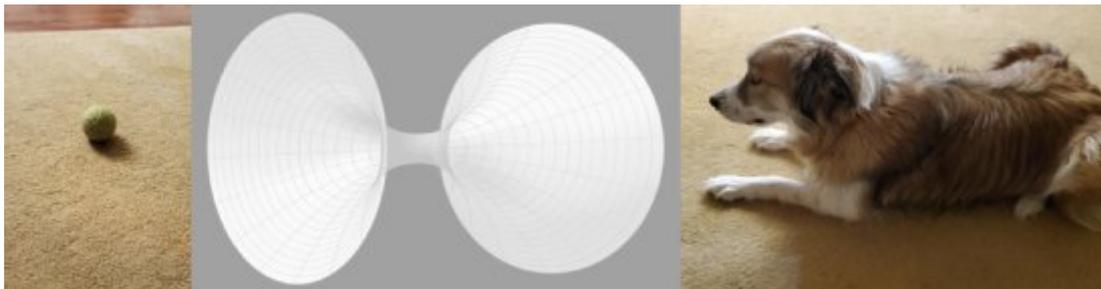


**Figura 2.** Arriba: Jafferis, Zlokapa, Davis, Kolchmeyer; abajo Lauk, Lykken, Neven, Spiropulu  
© 2022 Agujero de gusano2022. Reservados todos los derechos.

### **¿Enviar a tu perro a través de un agujero de gusano?**

¡Un agujero de gusano! ¡Qué concepto tan asombroso: un túnel secreto que conecta dos regiones diferentes del espacio! ¿Podrían existir los reales? ¿Podríamos nosotros, o nuestros perros, viajar

a través de ellos y visitar otras galaxias a miles de millones de años luz de distancia y volver para contárselo a todos? Menciono a los perros debido a un comentario, citado en The Guardian y en otros lugares, de mi amiga y colega, la experimentalista Maria Spiropulu. Spiropulu es una de las autoras principales del artículo relacionado con los agujeros de gusano que ha recibido tanta atención la semana pasada, y ella estaba explicando de qué se trataba. “La gente viene a mí y me pregunta: ‘¿Puedes poner a tu perro en el agujero de gusano?’ Entonces, no”, dijo Spiropulu a los periodistas durante una sesión informativa en video. "... Ese es un gran salto". Por esto, no puedo resistirme a burlarme un poco de Spiropulu. Ha realizado muchos años de trabajo importante en el Gran Colisionador de Hadrones y anteriormente en el Tevatron, antes de asumir la computación cuántica y la simulación de agujeros de gusano. Pero, ¡ay! La idea de que este tipo de investigación podría conducir a un agujero de gusano que un perro podría atravesar... eso es más que un gran salto de imaginación. ¡Es un gran salto directamente fuera de la realidad!



**Figura 3.** Estuve tratando de entrenar a nuestra perra, Phoebe, para que lance una pelota a través de un agujero de gusano. Parece ansiosa pero nerviosa.

### ¿Cuál es el problema?

Hace décadas había un famoso comediante llamado Henny Youngman. Contó el siguiente chiste, que, como yo no soy comediante, parafrasearé.

Conozco a un tipo que quería poner una trampa para ratones pero no tenía queso en su refrigerador. Así que cortó una imagen de un trozo de queso de una revista y la usó en su lugar. Justo antes de acostarse, escuchó que la trampa se cerraba, así que fue a mirar. En la trampa había una imagen de un ratón.

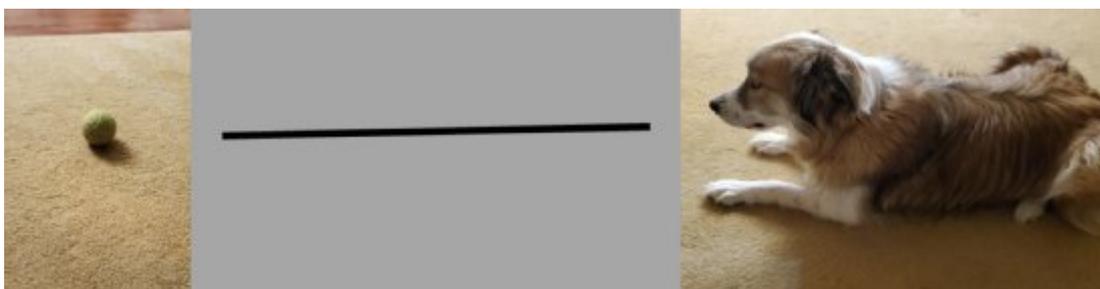
Bueno, con eso en mente, considera esto:

¡El queso imaginario no puede atrapar un ratón real, y un agujero de gusano imaginario no puede transportar a un perro real!

Como expliqué en [mi última publicación](#), el artículo reciente relacionado con el agujero de gusano trata sobre una simulación artificial de un agujero de gusano... de ahí el título, "Dinámica de agujero de gusano transitable en un procesador cuántico", en lugar de "Primera creación de un agujero de gusano". En realidad, ni siquiera están simulando el agujero de gusano directamente. Como describí, la simulación es de algunas partículas estacionarias, no partículas reales, solo simuladas, representadas en una computadora, y las interacciones (simuladas) de esas partículas crean un efecto especial que actúa, de alguna manera, como un (simulado) agujero de gusano [La matemática de esto se llama [el modelo SYK](#), o una versión simplificada del mismo.]

Este es un truco muy chulo para simular artificialmente un agujero de gusano, que se puede cruzar de un lado a otro antes de que colapse. El truco fue inventado por teóricos en [este artículo](#) (ver también [éste](#)), siguiendo [esta idea pionera](#). Pero no es un truco para hacer un verdadero agujero de gusano. Además, este es un agujero de gusano simulado en una dimensión espacial, no las tres en las que vivimos. En este sentido, es una caricatura de un agujero de gusano, como una figura de palo, sin carne ni sangre.

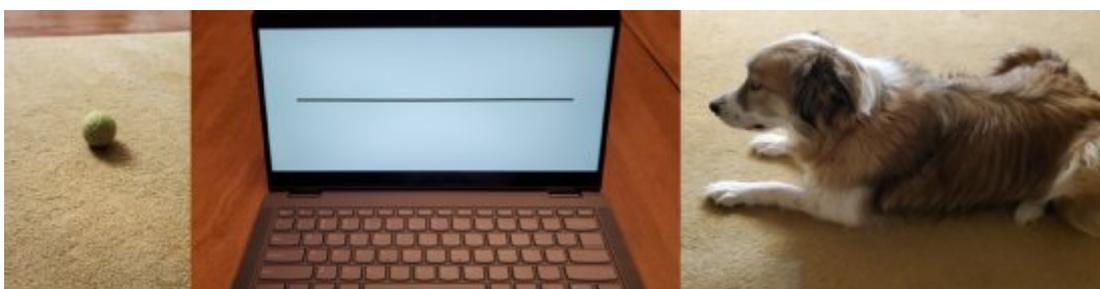
Incluso si se tratara de un verdadero agujero de gusano unidimensional, no puedes esperar enviar un perro tridimensional a través de él. Ni siquiera podrías enviar un átomo tridimensional a través de un agujero de gusano unidimensional. Las dimensiones no funcionan de esa manera.



**Figura 4.** Pensé que tal vez podría facilitarle la idea comenzando con un agujero de gusano que fuera más simple y menos aterrador, solo unidimensional en lugar de tridimensional. Pero ella no se movió.

Recuerda, este agujero de gusano no existe en el mundo real; está siendo representado por los bits de la computadora. En cierto sentido, está siendo pensado, representado en la cruda memoria de la computadora. Pruébelo: imagine un agujero de gusano (no importa qué tan preciso sea). Imagine un perro que ahora lo atraviesa. Ok, acabas de hacer una simulación de un perro atravesando un agujero de gusano... un perro imaginario moviéndose a través de un agujero de gusano imaginario. Naturalmente, tu cerebro no hizo una simulación muy precisa. Carece de todas las matemáticas sofisticadas. Armado con esa matemática, la computadora puede hacer una simulación artificial de calidad profesional.

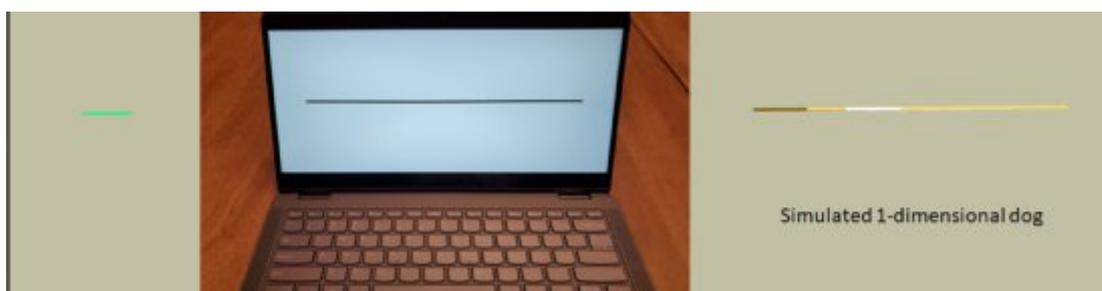
Pero así como no puedes tomar a tu perro real, el que acaricias y con el que juegas a buscar, y hacer que viaje a través del agujero de gusano que imaginaste en tu cerebro, no puedes tomar un perro real y pasarlo a través de una simulación de computadora de un agujero de gusano. Eso sería cierto incluso si ese agujero de gusano fuera tridimensional, en lugar de la caricatura unidimensional. Tampoco se puede tomar un átomo real, o incluso un fotón real [una partícula de luz], y enviarlo a través de un agujero de gusano imaginario simulado artificialmente. Solo un fotón, un átomo o un perro simulado artificialmente puede atravesar un agujero de gusano simulado artificialmente.



**Figura 5.** Entonces, pensando que podría tranquilizarla, traté de mostrarle cómo funcionan los agujeros de gusano simulando uno en una computadora. Observó atentamente y luego se lamió la pata.

Los agujeros de gusano en la naturaleza tienen que ver con la gravedad real. Los agujeros de gusano en una computadora tienen que ver con la gravedad matemáticamente simulada. La gravedad real atrae cosas reales y puede o no crear agujeros de gusano reales; tiene que obedecer las leyes de la naturaleza de nuestro universo. La gravedad imaginaria atrae cosas imaginarias y puede crear agujeros de gusano imaginarios; está mucho menos restringido, porque la persona que realiza la simulación puede hacer que la computadora considere todo tipo de universos imaginarios en los que las leyes de la naturaleza pueden ser muy diferentes a las nuestras. Los agujeros de gusano imaginarios pueden comportarse de todo tipo de formas que son imposibles en el mundo real. Por ejemplo, el mundo real tiene (al menos) tres dimensiones de espacio, pero en una computadora no hay problema para simular un universo con una sola dimensión de espacio... y eso es efectivamente lo que hicieron Spiropulu y sus colegas, siguiendo las propuestas de este documento y otros por expertos en gravedad cuántica.

Así que no confundamos lo real con lo artificialmente simulado. Y, por cierto, el hecho de que se haya utilizado una computadora cuántica en lugar de una ordinaria no cambia lo que es real con lo que no lo es. Los perros reales son cuánticos; las computadoras cuánticas son reales; ambos tienen que obedecer las leyes del mundo real. Pero cualquier cosa simulada en una computadora cuántica no es real y no necesita obedecer esas leyes.



**Figura 6.** “Tal vez ella necesita ver que no es peligroso”, pensé, así que le mostré una simulación de un perro unidimensional que pasaba con seguridad a través de mi agujero de gusano unidimensional simulado. Me miró, luego movió la cola y se tumbó en un aburrido montón tridimensional. Supongo que la pelota unidimensional no era lo suficientemente tentadora. ¿Qué pasa con los agujeros de gusano reales?

Dejando de lado estos agujeros de gusano simulados, ¿podrían existir agujeros de gusano reales y podrías enviar a tu perro a través de uno?

Hasta hace poco, hubo mucho debate sobre si los agujeros de gusano realmente tenían sentido; tal vez, se pensó, violan algunos principios profundos y están prohibidos en la naturaleza. Pero en los últimos años este debate se ha calmado. Discutiré esto con más detalle en mi próxima publicación. Pero aquí hay algunas cosas a tener en cuenta:

Se ha demostrado ([más directamente aquí, por Maldacena y Milekhin](#)) que en algunos universos imaginarios que no son tan diferentes del nuestro, es posible que existan agujeros de gusano lo suficientemente grandes como para que perros y humanos puedan viajar. PERO:

1. Una persona en ese universo no podría usarlos para viajar más rápido que la luz del punto A al punto B, es decir, no hay posibilidad de que estos agujeros de gusano puedan usarse para atravesar instantáneamente la mitad del universo y, por lo tanto, comunicarse más rápido que un mensaje enviado por ondas de radio fuera del agujero de gusano de A a B. Tampoco podían usarse para viajar en el tiempo al pasado.

1. Para evitar que los viajeros sean destrozados por las fuerzas de las mareas, las aberturas de estos agujeros de gusano deben ser inmensas, mucho, mucho más grandes que un humano. No son como las puertas redondas que ves en las películas de ciencia ficción.

1. Aunque el viajero del agujero de gusano sentiría que el viaje es corto, el tiempo de viaje desde el punto de vista de quienes están fuera del agujero de gusano sería espectacularmente largo. Si hiciera un viaje de ida y vuelta a través del agujero de gusano y regresara, sus amigos y familiares estarían muertos hace mucho tiempo cuando regresara.

1. La región dentro del agujero de gusano fácilmente podría volverse muy peligrosa; cualquier fotón que se filtre desde el otro lado se convertirá en rayos gamma extremos que bombardearán al viajero que pasa. Para evitar este y otros problemas similares, las enormes aberturas del agujero de gusano deben mantenerse aisladas y absolutamente prístinas.

1. Es difícil entender cómo producir agujeros de gusano estables como este en un universo cuya temperatura es tan alta como la nuestra (2,7 K sobre el cero absoluto).

1. Es difícil imaginar cómo se podría crear tal agujero de gusano a través de cualquier proceso natural o artificial. (Escribí aquí sobre por qué los agujeros de gusano reales, incluso si pueden existir en nuestro universo, son extremadamente difíciles de crear o manejar; y eso es cierto no solo para los macroscópicos lo suficientemente grandes para un perro sino también para los microscópicos. Lo mismo es cierto para los agujeros negros, que definitivamente existen en nuestro universo).

1. Por estas y/u otras razones, los grandes agujeros de gusano atravesables de este tipo pueden no ser posibles en nuestro universo; las leyes específicas de la naturaleza en la que vivimos pueden no permitir agujeros de gusano dignos de ese nombre, o al menos no grandes. Esta es una pregunta abierta y puede depender de hechos sobre nuestro universo que aún no conocemos.

Por lo tanto, no enviará a su perro a ningún viaje de este tipo. Es tremendamente poco realista.

Una nota final: si es posible, dentro de décadas o siglos, intentar la fabricación de agujeros de gusano microscópicos reales en un laboratorio conectado a la Tierra, no debe intentarse sin una revisión exhaustiva de seguridad. Los agujeros negros y los agujeros de gusano reales no se manejan fácilmente y pueden ser potencialmente muy peligrosos si algo sale mal. Sería terrible que uno se te escapara y se comiera a tu perro.



**Figura 7.** El karma del perro teletransportado...

### **¿Hemos creado un agujero de gusano? No, pero...**

Los científicos llegaron a los titulares la semana pasada por supuestamente generar un agujero de gusano. La investigación, publicada en Nature, involucra el uso de una computadora cuántica para simular un agujero de gusano en un modelo simplificado de física.

Poco después de que se diera a conocer la noticia, físicos y expertos en computación cuántica expresaron su escepticismo de que, de hecho, se hubiera creado un agujero de gusano.

La cobertura de los medios fue caótica. Los puntos de venta informaron que los físicos habían creado un agujero de gusano teórico, un agujero de gusano holográfico o tal vez un agujero de gusano pequeño y horrible, y que la computadora cuántica de Google sugiere que los agujeros de gusano son reales. Otros medios ofrecieron sobriamente la noticia de que no, los físicos no hicieron ningún agujero de gusano.

Si esto te tiene confundido, ¡no estás solo! ¿Que esta pasando?

**El secreto sucio está en la denominada equivalencia ER=EPR...**

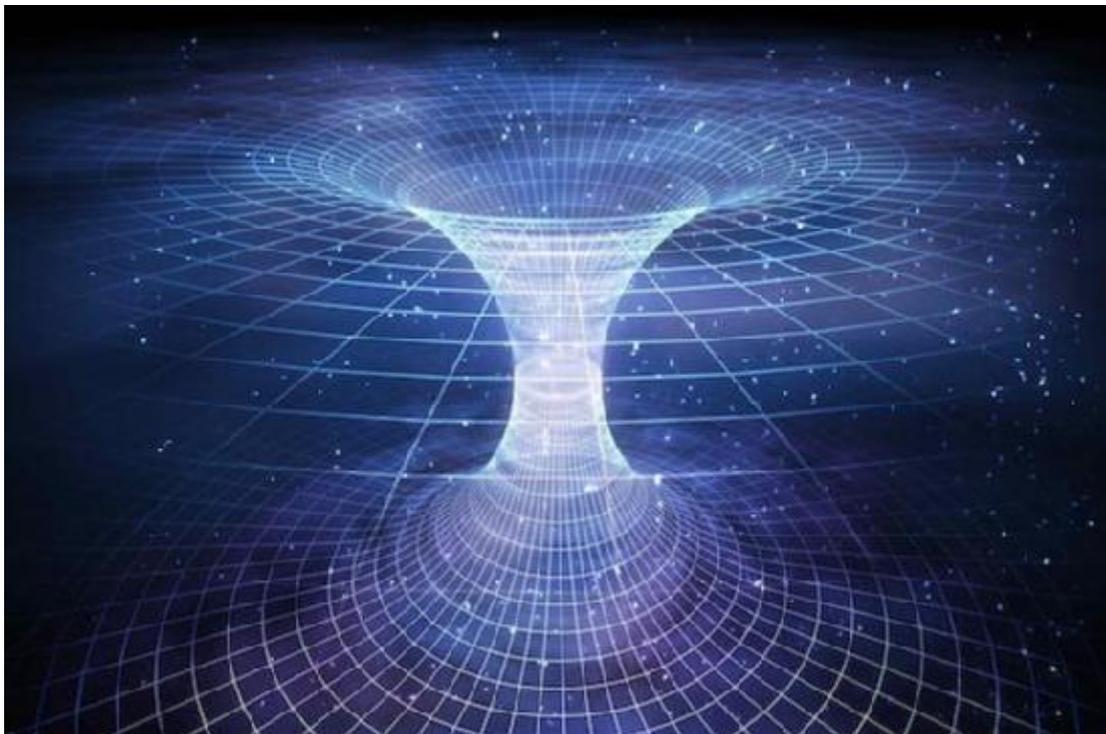
El universo es vasto. Es tan grande que viajar de un lado a otro por medios convencionales es poco práctico.

Los agujeros de gusano son una especie de escapatoria: atajos entre dos regiones del universo que podrían permitirle atravesar grandes distancias en un tiempo mucho más corto. Los agujeros de gusano están permitidos por la teoría de la relatividad de Einstein, pero nunca se ha encontrado ninguno en la naturaleza.

Recientemente, los físicos han estado jugando con la idea de que los agujeros de gusano están relacionados con otro fenómeno, conocido como entrelazamiento.

El entrelazamiento es un fenómeno cuántico peculiar que involucra partículas. Cuando las partículas se ponen en un estado entrelazado, la medición de una partícula parece afectar a la otra partícula inmediatamente. Este es el caso incluso cuando las dos partículas están demasiado separadas para que sea posible la causalidad.

**La idea esencial del anuncio (y no es la creación de agujeros de gusano como se ha dicho erróneamente)**



**Figura 8.** Un agujero de gusano es un "atajo" hipotético entre dos regiones del espacio. Crédito: Shutterstock.

Algunos físicos han sugerido que un agujero de gusano puede ser solo una forma de describir cierto tipo de entrelazamiento cuántico. Si es correcto, esto forjaría un vínculo entre dos teorías prominentes de la física: la mecánica cuántica y la relatividad general.

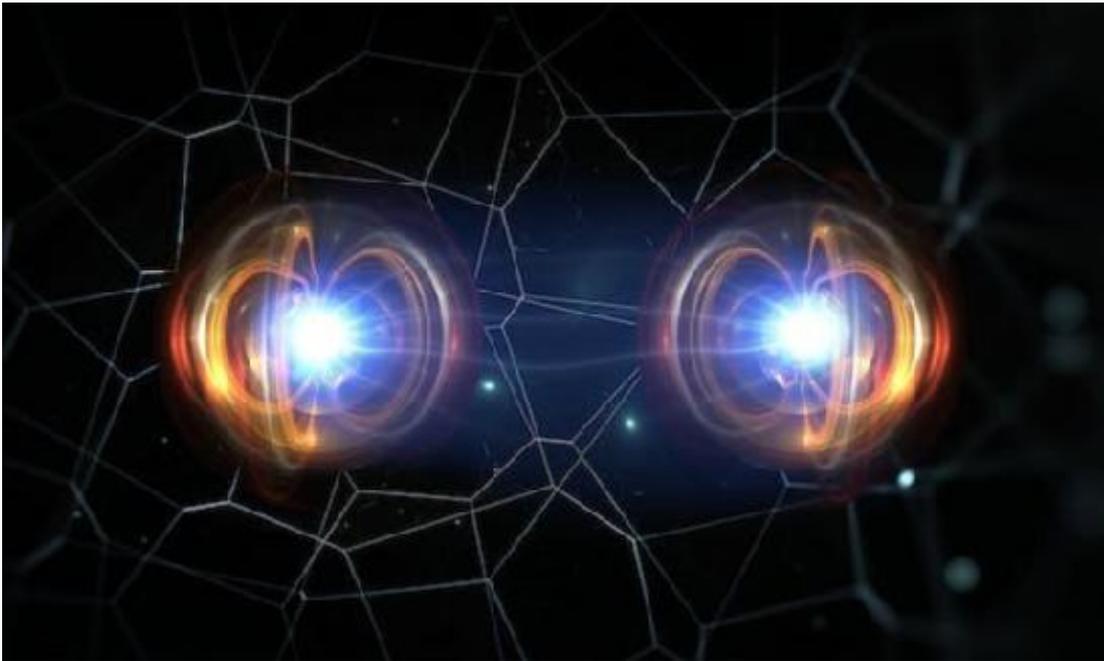
La relatividad general explica cómo funciona la gravedad y describe el universo a gran escala. La mecánica cuántica explica las otras fuerzas fundamentales y describe el universo en escalas muy pequeñas.

Ambas son teorías extremadamente exitosas. Sin embargo, aún no se han reconciliado en una sola teoría unificada.

Una teoría unificada preservaría los conocimientos tanto de la mecánica cuántica como de la relatividad general y, al mismo tiempo, proporcionaría una explicación de cómo funciona la gravedad en el dominio cuántico, algo que actualmente no comprendemos.

Debido a que los agujeros de gusano son distintivos de la relatividad general y el entrelazamiento es distintivo de la mecánica cuántica, la similitud potencial entre ellos es emocionante. Sugiere que las dos teorías pueden, en algún nivel, estar describiendo exactamente lo mismo.

### ¿Gravedad cuántica en un chip?



**Figura 9.** En la mecánica cuántica, el "entrelazamiento" es una especie de vínculo entre partículas que pueden estar bastante distantes entre sí. Crédito: Shutterstock.

¿Cómo buscaríamos esta posible similitud entre los agujeros de gusano y el entrelazamiento? Bueno, sabemos cómo entrelazar partículas experimentalmente. Hemos estado haciendo eso durante algún tiempo.

Entonces, podemos intentar construir un tipo particular de sistema cuántico: uno que pueda describirse usando la misma física que usamos para los agujeros de gusano. Si podemos construir un sistema de este tipo en el laboratorio y se comporta como un agujero de gusano, respaldaría la idea de que el enredo y los agujeros de gusano son dos caras de la misma moneda.

En las computadoras cuánticas, los componentes básicos se pueden poner en varios estados cuánticos que se pueden usar para ejecutar experimentos cuánticos. Entonces, parece que presentan una oportunidad para probar la relación entre los agujeros de gusano y el entrelazamiento. Quizás por eso se informó que los físicos habían usado una computadora cuántica para generar un agujero de gusano. Pero eso no parece ser lo que realmente sucedió, aunque entender por qué no es sencillo.

## **No es un agujero de gusano**

Lo que hicieron los físicos fue organizar los componentes básicos de una computadora cuántica en un estado cuántico específico. Luego pudieron transferir información de una parte de la computadora a otra a través del sistema cuántico.

El sistema cuántico y la forma en que se transfirió la información se pueden describir utilizando un modelo particular en física. De acuerdo con este modelo, el tipo de transferencia de información que ocurre dentro de la computadora es descriptivamente similar a la forma en que algo pasa a través de un agujero de gusano. Sin embargo, el modelo que se está utilizando tiene al menos dos limitaciones.

Primero, parece hacer suposiciones poco realistas sobre la física de nuestro mundo. Asume, en particular, que el espacio-tiempo, la estructura del universo, tiene ciertas propiedades que puede no tener.

En segundo lugar, el modelo se ha simplificado para describir un sistema simple que se puede implementar con una computadora cuántica. Tal modelo simplificado puede ser físicamente inexacto.

Entonces, si bien podemos describir lo que sucedió dentro de la computadora como si fuera un agujero de gusano, utilizando un tipo específico de modelo, no está claro si el modelo representa el mundo tal como lo conocemos.

## **Experimento y simulación**

Algunos expertos han ofrecido una razón diferente para ser escépticos de que se haya creado un agujero de gusano: fue solo una simulación. Como dijo un crítico, considerar que el sistema es un agujero de gusano "es como afirmar que jugar al videojuego Portal implica crear un agujero de gusano real porque representa algo similar al concepto teórico en pantalla".

De hecho, debemos tener cuidado al sacar inferencias sobre la realidad a partir de simulaciones. Sin embargo, el aspecto cuántico de esta simulación hace que se parezca más a un experimento que a la simulación ordinaria que podría ejecutar en una computadora común.

Entonces, parece que la simulación puede decirnos legítimamente algo sobre el sistema cuántico que está simulando. Sin embargo, el problema sigue siendo que solo podemos interpretar el sistema como un agujero de gusano en un modelo de física específico y potencialmente poco realista.

## **Sin agujeros de gusano, pero sigue siendo impresionante**

Entonces, tal vez deberíamos ser escépticos de que se hayan creado agujeros de gusano. Aún así, hay razones para estar impresionado. Por un lado, el equipo usó técnicas de aprendizaje automático para simplificar el modelo que estaban usando para simularlo de una manera útil. El uso del aprendizaje automático para producir el modelo simplificado es genial, y deberíamos esperar ver más usos del aprendizaje automático como este en el futuro.

También es importante que se haya utilizado una computadora cuántica para ejecutar el tipo de experimento cuántico en cuestión. Que esto se pueda hacer abre el camino para realizar más experimentos. Esto puede abrir un paradigma experimental que se puede utilizar para hacer progresos en la física.

También existe la posibilidad, aunque bastante lejana, de que se reivindique algún aspecto del modelo que se utilizó para describir el sistema cuántico. Esto puede conducir al descubrimiento de una relación entre el entrelazamiento cuántico y los agujeros de gusano en el futuro.

Pero esto sigue siendo muy especulativo.

## Referencias

[1] Wikipedia, la enciclopedia libre. WikiMedia Foundation. *Sachdev-Ye-Kitaev model*, URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Sachdev%E2%80%93Ye%E2%80%93Kitaev\\_model](https://en.wikipedia.org/wiki/Sachdev%E2%80%93Ye%E2%80%93Kitaev_model)

[2] *Wormholes, Time Machines and the Weak Energy Conditions*, Michael S. Morris, K. S. Thorne, and Ulvi Yurtsever, Phys. Rev. Letters. vol.61. N13, 26 de Septiembre de 1988, páginas 1446-1449, disponible en la URL: <https://authors.library.caltech.edu/9262/1/MORprl88.pdf>

[3] Caltech news, URL: <https://inqnet.caltech.edu/wormhole2022/>

[4] *Send Your Dog Through a Wormhole?* December 9, 2022 by Matt Strassler. URL: <https://profmattstrassler.com/2022/12/09/send-your-dog-through-a-wormhole/>

[5] *Traversable wormhole dynamics on a quantum processor*, Nature. DOI: 10.1038/s41586-022-05424-3 (live November 30 2022 16:00 UTC) Daniel Jafferis, Alexander Zlokapa, Joseph D. Lykken, David K. Kolchmeyer, Samantha I. Davis, Nikolai Lauk, Hartmut Neven, and Maria Spiropulu.

[6] *Did physicists make a wormhole in the lab? Not quite, but a new experiment hints at the future of quantum simulations* by Sam Baron, The Conversation. URL: <https://phys.org/news/2022-12-physicists-wormhole-lab-hints-future.html>

## Apéndice matemático: una métrica tipo agujero de gusano

$$ds^2 = -e^{2\phi} dt^2 + dl^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2)$$

donde  $\phi$  y  $l$  son funciones del parámetro funcional distancia propia radial  $l$ .

## Apéndice matemático(II): una métrica de tipo anti-de Sitter

Un espacio anti-de Sitter en  $D$  dimensiones se define como sigue: si el elemento de línea o diferencial de longitud en signatura  $(p,q)$ , con  $D = p + q$ ,  $p$  dimensiones espaciales, y  $q$  dimensiones temporales, se escribe

$$ds^2 = \sum_{i=1}^p dx_i^2 - \sum_{j=1}^{q+1} dt_j^2$$

entonces un espacio anti-de Sitter ( $AdS^D$ ) se puede expresar como la pseudoesfera

$$\sum_{i=1}^p x_i^2 - \sum_{j=1}^{q+1} t_j^2 = -R_{AdS}^2.$$

### Apéndice matemático(III): los espacios de de Sitter $dS^D$

Tomando una métrica de Minkovski con el convenio "mainly +" (principalmente máses),  $R^{n,1}$ , definida por el cuadrado del elemento de longitud

$$ds^2 = -dx_0^2 + \sum_{i=1}^n dx_i^2$$

el espacio de de Sitter es la subvariedad descrita por el hiperboloide de una hoja

$$-x_0^2 + \sum_{i=1}^n x_i^2 = R_{dS}^2$$

donde  $R_{dS}$  es alguna constante no nula con dimensión de longitud, que se denomina habitualmente radio de de Sitter. En una métrica ultrahiperbólica, con múltiples tiempos, y  $D = p + q$  la expresión anterior se escribe como

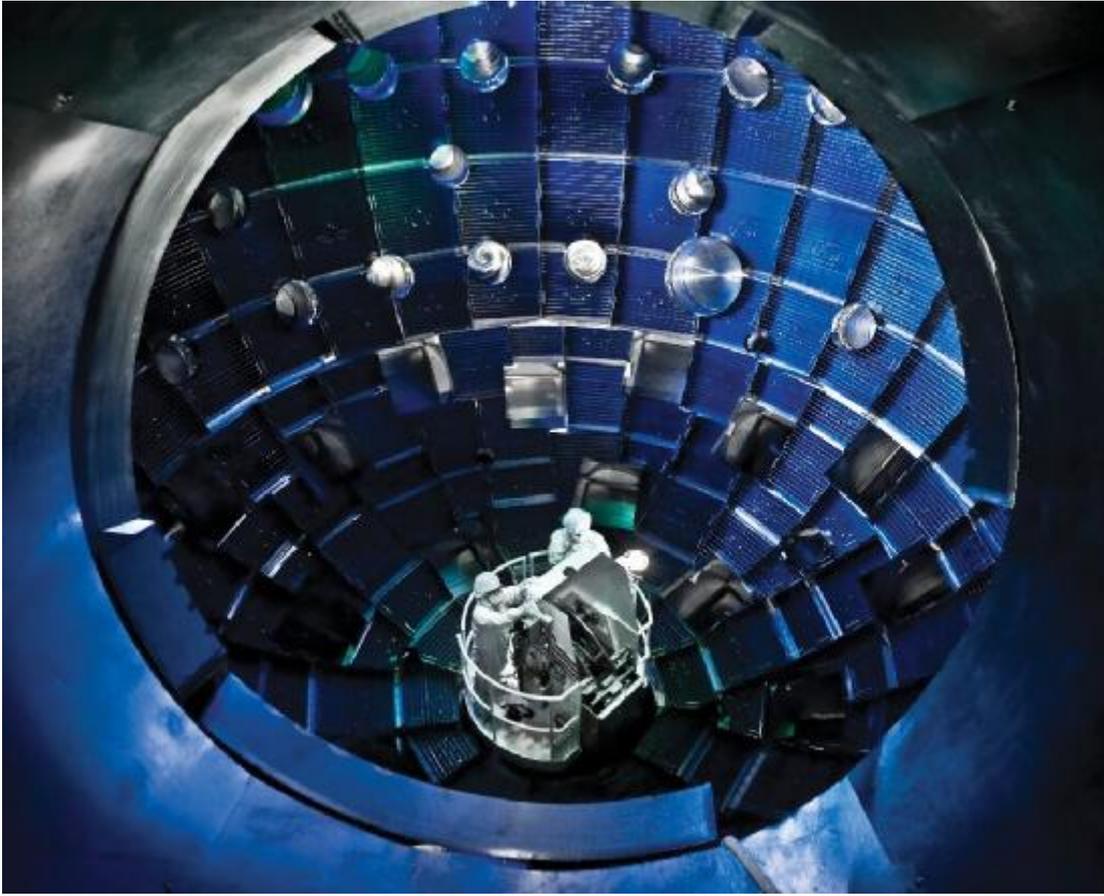
$$-\sum_{j=1}^q x_j^2 + \sum_{i=1}^p x_i^2 = R_{dS}^2$$

Sin embargo, el término espacio de de Sitter (o recíprocamente anti de Sitter) se suele más identificar con la extensión maximal o deformación del espacio de Minkovski con una dimensión adicional espacial real (dS) o imaginaria (AdS). No es habitual denominar espacios de de Sitter o Anti de Sitter a espacios ultrahiperbólicos como los mencionados en estos apéndices. El espacio dS es la extensión maximalmente simétrica del espacio de Minkovski y lleva a una generalización exótica de la relatividad llamada relatividad de de Sitter o doblemente especial, pues incluye invariantes adicionales a los existentes en el espacio de Minkovski, que es plano, mientras que el espacio de de Sitter (o el Anti de Sitter) son espacio-tiempos curvados.

Artículo editado y traducido por Juan F. González.

## 25.¿Más cerca de la fusión? Es posible, pero no a corto plazo.

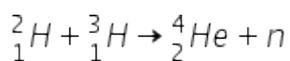
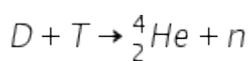
[Editar](#)



**Figura 1.** La Instalación Nacional de Ignición (NIF) de EEUU., cuyo interior se ve aquí en julio de 2008, supuestamente logró una reacción de fusión que produce más energía de la que se le puso. No hay confirmación rigurosa del anuncio todavía en revistas científicas.

Dado el contexto de crisis energética (y socioeconómica) global, se ha dado mucha publicidad a un avance en la fusión nuclear (aunque en mi opinión, los logros británicos o incluso el interés alemán parecen más interesantes). No obstante, voy a intentar explicar lo que se ha logrado, a falta de publicaciones científicas (curiosamente ausentes por ahora más allá de la publicidad). Y esto debilita notablemente el anuncio,...A diferencia de otros hitos y descubrimientos científicos recientes (el descubrimiento del bosón de Higgs, el hallazgo de ondas gravitacionales, las fotos a los agujeros negros de M87 y SgA\*,...) en Física, éste anuncio NO ha venido acompañado de publicaciones en revistas hasta el momento (actualizaré esta noticia si eso cambia, pero no he encontrado publicaciones del anuncio de la NIF-National Ignition Facility en mis canales habituales de comunicación científica rigurosa...). Para una introducción alternativa a este tema y su estado, y de lo que parece se ha anunciado, recomiendo el artículo [1].

La fusión nuclear está basada esencialmente en la unión de deuterio y tritio, mediante la reacción [2]:



**Los dos métodos**

Generalmente hablando, ha habido tradicionalmente dos intentos de lograr la fusión (no voy a hablar aquí del triste caso de la mal llamada fusión fría, que aunque diera para argumentos de películas como El Santo, son de doloroso recuerdo para científicos):

1) El método del confinamiento magnético y de plasmas. Es la técnica que usan los tokamaks, como por ejemplo el que los británicos tienen operativo y con evolución muy prometedora. También es la que usará ITER, el reactor experimental termonuclear de fusión europeo e internacional que se está construyendo en Francia, en Cadarache.

2) El método de la ignición láser o del confinamiento inercial. Hasta ahora hubo problemas con él, y parecía menos desarrollado. El anuncio del NIF cambia algo este punto, si bien la comunidad científica está esperando publicaciones que puedan corroborar las afirmaciones anunciadas, y que comentaré en el presente artículo.

La fusión se diferencia de la fisión, la técnica utilizada actualmente en las centrales nucleares, al fusionar dos núcleos atómicos en lugar de dividir uno. De hecho, la fusión es el proceso que alimenta al sol. Dos átomos de hidrógeno livianos, cuando chocan a velocidades muy altas, se fusionan en un elemento más pesado, helio, liberando energía en el proceso.

"Controlar la fuente de energía de las estrellas es el mayor desafío tecnológico que la humanidad jamás haya emprendido", tuiteó el físico Arthur Turrell, autor de "The Star Builders".

Producir reacciones de fusión en la Tierra solo es posible calentando la materia a temperaturas extremadamente altas, más de 100 millones de grados Celsius (180 millones de Fahrenheit).

"Así que tenemos que encontrar formas de aislar esta materia extremadamente caliente de cualquier cosa que pueda enfriarla. Este es el problema de la contención", dijo a la AFP Erik Lefebvre, líder del proyecto en la Comisión Francesa de Energía Atómica (CEA).

Un método es "confinar" la reacción de fusión con imanes. En un enorme reactor en forma de rosquilla, se calientan isótopos ligeros de hidrógeno (deuterio y tritio) hasta alcanzar el estado de plasma, un gas de muy baja densidad. Los imanes confinan el gas de plasma en remolino, evitando que entre en contacto con las paredes de la cámara, mientras los átomos chocan y comienzan a fusionarse. Este es el tipo de reactor utilizado en el gran proyecto internacional conocido como ITER, actualmente en construcción en Francia, así como en el Joint European Torus (JET) cerca de Oxford, Inglaterra.

Un segundo método es la fusión por confinamiento inercial, en la que los láseres de alta energía se dirigen simultáneamente a un cilindro del tamaño de un dedal que contiene el hidrógeno. Esta técnica es utilizada por el láser francés Megajoule (LMJ) y el proyecto de fusión más avanzado del mundo, el National Ignition Facility (NIF) con sede en California. El confinamiento inercial se utiliza para demostrar los principios físicos de la fusión, mientras que el confinamiento magnético busca imitar los futuros reactores a escala industrial.

## **El anuncio**

La fusión de pequeños núcleos atómicos en otros más grandes, con la liberación asociada de partículas que transportan mucha energía de movimiento, es el mecanismo que alimenta el horno

del Sol y el de otras estrellas. Esto se sospechó por primera vez en la década de 1920 y se confirmó en la década de 1930. La fisión nuclear (la ruptura de núcleos atómicos más grandes en pedazos más pequeños) se descubrió en la década de 1930 y se usó para generar energía en 1942. El trabajo sobre la fisión en entornos tanto no controlados (es decir, bombas) como controlados (es decir, centrales eléctricas) avanzó rápidamente; desafortunadamente, las bombas se diseñaron y construyeron rápidamente durante la Segunda Guerra Mundial, mientras que las centrales eléctricas útiles ya estaban funcionando en 1951. Mientras tanto, el trabajo sobre la fusión también avanzó rápidamente; en el escenario descontrolado, la primera bomba que usa fusión (¡activada por una bomba de fisión!) ya se fabricó en 1951, y en un abrir y cerrar de ojos, una gran cantidad de bombas de hidrógeno llenaron los arsenales de superpotencias grandes y pequeñas. Pero fusión controlada para centrales eléctricas... Ah. Si hubiera sido tan fácil controlar la fusión como controlar la fisión, tendríamos plantas de fusión por todas partes; los combustibles fósiles se consignarían solo a ciertas formas de transporte, y la crisis climática sería mucho menos grave de lo que es ahora. Pero desafortunadamente, han sido 70 años de malas noticias en su mayoría, noticias trágicas, en realidad, para el planeta. Pero finalmente tenemos un pequeño rayo de esperanza. El 5 de diciembre, alguien finalmente logró, sin usar una bomba, obtener más energía generada por fusión de un objeto que la energía que tenían que poner en él.

### **El estado actual de la investigación**

Durante décadas, los científicos han intentado lograr lo que se conoce como "ganancia neta de energía", es decir, la reacción de fusión produce más energía de la que se necesita para activarla. Según informes del Financial Times y el Washington Post, ese será el "gran avance científico" anunciado el martes por el NIF. Pero Lefebvre advierte que "el camino aún es muy largo" antes de "una demostración a escala industrial que sea comercialmente viable". Él dice que tal proyecto tomará otros 20 o 30 años para completarse. Para llegar allí, los investigadores primero deben aumentar la eficiencia de los láseres y reproducir el experimento con mayor frecuencia.

### **Beneficios de la fusión**

El éxito informado del NIF ha despertado un gran entusiasmo en la comunidad científica, que espera que la tecnología pueda cambiar las reglas del juego para la producción de energía global.

A diferencia de la fisión, la fusión no conlleva riesgo de accidentes nucleares.

"Si faltan algunos láseres y no se disparan en el momento adecuado, o si el confinamiento del plasma por el campo magnético... no es perfecto", la reacción simplemente se detendrá, dice Lefebvre.

La fusión nuclear también produce muchos menos residuos radiactivos que las centrales eléctricas actuales y, sobre todo, no emite gases de efecto invernadero.

"Es una fuente de energía totalmente libre de carbono, genera muy pocos residuos y es intrínsecamente extremadamente segura", según Lefebvre, quien dice que la fusión podría ser "una solución futura para los problemas energéticos del mundo".

Sin embargo, independientemente del anuncio del martes, la tecnología aún está lejos de producir energía a escala industrial y, por lo tanto, no se puede confiar en ella como una solución inmediata a la crisis climática.

Otras fuentes de noticias del anuncio[3], indican lo siguiente:

### **La primera vez del NIF**

Por primera vez en la historia, los físicos desencadenaron una reacción de fusión nuclear controlada que liberó más energía de la que se puso en el experimento. Nota del traductor y editor: no es estrictamente cierto, porque el Reino Unido ya hizo algo similar hace meses pero con tokamaks y fusión con confinamiento magnético.

El disparo láser histórico tuvo lugar el 5 de diciembre en la Instalación Nacional de Ignición del Departamento de Energía de EE. UU. en el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore en California. El hecho de que hubiera una ganancia neta de energía calificó el disparo, en términos técnicos, como ignición. “Llegar a la ignición en un experimento de fusión controlada es un logro que se ha logrado después de más de 60 años de investigación, desarrollo, ingeniería y experimentación a nivel mundial”, dijo Jill Hruby, subsecretaria de energía para seguridad nuclear y administradora de la Administración Nacional de Seguridad Nuclear. .

Sin embargo, los funcionarios reconocieron que aún es probable que pasen décadas antes de que la energía de fusión comercial se convierta en una realidad. Dijeron que el impacto más inmediato del avance se sentirá en el campo de la seguridad nacional y la administración de las reservas de armas nucleares de Estados Unidos.

Si se puede aprovechar la energía de fusión nuclear, eso podría abrir una nueva era de energía más limpia y abundante. Uno de los combustibles potenciales para la fusión es el deuterio, un isótopo de hidrógeno que se puede extraer del agua de mar.

A diferencia de la fisión nuclear, que implica la descomposición de elementos radiactivos pesados, la fusión hace chocar elementos más ligeros con tanta fuerza que parte de la masa del combustible se convierte en energía de acuerdo con la famosa ecuación  $E = mc^2$  de Albert Einstein. A los que cuestionan que se viola la conservación de la energía al obtenerse más energía que la de entrada, hay que recordarles que en relatividad lo que se conserva es el cuadrimomento, y que la obtención de "más energía" no está en conflicto con los principios de la Física ya que lo que ocurre es que masa que es deuterio y tritio es transformada en energía al fusionarse en helio...

Investigadores de todo el mundo han estado trabajando para maximizar la eficiencia de las reacciones de fusión en el laboratorio. El mayor proyecto es el experimento internacional ITER en Francia, que utilizará un dispositivo de confinamiento magnético gigante conocido como tokamak. La Instalación Nacional de Ignición utiliza un enfoque diferente, que enfoca una explosión de 192 láseres de alta potencia en una pequeña cápsula que contiene un objetivo de deuterio-tritio que es más pequeño que un perdigón.

El equipo de NIF ha estado tratando de lograr la ignición durante años, pero ha sido endiabladamente difícil fabricar la bolita (o "pellet") objetivo y la geometría del rayo láser para producir las presiones y temperaturas requeridas para la fusión. Mark Herrmann, director del

programa de física y diseño de armas en Livermore Lab, comparó el esfuerzo con una carrera entre calentar el objetivo y perder ese calor debido a pequeños defectos en el diseño.

“Durante muchas, muchas décadas, perdimos la carrera”, dijo Herrmann.

Gracias en parte a las herramientas de aprendizaje automático, el diseño se mejoró en los últimos meses. A la 1:03 a. m. (hora del Pacífico) del 5 de diciembre, un disparo láser inyectó 2,05 megajulios de energía en el experimento y obtuvo 3,15 megajulios de energía de fusión productora de neutrones. “Una ganancia de 1,5”, dijo Marv Adams, administrador adjunto de programas de defensa de la NNSA.

Tammy Ma, quien dirige la Iniciativa Institucional de Energía de Fusión Inercial de Livermore Lab, dijo que "se echó a llorar" cuando se enteró del tiro exitoso. La secretaria de Energía, Jennifer Granholm, dijo que el logro "pasaría a los libros de historia".

“Este hito nos acerca un paso significativo hacia la abundante energía libre de carbono que alimenta a nuestra sociedad”, dijo.

La comunidad de investigación de fusión en general también aplaudió el avance. “El anuncio de hoy le muestra al mundo que la fusión no es ciencia ficción: pronto será una fuente viable de energía”, dijo Andrew Holland, director ejecutivo de Fusion Industry Association, en un comunicado de prensa. “Todavía hay muchos pasos entre estos resultados experimentales y las plantas de energía de fusión, pero este es un hito importante para la fusión”.

David Kirtley, director ejecutivo de Helion Energy, una empresa de fusión comercial con sede en Everett, Washington, dijo que lograr la ignición es "un gran problema para la ciencia de la fusión".

“Aunque en la Instalación Nacional de Ignición no se centraron en la energía comercial, en Helion creemos que esto allana el camino para que las empresas privadas ahora se concentren y aceleren la obtención de energía comercial en la red”, dijo Kirtley.

**Vídeo 1.** ¿Cuánto de lejos en el tiempo está la fusión comercial y la producción útil de energía? Créditos: Fraser Cain (2017).

Los investigadores detrás del experimento no minimizaron los desafíos. Aunque el láser se disparó en sí mismo registró una ganancia neta de energía, el director del Laboratorio Livermore, Kim Budil, señaló que la energía eléctrica total requerida "de la pared" para respaldar el experimento fue de 300 megajulios, aproximadamente 100 veces la cantidad de energía de fusión producida.

“Nuestro cálculo sugiere que es posible con un sistema láser a escala lograr cientos de megajulios de rendimiento, por lo que hay un camino hacia un objetivo que produce suficiente rendimiento”, dijo Budil. “Pero estamos muy lejos de eso en este momento”.

Además, la Instalación Nacional de Ignición está diseñada para hacer un disparo láser solo una vez al día, pero una planta de energía tendría que producir energía continuamente. (Y si sirve de algo, un kilovatio-hora de energía equivale a 3,6 megajulios).

Unas pocas décadas de investigación sobre las tecnologías subyacentes podrían ponernos en condiciones de construir una planta de energía”, dijo Budil.

Michael Mann, un científico del clima de la Universidad de Pensilvania, advirtió contra emocionarse demasiado con el anuncio de hoy. “Me entusiasmaría más un anuncio de que EE. UU. va a terminar con los subsidios a los combustibles fósiles”, dijo Mann en una serie de tuits. “Eso no significa que no sean buenas noticias, pero sí significa que no desempeñará un papel importante en la descarbonización de nuestra economía en un 50% en esta década, lo cual es necesario para evitar un calentamiento catastrófico de  $>1,5$  °C (3 °F). ”

Centrarse en las fuentes existentes de energía renovable y mejorar las tecnologías para el almacenamiento, la eficiencia y la conservación de la energía son estrategias más realistas para enfrentar el desafío climático durante la próxima década, dijo Mann. Además de promover la causa de la energía limpia, la ignición contribuye a la misión de seguridad nacional de la NNSA, dijo Adams.

“Primero, conducirá a experimentos de laboratorio que ayudarán a los programas de defensa de la NNSA a seguir manteniendo la confianza en nuestra disuasión sin pruebas de explosivos nucleares”, dijo Adams. “En segundo lugar, respalda la credibilidad de nuestro elemento de disuasión al demostrar una experiencia líder en el mundo en tecnologías relacionadas con las armas. Es decir, sabemos lo que estamos haciendo”.

Kirtley de Helion Energy, quien realizó una investigación sobre los sistemas de propulsión de plasma antes de centrarse en la energía de fusión comercial, dijo que el avance también podría tener implicaciones fuera de la Tierra.

"Curiosamente, creo que esto es aún más aplicable para las aplicaciones de fusión de propulsión espacial que para la generación de electricidad comercial", dijo. generación de electricidad Helion se centra en generadores a pequeña escala realmente eficientes, pero en el espacio, la aplicación inercial con alta ganancia y alto rendimiento energético es realmente uno de los objetivos clave”.

Michael Eades, ingeniero jefe de Ultra Safe Nuclear Technologies, con sede en Seattle, dijo que la propulsión por pulsos nucleares está más lejos que los sistemas en los que se centra la investigación de su empresa. Sin embargo, dijo que lograr la ignición es un desarrollo bienvenido. “Estamos entusiasmados con la noticia de la ganancia de energía y creemos que permitirá misiones en el futuro lejano, tal vez más allá del sistema solar”, dijo Eades.

### **Opinión personal y tribuna libre del anuncio del NIF**

Hace 30 años entré en el instituto como estudiante. Y fui durante 4-5 años el típico adolescente flipado por la Ciencia optimista por naturaleza. Me volví escéptico y pesimista en el cambio de siglo, cerca del 1999 y 2000 por diferentes motivos. Aunque mantuve un pico de entusiasmo por ideas excéntricas un tiempo hasta 2005. Hoy día soy casi un incrédulo de casi todo. El anuncio, no nos engañemos, es importante, pero no es tan revolucionario como nos venden desde los USA (para mí fue más relevante el anuncio inglés o el alemán de hace un tiempo, sin ser tampoco aún revolucionarios). Pero estamos en un contexto de crisis global, o más bien multicrisis global. Necesitamos esperanzas. Y algunos científicos obviamente fondos de investigación. El acceso a

la energía sin destrozar el planeta sería algo que nos ayudaría a sobrevivir más como civilización si no hay un holocausto nuclear o vírico que se vuelva incontrolable. Necesitamos energía. Dudo de hecho que muchas personas sobrevivieran sin internet o energía ahora. Pero podría venir una tormenta solar enorme, un virus azotar el planeta, o que la inteligencia artificial decida eliminarnos. En todo caso, un anuncio científico importante debe ir siempre acompañado de evidencia y publicaciones que apoyen las afirmaciones expuestas. Mi miedo después de hurgar en las noticias e internet es que aunque la fusión por confinamiento inercial no tiene un objetivo comercial, se haya hecho este anuncio para salvar proyectos e inversiones del NIF dedicados a fusión nuclear, y que ocurra como el anuncio de la fusión fría en los 80 y 90 del siglo XX. En un contexto económico como el actual, los fondos no abundan, en especial sabiendo que se tiene la vista puesta en la Luna y Marte para las próximas décadas. Si bien el dominar la fusión Y la fisión (ya hay propuestos motores y reactores nucleares de fisión -no de fusión aún porque no existen- para la Luna, las naves a Marte, o incluso para estaciones como la Lunar Gateway) es esencial, también lo es mantener el rigor científico. Yo esperaré a leer los artículos serios que demuestren lo que se ha anunciado, que insisto, es importante pero no es revolucionario. Aún estamos lejos de la fusión, aunque es otro paso si se demuestra lo que han conseguido. Y no perdamos de vista los avances británicos, alemán y esperemos que los europeos con ITER en la próxima década.

Os mantendré informado.

## Referencias

[1] *Sobre la ignición de la fusión en NIF anunciada a bombo y platillo*, Por Francisco R. Villatoro, el 13 diciembre, 2022. Revista online Naukas. URL: <https://francis.naukas.com/2022/12/13/sobre-la-ignicion-de-la-fusion-en-nif-anunciada-a-bombo-y-platillo/>

[2] *Nuclear fusion: harnessing the power of the stars*, by Lucie AUBOURG. URL: <https://phys.org/news/2022-12-nuclear-fusion-harnessing-power-stars.html>

[3] *We Have Ignition! Fusion Breakthrough Raises Hopes — and Questions*, Posted on December 13, 2022 by Alan Boyle. Revista online Universe Today. URL: <https://www.universetoday.com/159166/fusion-ignition-breakthrough-raises-hopes-questions/>

[4] Wikipedia, la Enciclopedia Libre/Wikipedia, the Free Encyclopedia. *Lawson criterion*. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Lawson\\_criterion](https://en.wikipedia.org/wiki/Lawson_criterion)

[5] Samuel E. Wurzel and Scott C. Hsu, *Progress toward fusion energy breakeven and gain as measured against the Lawson criterion*, *Phys. Plasmas* 29, 062103 (2022). URL: <https://doi.org/10.1063/5.0083990>. Submitted: 31 December 2021 • Accepted: 06 April 2022 • Published Online: 08 June 2022.

## Apéndice: el criterio de Lawson para la fusión termonuclear

Lawson estimó[4] las pérdidas de radiación en fusión termonuclear mediante la ecuación

donde  $N$  es la densidad de número de partículas y  $T$  es la temperatura absoluta. Lawson analizó, ignorando las pérdidas por conducción térmica y eléctrica en el plasma, estas condiciones. En la práctica, es casi imposible ignorar estas pérdidas, ya que todos los sistemas pierden energía mediante la masa que deja el plasma y portando energía. Igualando las pérdidas de radiación y los ritmos de fusión volumétricos, Lawson calculó la temperatura mínima para la fusión deuterio-tritio(D-T):

que es de unos 30 millones de grados (2.6 keV), y para el mecanismo de fusión deuterio-deuterio (D-D)[5]:

que resultó ser una temperatura de 150 millones de grados (12.9 keV). Nótese que la reacción del sol es demasiado lenta y poco eficiente en nuestro planeta, y tiene lugar en las estrellas solamente por las enormes concentraciones de hidrógeno y el poder de la gravedad.

Para la reacción (D-T) el criterio de Lawson suele escribirse como

$$n\tau \geq 1.5 \cdot 10^{20} \frac{s}{m^3}$$

y para la reacción (D-D) dicho criterio se materializa en la cota

$$n\tau \geq 3 \cdot 10^{22} \frac{s}{m^3} .$$

**Apéndice(II).** Acerca del "hito" sobre la fusión mencionado.

Un nuevo artículo, sobre los problemas y poca rigurosidad del anuncio del denominado nuevo hito, está aquí:

<https://arxiv.org/pdf/2301.01238.pdf>

*El elixir de la energía eterna*, por José Manuel Quesada Molina, Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear  
Universidad de Sevilla.

Artículo editado, traducido y comentado por Juan F. González

## 26.El primer DEEP FIELD del James Webb ST: 9 días y es impresionante

[Editar](#)

Las primeras imágenes de campo profundo del James Webb Space Telescope son impresionantes (y son solamente con 9 días de exposición):



**Figura 1.** Esta imagen tomada por el Telescopio Espacial James Webb destaca la región de estudio del Sondeo Extragaláctico Profundo Avanzado JWST ([JADES](#)). Esta área se encuentra dentro y alrededor del campo ultraprofundo del telescopio espacial Hubble. Crédito de la imagen: NASA, ESA, CSA y M. Zamani (ESA/Webb).

**Webb completa su primer "campo profundo" con nueve días de tiempo de observación. ¿Qué encontró?**

Hace unos 13 mil millones de años, las estrellas de las primeras galaxias del Universo enviaron fotones al espacio. Algunos de esos fotones terminaron su viaje épico en los espejos de berilio chapados en oro del telescopio espacial James Webb en los últimos meses. El JWST reunió estos fotones primordiales durante varios días para crear su primera imagen de "Campo profundo".

Uno de los principales objetivos del JWST es estudiar las primeras galaxias del Universo. Los resultados ayudarán a los astrofísicos a reconstruir la historia del Universo y cómo evolucionaron las galaxias. Estas primeras galaxias son extremadamente débiles, pero JWST se construyó para encontrarlas.

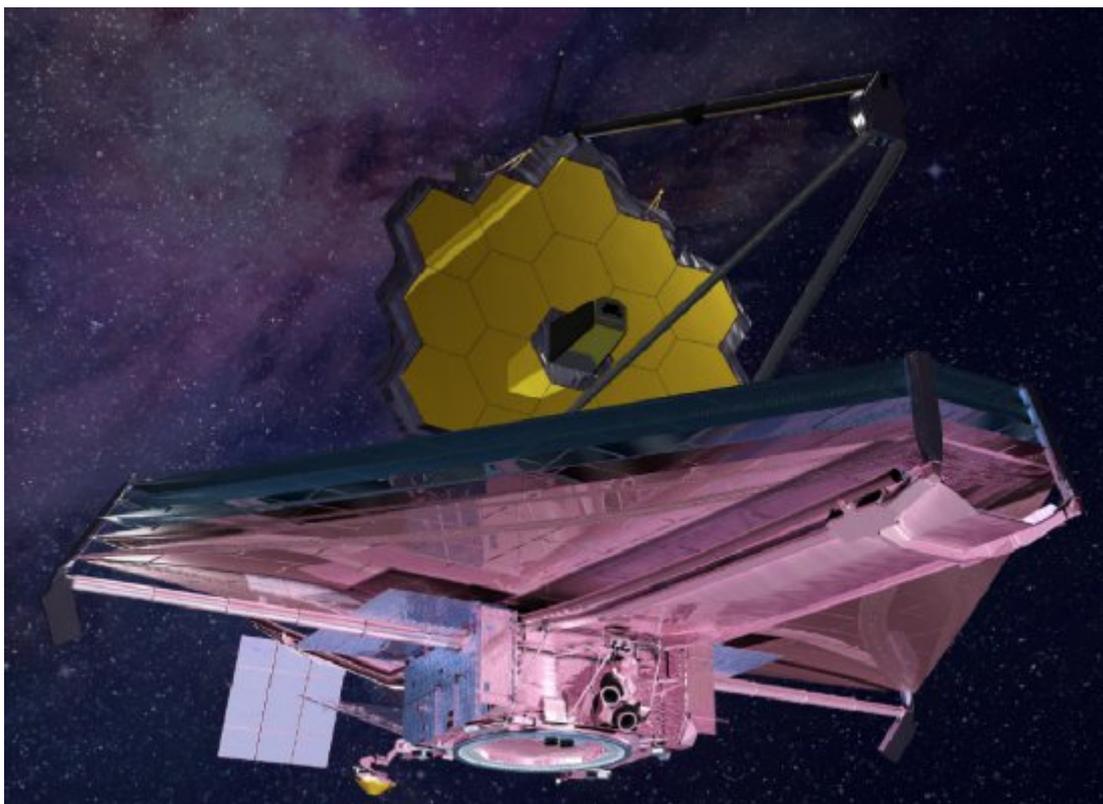
“Muchas preguntas sobre las galaxias han estado esperando la oportunidad transformadora de Webb, y estamos encantados de poder participar en la revelación de esta historia”. Sandro Tacchella, astrónomo, Universidad de Cambridge, Reino Unido.

Muchas cosas en la naturaleza se disfrazan de otra cosa. Solo después de que los científicos aplican sus habilidades nos acercamos a la verdad. Los primeros pensadores pensaron que todo en el Universo giraba alrededor de la Tierra, colocando a la humanidad en el centro de todo, un malentendido confuso que todavía confunde a la humanidad hasta el día de hoy. Eventualmente, lo descubrimos, gracias a Copérnico y los que siguieron. Las características naturales de Marte parecían canales construidos por una civilización marciana, lo que entusiasmó a todos e incluso engañó a algunos científicos. Eventualmente, mejores telescopios revelaron la verdad. Hay un sinnúmero de ejemplos de esto.

Las galaxias jóvenes pueden hacerse pasar por galaxias antiguas, un problema que ha plagado nuestros intentos de comprender la evolución de las galaxias. El Universo primitivo estaba compuesto casi en su totalidad por los dos elementos más ligeros y sencillos, el hidrógeno y el helio. Como resultado, las estrellas que componen las primeras galaxias están formadas casi en su totalidad por hidrógeno y helio. Tienen “baja metalicidad” en la jerga astronómica.

De manera confusa, algunas galaxias más jóvenes también tienen baja metalicidad. Deberían tener mucho más que hidrógeno y helio porque muchas estrellas vivieron y murieron antes de que se formaran estas galaxias. Y las estrellas son las que forjan elementos más pesados, enviándolos al espacio cuando mueren para ser absorbidos por la próxima generación de estrellas.

Pero el JWST no se deja engañar fácilmente.



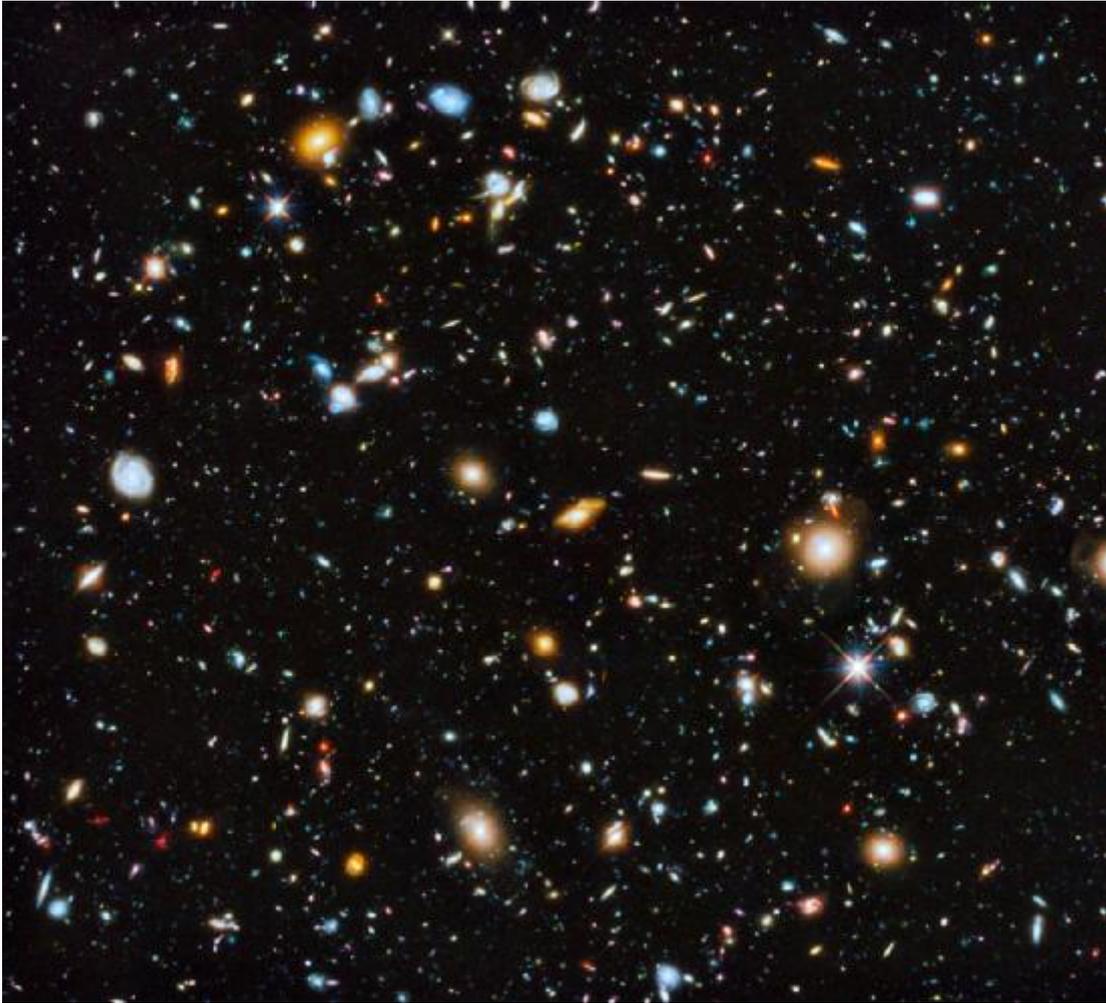
**Figura 2.** Ilustración del telescopio espacial James Webb de la NASA. Los espejos de berilio chapados en oro y los finos instrumentos del JWST le permiten distinguir las galaxias jóvenes de las más viejas. Créditos: NASA

El JWST puede diseccionar la luz de estas galaxias con mayor precisión que cualquiera de sus predecesores. Debe mantenerse ultrafrío para observar la luz infrarroja con tanto detalle, razón por la cual se encuentra en el espacio, protegido por un enorme escudo solar. La cámara de infrarrojo cercano (NIRCam) y el espectrógrafo de infrarrojo cercano (NIRSpec) del JWST se utilizaron en este último esfuerzo de observación, y los equipos que operan cada instrumento colaboraron estrechamente para lograr estos resultados.

“Era crucial demostrar que estas galaxias, de hecho, habitan en el universo primitivo. Es muy posible que las galaxias más cercanas se hagan pasar por galaxias muy distantes”, dijo la astrónoma Emma Curtis-Lake de la Universidad de Hertfordshire en el Reino Unido. “Ver el espectro revelado como esperábamos, confirmando que estas galaxias están en el borde real de nuestra vista, ¡algunas más lejos de lo que el Hubble podía ver! Es un logro tremendamente emocionante para la misión”.

Dos artículos próximos presentarán los nuevos resultados de las observaciones de campo profundo del JWST. Uno es "Espectroscopía de cuatro galaxias pobres en metales más allá del corrimiento al rojo diez", de Curtis-Lake et al. 2022. El otro es “Descubrimiento y propiedades de las primeras galaxias con distancias confirmadas”, de Robertson et al. 2022. Ninguno ha sido revisado por pares todavía.

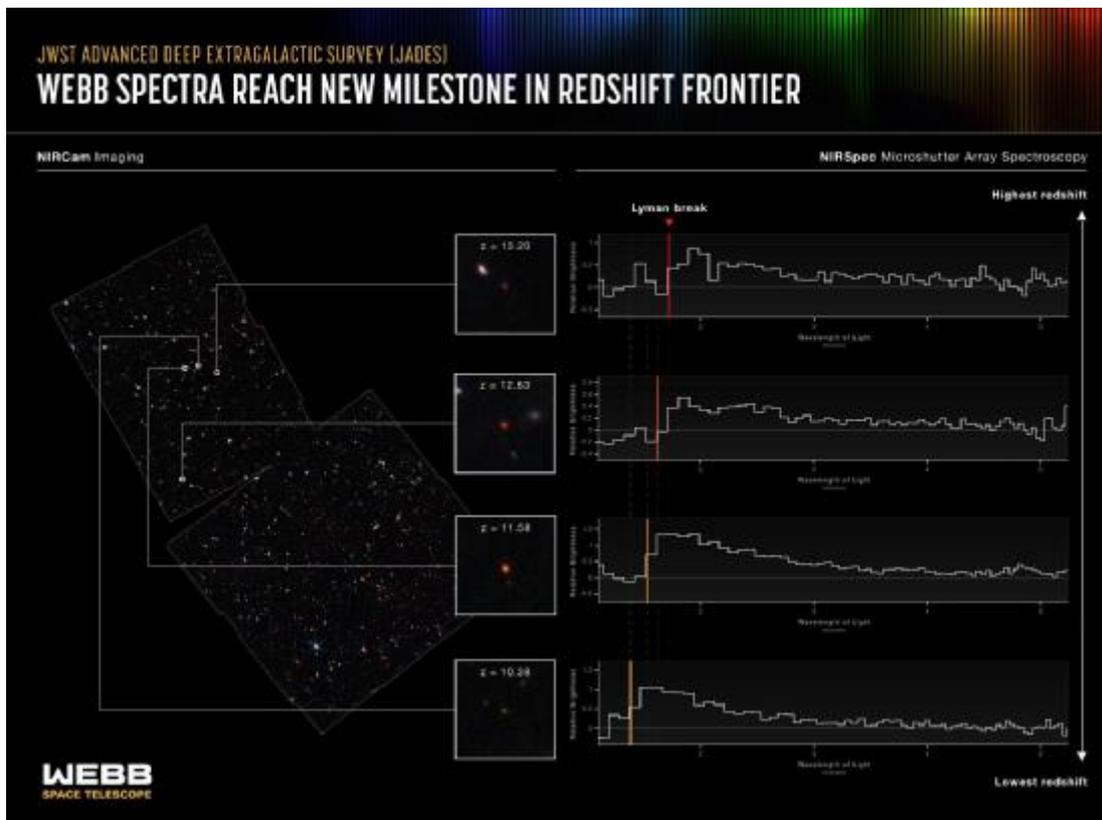
El telescopio espacial Hubble nos introdujo a las observaciones de campo profundo. Cuando los astrónomos apuntaron el Hubble a un trozo de cielo que parecía vacío y lo dejaron acumular fotones durante más de 11 días en 2003 y 2004, reveló algo extraordinario. Lo que se hacía pasar por espacio vacío estaba lleno de galaxias. Su imagen de campo ultraprofundo encontró casi 10.000 galaxias en una pequeña porción de cielo oscuro, y los astrónomos creen que alrededor de 800 de las más débiles y rojas son algunas de las galaxias primordiales del Universo.



**Figura 3.** El campo ultraprofundo del Hubble se ve en luz ultravioleta, visible e infrarroja. Crédito de la imagen: NASA, ESA, H. Teplitz y M. Rafelski (IPAC/Caltech), A. Koekemoer (STScI), R. Windhorst (Universidad Estatal de Arizona) y Z. Levay (STScI).

Pero necesitábamos un telescopio más potente con mejores instrumentos para estudiarlos. NIRCam y NIRSpec se crearon para encontrar estas primeras galaxias y lo están logrando. El equipo detrás de ambos instrumentos se reunió antes de que se completara y lanzara el telescopio para desarrollar JADES, el JWST Advanced Deep Extragalactic Survey. JADES brindará a los astrónomos una mirada profunda, detallada y sin precedentes a las primeras galaxias del Universo. "Estos resultados son la culminación de por qué los equipos de NIRCam y NIRSpec se unieron para ejecutar este programa de observación", compartió la coautora Marcia Rieke, investigadora principal de NIRCam de la Universidad de Arizona en Tucson.

La capacidad del JWST para distinguir galaxias antiguas se basa en la ruptura de Lyman. La ruptura de Lyman está relacionada con la forma en que el gas neutro absorbe la luz en las regiones de formación estelar de las galaxias distantes. Cuanto más distante está una galaxia, más desplazada hacia el rojo está su luz. Este ligero estiramiento coloca la ruptura de Lyman en una posición diferente en las observaciones espectrométricas. El JWST puede detectar la ruptura de Lyman con sus agudas capacidades de infrarrojos.



**Figura 4.** Esta imagen de la encuesta JADES muestra cómo el JWST puede encontrar la ruptura de Lyman. Las galaxias con mayor corrimiento al rojo son las galaxias más antiguas, y la [ruptura de Lyman](#) aparece en un lugar diferente en la espectrometría dependiendo de la edad de la galaxia. Así es como el JWST puede distinguir las galaxias más antiguas del Universo de las galaxias más jóvenes de una manera que el Hubble no pudo. Crédito de imagen: NASA, ESA, CSA, M. Zamani (ESA/Webb), Leah Hustak (STScI), Brant Robertson (UC Santa Cruz), S. Tacchella (Cambridge), E. Curtis-Lake (UOH), S. Carniani (Scuola Normale Superiore), Colaboración JADES

El JWST capturó su campo profundo en la misma región del cielo que el Hubble capturó su campo ultraprofundo. Los telescopios han estado estudiando esta región durante unos 20 años, creando un conjunto completo de datos en todo el espectro electromagnético. Las observaciones de Webb se basan en este archivo, agregando las observaciones más profundas y sensibles a la luz hasta el momento.

El campo del JWST es 15 veces más grande que el del Hubble y es más profundo y nítido. La imagen de NIRCam es solo del tamaño que parece un ser humano cuando se ve desde una milla de distancia, pero contiene más de 100,000 galaxias. Debido al poder del JWST, los astrónomos pueden estar seguros de que algunas de ellas son las primeras galaxias en formarse en el Universo.

"Por primera vez, hemos descubierto galaxias solo 350 millones de años después del Big Bang, y podemos estar absolutamente seguros de sus fantásticas distancias", compartió el coautor Brant Robertson de la Universidad de California Santa Cruz, miembro de NIRCam. equipo de ciencia "Encontrar estas primeras galaxias en imágenes tan asombrosamente hermosas es una experiencia especial".

El equipo utilizó el instrumento NIRSpec del telescopio para examinar la luz de 250 de las galaxias más débiles de la imagen en el transcurso de 28 horas. Los espectros presentaron mediciones precisas de los corrimientos al rojo de cada una de las galaxias, revelando las propiedades de las estrellas y el gas en cada una.

De más de 100000 galaxias en el campo profundo JWST, los investigadores se concentraron en cuatro de ellas. Los cuatro tienen desplazamientos hacia el rojo superiores a 10, y dos tienen desplazamientos hacia el rojo de 13. El desplazamiento hacia el rojo les dice a los astrónomos cuánto tiempo ha tardado la luz en llegar a nosotros (pero no qué tan lejos está algo porque el Universo se está expandiendo). Un valor de desplazamiento hacia el rojo de 10 significa que la luz ha estado viajando durante 13.184 millones de años. La luz de las 13 galaxias con corrimiento al rojo fue una de las primeras que se envió al Universo después del Big Bang.

Esas son las galaxias que los astrónomos esperaban detectar con el JWST, y eso es lo que está haciendo el telescopio. Estas galaxias iluminaron el Amanecer Cósmico y son fundamentales para comprender cómo se forman y evolucionan las galaxias. "Las galaxias que se forman en estos momentos pueden ser las semillas de galaxias mucho más masivas y maduras en el Universo local", explican Curtis-Lake y los coautores en su artículo.



**Figura 5.** La representación de un artista de cómo podrían haber sido las primeras estrellas que iluminaron el universo en el Amanecer Cósmico. Crédito de la imagen: Equipo científico de la NASA/WMAP.

El Amanecer Cósmico representa una brecha en nuestra comprensión del Universo, y los intentos de llenar esa brecha se basan en una serie de suposiciones sobre la temperatura del gas y otros factores. Pero con sus instrumentos precisos, los astrónomos esperan que el JWST pueda llenar el vacío con datos.

“Es difícil entender las galaxias sin comprender los períodos iniciales de su desarrollo. Al igual que con los humanos, gran parte de lo que sucede después depende del impacto de estas primeras generaciones de estrellas”, dijo el astrónomo y coautor Sandro Tacchella de la Universidad de

Cambridge en el Reino Unido. “Tantas preguntas sobre las galaxias han estado esperando la oportunidad transformadora de Webb, y estamos encantados de poder participar en la revelación de esta historia”.

En su artículo, Curtis-Lake y sus coautores reconocen este hito en la cosmología. “Concluimos enfatizando que este es claramente un resultado histórico para la misión JWST, que empuja la frontera espectroscópica a una época marcadamente anterior de formación de galaxias”, escriben.

El JWST está solo al comienzo de su misión, y encontrar estos abandonos de Lyman en galaxias antiguas es un paso crítico. “Además de proporcionar detecciones claras de las pérdidas de Lyman de hasta  $z = 13,2$ , estas observaciones de JADES también muestran el poder de la espectroscopia para investigar la física de estas galaxias y el IGM”, escriben Curtis-Lake y sus coautores.

"Verdaderamente, este es solo un punto de partida para la misión".

## Referencias

[1] “Spectroscopy of four metal-poor galaxies beyond redshift ten,” by Curtis-Lake et al. 2022. URL: [https://webbtelescope.org/files/live/sites/webb/files/home/webb-science/early-highlights/\\_documents/2022-061-jades/JADES\\_CurtisLake.pdf](https://webbtelescope.org/files/live/sites/webb/files/home/webb-science/early-highlights/_documents/2022-061-jades/JADES_CurtisLake.pdf)

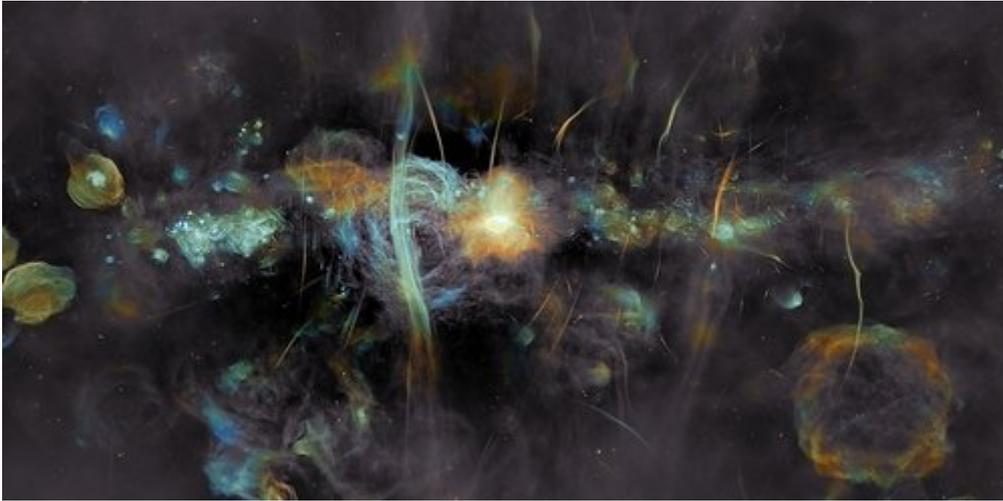
[2] “Discovery and properties of the earliest galaxies with confirmed distances,” by Robertson et al. 2022. ArXiv.org: <https://arxiv.org/abs/2212.04480>

[3] *Webb Completes its First “Deep Field” With Nine Days of Observing Time. What did it Find?* Posted on December 12, 2022 by Evan Gough. URL: <https://www.universetoday.com/159149/webb-completes-its-first-deep-field-with-nine-days-of-observing-time-what-did-it-find/>

Artículo editado y traducido por Juan F. González.

# 27. Búsqueda de axiones en el Centro Galáctico

[Editar](#)



**Figura 1.** I. Heywood/University of Oxford; SARA0; J. C. Muñoz-Mateos/ESO. Imágenes del Centro Galáctico.

El axi3n, una part3cula elemental hipot3tica, se concibi3 originalmente para resolver un rompecabezas relacionado con una de las cuatro fuerzas fundamentales. Luego, los te3ricos encontraron otro uso para esta supuesta part3cula como componente de la materia oscura, la sustancia misteriosa que constituye el 27% de la masa del Universo. Un lugar donde podr3an aparecer axiones es en los espectros de radio de las estrellas de neutrones. Ahora, los investigadores que buscan esa firma han derivado un nuevo l3mite superior en una propiedad clave de los axiones: la fuerza con la que interactúan con los fotones [1]. Un enfoque para detectar axiones es aplicar un fuerte campo magn3tico a una cavidad de microondas y luego buscar una se±al predicha de axiones que se conviertan en fotones. En 2009, un par de astr3nomos propusieron que esta conversi3n tambi3n podr3a ocurrir en el plasma enhebrado por el campo magn3tico ultrafuerte de una estrella de neutrones. Se prev3 que la conversi3n se manifieste como una l3nea estrecha de emisi3n de radiofrecuencia cuya frecuencia exacta depende de la masa del axi3n y cuya amplitud depende de la densidad del axi3n. La se±al predicha est3 fuera del alcance de los telescopios actuales. Sin embargo, en 2020, Joshua Foster, del Instituto Tecnol3gico de Massachusetts, y sus colaboradores demostraron que es posible derivar l3mites superiores 3tiles sobre la fuerza de la conversi3n axi3n-fot3n al buscar la se±al donde es probable que sea m3s fuerte: el Centro Gal3ctico. Ahora, el mismo equipo ha buscado esa se±al en los datos recopilados durante una b3squeda de firmas de vida extraterrestre inteligente. Examinan un rango m3s alto y m3s amplio de masa de axi3n que antes (15–35  $\mu\text{eV}$  frente a 5–11  $\mu\text{eV}$ ) y utilizar un modelo m3s detallado de la poblaci3n de estrellas de neutrones. La evidencia de axiones sigue siendo esquiva, pero el nuevo l3mite de fuerza de interacci3n es m3s estricto.

–Charles Day es escritor y editor con sede en Washington, DC, y ex editor en jefe de Physics Today.

## Referencias

[1] J. W. Foster et al., “Extraterrestrial axion search with the Breakthrough Listen Galactic Center survey,” [Phys. Rev. Lett. 129, 251102 \(2022\)](#).

[2] *Hunting for Axions in the Galactic Center*, December 13, 2022• Physics 15, s163. Phys.org news.

Artículo editado y traducido por Juan F. González

## 28. ¿Por qué están de moda los agujeros de gusano (wormholes)?

[Editar](#)

***Por qué la investigación actual sobre agujeros de gusano es tan importante***

*(Artículo escrito originalmente el 18 de diciembre de 2022 por Matt Strassler)*

Una vez que eliminemos la exageración y nos demos cuenta de que nadie está haciendo nada tan potencialmente peligroso como hacer agujeros de gusano reales (en los que podría caer) en un laboratorio, o estudiar cómo para enviar perros a través de la galaxia, nos quedamos con una pregunta. ¿Por qué molestarse en investigar los agujeros de gusano?

La respuesta es que no tiene nada que ver con hacer agujeros de gusano... al menos, no en el sentido de los portales de ciencia ficción que tú y yo podríamos usar para viajar desde aquí a algún lugar lejano del universo. Tiene que ver con la posibilidad de obtener nuevos conocimientos sobre la física cuántica de la gravedad, el espacio y el tiempo. ¿Cómo estudiamos los agujeros negros y por qué?

**¿Por qué los científicos investigan sobre los agujeros negros? Hay al menos dos razones muy diferentes.**

Grandes agujeros negros se pueden observar en la naturaleza. Estos agujeros negros, que estudian los astrónomos y los experimentadores de ondas gravitacionales, están bien descritos por la física no cuántica, la física "clásica", donde el futuro es (en principio) verdaderamente predecible a partir del pasado.

Los pequeños agujeros negros son una ventana a la gravedad cuántica: la física cuántica desconocida del espacio-tiempo, donde el espacio mismo se rige por el principio de incertidumbre, lo que significa que la forma misma del espacio-tiempo no se puede especificar con precisión. Esto es relevante para los agujeros negros que son demasiado pequeños para que los descubramos usando la astronomía, pero demasiado difíciles para que los produzcamos experimentalmente. Son importantes porque plantean problemas conceptuales y rompecabezas para la gravedad cuántica. Los físicos teóricos piensan en los agujeros negros y estudian sus matemáticas con la esperanza de descubrir los secretos de la gravedad cuántica.

Para obtener más información sobre su funcionamiento, los científicos también simulan agujeros negros en computadoras y estudian análogos a los agujeros negros en laboratorios.

## **¿Por qué importan los agujeros de gusano a los físicos teóricos?**

A diferencia de los agujeros negros, es posible que no haya agujeros de gusano dignos de ese nombre en ningún lugar de nuestro universo. Aunque investigaciones recientes muestran claramente que no existe un principio que prohíba la existencia de agujeros de gusano, también muestra que es poco probable que se puedan producir grandes agujeros de gusano o que puedan perdurar en nuestro universo. Mientras que los agujeros negros son un resultado genérico del colapso de una estrella enorme, los agujeros de gusano son relativamente delicados y difíciles de crear y mantener.

Pero los agujeros de gusano pueden ser incluso más interesantes que los agujeros negros para los problemas de la gravedad cuántica. Esto solo se apreció, lentamente al principio, durante los últimos 10 años.

Es difícil definir el estado cuántico de un agujero negro. [En la física cuántica, los objetos no solo tienen ubicaciones y movimientos; en términos generales, tienen "estados", en los que tienen una combinación de muchas ubicaciones y movimientos a la vez.] El obstáculo básico es la entropía, una medida de información faltante. El aire de tu habitación tiene entropía, porque aunque sepas su temperatura y presión, no sabes dónde está cada átomo de aire; eso es información faltante. Resulta que un agujero negro también tiene entropía, lo que significa que nuestra descripción habitual de un agujero negro carece intrínsecamente de información crucial. Eso nos impide saber con precisión cuál es su estado.

Pero, sorprendentemente, en algunas circunstancias, el estado cuántico de un agujero de gusano puede definirse claramente, en cuyo caso su entropía es cero. (A tal agujero de gusano no le falta ninguna información. Pero si tomas la mitad de este agujero de gusano e ignoras la otra mitad, encuentras un agujero negro. Ese agujero negro tiene entropía precisamente porque estás ignorando toda la información incluida en la otra mitad del agujero de gusano!) Obtener y comprender tal agujero de gusano implica darle dos descripciones aparentemente diferentes pero en realidad intercambiables, una en términos de espacio-tiempo y gravedad, donde la forma geométrica del agujero de gusano es clara, y otra en términos de lo que se podría llamar un sistema cuántico auxiliar independiente de la gravedad, en el que su estado cuántico se define con precisión.

## **El poder de la dualidad: una piedra de Rosetta para la gravedad cuántica**

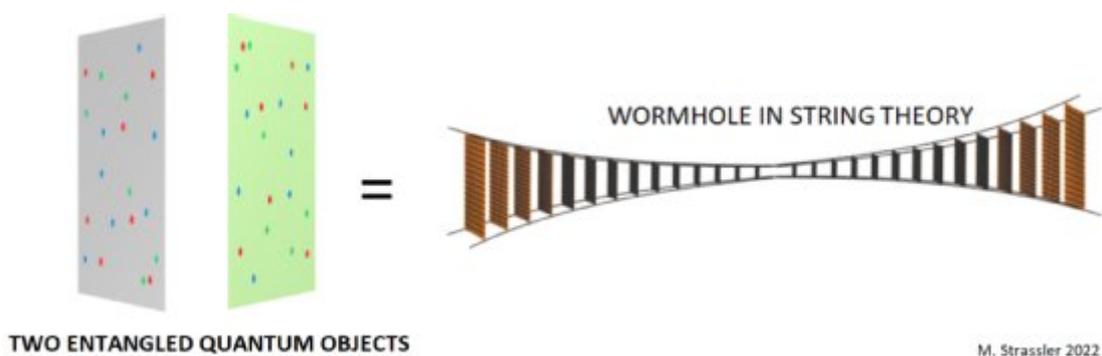
Un objeto físico, dos descripciones cuánticas: una con gravedad, otra sin ella; el primero con más dimensiones espaciales que el segundo. Es como poder leer el mismo texto en dos idiomas completamente diferentes. Es un ejemplo de lo que los físicos a menudo llaman "una dualidad".

Este es el mensaje del mantra de “ER=EPR”, en referencia a dos artículos famosos y aparentemente no relacionados de 1935 de Einstein y Rosen, el segundo con Podolsky como coautor. ER=EPR afirma que dos cosas aparentemente diferentes:

a) Un puente tangible a través del espacio extradimensional curvo entre dos regiones, denominado puente de Einstein-Rosen (ER bridge, puente ER),

y

b) Un puente menos tangible, establecido con entrelazamiento cuántico entre objetos en las mismas dos regiones, sin ningún uso de la gravedad, Einstein-Podolsky-Rosen (EPR bridge, puente EPR) son literalmente lo mismo.



**Figura 1.** Una ilustración conceptual de la propuesta de que dos sistemas cuánticos perfectamente entrelazados (EPR) son equivalentes a un agujero de gusano que conecta las ubicaciones de esos sistemas (ER) y representan dos lenguajes para describir exactamente lo mismo. El agujero de gusano está vacío; las losas que se muestran simplemente indican cómo las distancias se reducen a medida que uno avanza hacia el punto medio del agujero de gusano. No se muestra que el agujero de gusano cambie de forma con el tiempo; para la situación de esta imagen, este agujero de gusano es "no transitable", porque no hay tiempo suficiente para cruzar de un lado del puente al otro antes de que se reduzca a la nada. Créditos: Matt Strassler (2022).

Descubrir que el espacio-tiempo está relacionado con el entrelazamiento cuántico, y que ER y EPR involucran los mismos problemas, es algo así como descubrir que dos textos mal entendidos y parcialmente legibles en idiomas completamente diferentes son en realidad dos traducciones de exactamente el mismo documento. Es una piedra de Rosetta. Partes del documento se pueden leer fácilmente en un idioma, otras partes en el segundo idioma; y juntándolos, encontramos que podemos leer más y más.

De manera similar, las matemáticas de un agujero de gusano (ER) se ven completamente diferentes de las matemáticas de dos sistemas no gravitacionales (EPR) entrelazados cuánticamente. Pero en casos particulares, argumentaron Juan Maldacena y Lenny Susskind, son dos lenguajes que describen el mismo objeto. Podemos combinar estas dos vistas parciales de este único objeto para aprender más y más sobre él.

Además, debido a que estamos usando matemáticas, no texto, podemos ir un paso más allá. Incluso en regímenes en los que no podemos “leer el documento” en ninguno de los dos idiomas, podemos usar computadoras para explorar. Los científicos pueden intentar simular las matemáticas de los

sistemas cuánticos auxiliares entrelazados en una computadora, idealmente una computadora cuántica para que realice un seguimiento de todos los efectos cuánticos, para aprender más sobre el comportamiento del agujero de gusano en regímenes en los que no tenemos idea de cómo funciona, en regiones donde el principio de incertidumbre cuántica afecta el espacio y el tiempo.

Aún más notable sería realmente hacer, no simplemente simular, este par entrelazado de sistemas cuánticos auxiliares. Entonces estaríamos más cerca de hacer un agujero de gusano, con leyes de la naturaleza diferentes a las nuestras y con su propia gravedad, que conecta con nuestro mundo. Pero eso está muy lejos, y no es la historia por el momento.

## **De ER=EPR a agujeros de gusano atravesables**

Otro avance, más allá de la idea original de ER=EPR, se produjo con el trabajo de Gao, Jafferis y Wall (ver también aquí y aquí) en el que se demostró por primera vez que los "agujeros de gusano atravesables", que realmente pueden servir como puentes a través de los cuales se pueden transportar objetos, tienen sentido físico. Sorprendentemente, están relacionados por dualidad con un área de investigación importante y emocionante en información cuántica, llamada "teletransportación cuántica". Ese es el proceso mediante el cual, utilizando dos sistemas cuánticos entrelazados, la información cuántica puede llevarse a uno de los sistemas, destruirse en ese sistema y recrearse en ese segundo sistema a cierta distancia. Una vez más, no espere que nadie teletransporte a su perro, pero la información simple y los objetos ultramicroscópicos pueden transportarse.

Sin embargo, ten cuidado; la teletransportación solo funciona si se intercambia información adicional no cuántica entre los dos sistemas. En el lenguaje de los agujeros de gusano, eso significa que solo se puede atravesar el agujero de gusano si la información también pasa fuera del agujero de gusano desde la región de salida hasta la región de llegada. Esto hace que sea imposible ir a algún lugar al que no hayas enviado mensajes y usar cualquier agujero de gusano como un atajo, es decir, llegar a tu destino más rápido de lo que podría hacerlo una nave espacial a la velocidad de la luz que viaja fuera del agujero de gusano. Los portales a lugares ultra distantes no solo siguen siendo ciencia ficción, sino que ahora parece incluso más probable que sigan siéndolo.

Aún así, con estas advertencias, todavía hay algo sorprendente aquí: ahora podemos imaginar usar la piedra de la dualidad de Rosetta para simular un agujero de gusano atravesable y aprender cómo funciona en la gravedad cuántica. ¡Eso sería fantástico!

## **El sueño de simular la gravedad cuántica**

Este es un sueño, aún por cumplir. Las computadoras están lejos de ser capaces de manejar las preguntas que nos gustaría responder sobre la gravedad con la que vivimos en nuestro "espacio-tiempo de cuatro dimensiones" (nuestras tres dimensiones espaciales familiares, más una más para el tiempo). Pero al simplificar el problema en varios pasos (ver la última figura de esta publicación), al menos podemos esperar responder algunas de las primeras preguntas en un tipo de agujero de gusano mucho más simple en un tipo de gravedad más simple. Esto es lo que preferiría llamar un agujero de gusano de dibujos animados simulado artificialmente, en lugar de

un agujero de gusano "bebé", porque a diferencia de un bebé, no es una versión pequeña de un adulto, ni tiene ninguna esperanza de convertirse en uno. Es más como una figura de palo. Está en un espacio-tiempo bidimensional: un espacio y un tiempo.

Esa es una gran simplificación: ¡no hay nada como la gravedad normal allí! [Peor aún, no tenemos una dualidad exacta en ese caso; el sistema cuántico auxiliar que necesitamos no es realmente el mismo "texto" que el agujero de gusano. Estos son dos sistemas, no uno, con una superposición limitada pero útil.]

Pero las caricaturas no son para burlarse. No los subestimes; Las caricaturas son una herramienta poderosa para los educadores de todo el mundo, y las caricaturas políticas subversivas han ayudado a derribar gobiernos. Durante décadas, físicos famosos, Schwinger, 't Hooft, Gross y Neveu, Kogut y Susskind, y muchos más, han estudiado versiones de dibujos animados de la física real, especialmente aquellas en las que nuestras cuatro dimensiones espacio-temporales se reemplazan con solo dos. A menudo han aprendido lecciones interesantes al hacerlo, a veces incluso profundas.

[Nota: la física de figuras de palitos también puede ser una muy buena descripción de los sistemas reales de figuras de palitos, por ejemplo, una cadena unidimensional de átomos dentro de un material.]

Me apresuro a advertirles que esta técnica no siempre funciona. No todas las lecciones aprendidas de la física de figuras de palitos se aplican al problema del mundo real correspondiente. Pero este método ha tenido suficiente éxito como para que nos tomemos en serio los estudios de dibujos animados.

Esta es la razón por la que puede valer la pena la exploración de agujeros de gusano unidimensionales y de algún tipo de problema cuántico auxiliar con el que puedan estar aproximadamente relacionados. Y es por eso que es importante aprender a simular estos sistemas cuánticos auxiliares en computadoras cuánticas, como se hizo en el documento que generó todo el revuelo, en base a las propuestas hechas en este documento y este. Incluso si no podemos esperar comprender pronto cómo emerge el espacio cuántico tridimensional del entrelazamiento cuántico, tal vez podamos esperar aprender más sobre el espacio cuántico unidimensional, utilizando la simulación por computadora cuántica. Tal vez lo que aprendamos allí ya nos enseñaría una verdad profunda y universal sobre la gravedad cuántica, o al menos sugeriría nuevas formas de pensar sobre sus sutilezas.

El experimento realizado en un polémico artículo reciente es un pequeño paso en esta dirección. Otros han intentado algo similar, pero este es el primer experimento que parece haberse centrado en el régimen verdaderamente similar a un agujero de gusano, y encontró alguna evidencia de lo que ya se esperaba de los agujeros de gusano (a partir del cálculo directo y de las computadoras clásicas... escribir sobre esos detalles en una publicación futura). Eso parece un verdadero paso adelante. Pero mantengamos las cosas en perspectiva. Este experimento no creó nuevos conocimientos; sus logros fueron técnicos y tecnológicos. No es un avance conceptual. ("(...)No estoy solo en esta opinión; Lenny Susskind, Dan Harlow y Scott Aaronson expresaron la misma opinión en el New York Times y en otros lugares(...) " dice M. Strassler).

Sin embargo, este experimento representa una pequeña flecha que apunta a un posible gran futuro... no el futuro de un nuevo Elon Musk, construyendo agujeros de gusano por diversión y ganancias, sino el de un futuro Einstein, comprendiendo la naturaleza cuántica del propio espacio-tiempo, con objeto de entender el Universo y ayudar en la supervivencia futura de la Humanidad con tal conocimiento.

El traductor y editor de este artículo desea acabar la traducción y edición del mismo con su frase propia favorita para sus estudiantes y conocidos: "El conocimiento lleva tiempo, el entendimiento y comprensión aún más tiempo. Ese tiempo depende subjetivamente de la dedicación, capacidades innatas y adquiridas por cada individuo y conjunto de individuos, no siendo el mismo para cada persona y conjunto de personas." La Ciencia avanza progresivamente lentamente, o a veces rápidamente por saltos o explosiones puntuales, por lo que funciona a dos marchas en general. Nada libra de errores a la Ciencia y los científicos, así que la paciencia es una virtud a cultivar. Ser impaciente en Ciencia lleva a debacles y desastres. La propia Historia de la Ciencia suele registrarlos.

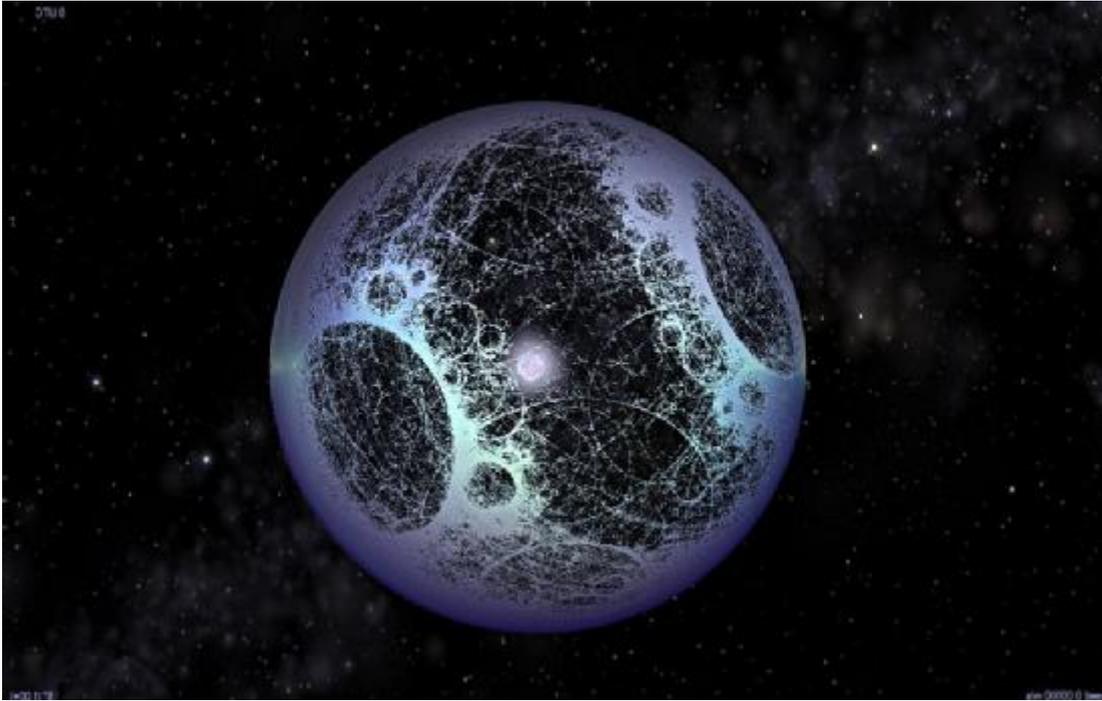
### **Referencias**

[1] *Why Current Wormhole Research is So Important*, December 18, 2022 by Matt Strassler. Personal blog: *Of Particular Significance Conversations About Science with Theoretical Physicist Matt Strassler*.

Artículo editado y traducido por Juan F. González.

## **29. Buscando señales de motores de curvatura ("warp drive") extraterrestres**

[Editar](#)



**Figura 1.** Impresión artística de una Esfera Dyson. La construcción de una estructura de ingeniería tan masiva crearía una firma tecnológica que podría ser detectada por la humanidad. Crédito: [SentientDevelopments.com/Eburacum45](https://www.SentientDevelopments.com/Eburacum45).

Artículo traducido y editado del original publicado el 19 de diciembre de 2022 por Matt Williams:

### ***Los observatorios de ondas gravitacionales podrían buscar señales de los motores de curvatura, o Warp Drive***

En 2016, los científicos del Observatorio de ondas gravitacionales con interferómetro láser (LIGO) anunciaron que habían realizado la primera detección confirmada de ondas gravitacionales (GW). Este descubrimiento confirmó una predicción hecha un siglo antes por Einstein y su Teoría de la Relatividad General y abrió la puerta a un campo completamente nuevo de investigación astrofísica. Mediante el estudio de las ondas provocadas por la fusión de objetos masivos, los científicos podrían sondear el interior de las estrellas de neutrones, detectar materia oscura y descubrir nuevas partículas alrededor de los agujeros negros supermasivos (SMBH, Supermassive Black Holes).

Según una nueva investigación dirigida por el Laboratorio de Propulsión Avanzada de Física Aplicada (APL-AP), los GW también podrían usarse en la Búsqueda de Inteligencia Extraterrestre (SETI). Como afirman en su artículo, LIGO y otros observatorios (como Virgo y KAGRA) tienen el potencial de buscar GW creados por naves espaciales de aceleración rápida y/o masiva (RAMAcraft). Al combinar el poder de estos observatorios y los de la próxima generación, podríamos crear un sistema RAMAcraft Detection And Ranging (RAMADAR) que podría sondear todas las estrellas de la Vía Láctea (100 a 200 mil millones) en busca de signos de señales similares a motores warp o de curvatura.

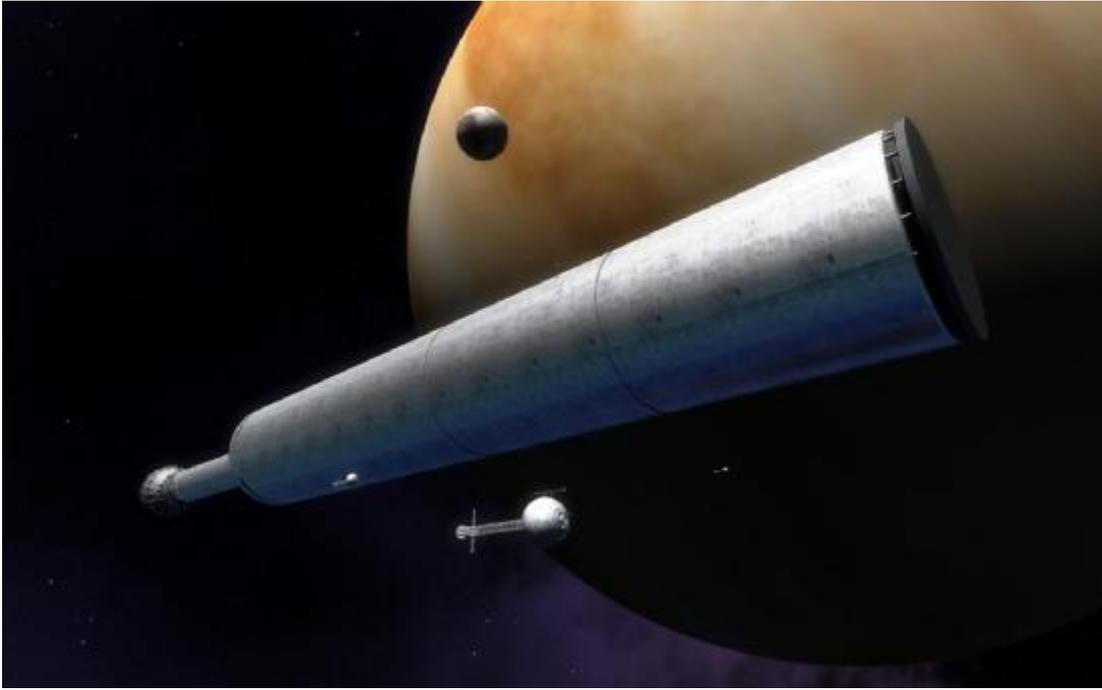
El equipo fue dirigido por Luke Sellers, asistente de investigación graduado de la Universidad de California en Los Ángeles (UCLA), y el APL (un laboratorio aeroespacial especializado con sede en Estocolmo) en Applied Physics, un grupo de investigación independiente. A él se unieron investigadores del Technion - Instituto de Tecnología de Israel, la Universidad de Lund (Lund, Suecia) y la Universidad Carnegie Mellon en Pittsburg. El artículo que describe sus hallazgos (el primero de una serie) se publicará en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*.

Para los fanáticos de la ciencia ficción clásica, el nombre RAMAcraft probablemente no necesite explicación. Para aquellos que no estén familiarizados, el término es una alusión a una de las novelas más famosas de Arthur C. Clarke, [\*Rendezvous with Rama\*](#), publicada en 1973. Esta historia tiene lugar en un futuro cercano cuando una nave espacial extraterrestre masiva ingresa al Sistema Solar y un se envía una misión para explorar su interior. La historia popularizó la idea de una nave espacial, una nave espacial lo suficientemente grande como para contener una población entera y un ecosistema que gira para simular la gravedad.

Al igual que las megaestructuras, las naves mundo se consideran candidatas viables para las encuestas SETI, ya que sin duda producirían firmas tecnológicas. De acuerdo con la Relatividad General (GR) de Einstein, un objeto masivo que se acelera a través del espacio generaría ondas en el tejido del espacio-tiempo mismo. Para su estudio, el equipo calculó las formas de onda que produciría un RAMAcraft con aceleración lineal en función de un rango de posibles masas y aceleraciones. Como Sellers le dijo a *Universe Today* por correo electrónico, estas señales serían detectables por LIGO, Virgo y KAGRA:

“Cualquier sistema que involucre la aceleración masiva de la masa emite ondas gravitacionales (GW). Además, la forma de la señal emitida depende completamente de la forma en que se mueve el objeto. Por lo tanto, si sabe lo que quiere buscar, sabe exactamente cómo se verá la señal GW. Esto es lo que nos permite buscar RAMAcraft”.

Específicamente, Sellers y sus colegas mostraron cómo los datos LIGO existentes podrían usarse para buscar objetos en la Vía Láctea que tengan la misma masa que Júpiter ( toneladas métricas; toneladas estadounidenses). Además, demostraron que los investigadores de SETI podrían usar los datos de LIGO para buscar en los sistemas estelares cercanos objetos con una masa igual a la de la Luna de la Tierra ( toneladas métricas; toneladas estadounidenses). Según la naturaleza de las señales de GW, estas podrían ser una posible evidencia de megaestructuras (o indicaciones de una civilización Tipo II en la Escala Kardashev).



**Figura 2.** Concepto artístico de una “nave del mundo” (worldship). Crédito: Adrian Mann.

En resumen, se podría buscar una amplia gama de RAMAcraft utilizando los datos GW existentes, dependiendo de qué tan lejos quieran buscar las encuestas. Dichos vendedores:

“Algunos de los números citados en el estudio son de estructuras bastante masivas, aunque también se pueden ver cosas más pequeñas si están más cerca de la Tierra. El rango en el documento es que podemos ver masas de Júpiter hasta alrededor de 10-100 kpc (kilopársecs), lo que cubre toda la galaxia, pero también podemos ver objetos del tamaño de la luna hasta 1-10 pc (pársecs), que está dentro del rango. de las estrellas más cercanas, como Proxima Centauri.”

Para darle una idea de qué tipos de megaestructuras serían detectables, el investigador Anders Sandberg del Future of Humanity Institute (FHI) en Oxford estima que una estructura de Dyson que mide 1 AU (Astronomical Unit, unidad astronómica o UA) de diámetro (la distancia entre la Tierra y el Sol) tienen una masa de  $2.17 \cdot 10^{17}$  toneladas métricas ( $\$2.39 \cdot 10^{17}$  toneladas estadounidenses). Este tipo de sensibilidad estará disponible utilizando observatorios de próxima generación de ondas gravitacionales como la Antena espacial interferómetro láser (LISA), el Observatorio de ondas gravitacionales con interferómetro de decihercios (DECIGO), el Observador del Big Bang (BBO), Pulsar Timing Arrays (PTA) y otros.

<https://www.youtube.com/watch?v=3jjjyCMWNPA>

**Vídeo 1.** ¿Qué son las ondas gravitacionales? What are gravitational waves? Créditos: Fraser Cain.

Estos observatorios serán hasta 100 veces más sensibles a las GW en frecuencias más bajas y ampliarán el volumen de búsqueda de RAMAcraft un millón de veces. En un estudio anterior, los investigadores de APL-AP presentaron el primer modelo general para un motor warp físico. Si bien es similar en concepto al Warp Drive (motor de curvatura) de Alcubierre, el modelo físico se basa en energía positiva subliminal y burbujas warp esféricamente simétricas. Su investigación

demonstró que cualquier impulso warp consistiría en una capa de material regular o exótico que se mueve inercialmente con una cierta velocidad, lo que significa que produciría GW.

Esto podría abrir una nueva frontera en la investigación SETI y permitir a los científicos explorar miles de galaxias en busca de tecnología avanzada. Dichos vendedores, un RAMARADAR podría tener las siguientes implicaciones:

“Los estudios SETI actualmente analizan las señales electromagnéticas (principalmente ondas de radio) en busca de signos de vida inteligente. Este es definitivamente un esfuerzo útil, aunque lo que estamos proponiendo proporcionaría los siguientes beneficios:

1. No todos los sistemas emiten ondas EM, pero casi todos los sistemas que implican la aceleración masiva de masas emiten GW.
1. Las ondas EM a menudo se absorben en el cosmos/atmósfera, mientras que las ondas GW no lo son.
1. Los detectores GW no necesitan ser "dirigidos" como los telescopios EM. Los detectores GW simplemente se sientan allí y detectan lo que pasa a través de ellos, lo que hace que sea mucho menos probable que se pierda una señal.
1. Por esta razón, los detectores GW pueden buscar todo tipo de señales a la vez, eliminando el costo de oportunidad de buscar una señal frente a otra que está presente en los telescopios EM.
1. Las señales GW disminuyen proporcionalmente a  $1/R$ , donde R es la distancia desde la fuente. Las señales EM disminuyen proporcionalmente a  $1/R^2$ , por lo que las señales GW disminuyen mucho menos rápido."

00:00

01:13

**Vídeo 2. Simulating Xtreme Spacetimes. SXS project.** Simulando espacio-tiempos extremos. Proyecto SXS. Merger o fusión de dos agujeros negros binarios, con detalles de la emisión de ondas gravitacionales en dicha simulación. URL:[www.black-holes.org](http://www.black-holes.org)

Este artículo [1] es el primero de una serie que examinó cómo se podrían utilizar GW para buscar firmas tecnológicas y evidencia de vida avanzada. En próximas entregas, Sellers y sus colegas abordarán cómo (utilizando datos LIGO) los objetos más pequeños podrían detectarse más cerca de casa. “Para este primer artículo, observamos objetos lejanos. La señal para los objetos más cercanos a nosotros será mucho más fuerte, así que esto es lo que queremos ver a continuación”, dijo Sellers. "También haremos una búsqueda real de las señales a través de datos LIGO anteriores".

Como se señaló, la detección confirmada de GW en 2016 condujo a una revolución en la astronomía al brindar a los científicos una nueva herramienta para sondear el Universo. Hasta la fecha, las aplicaciones propuestas han consistido en estudiar objetos exóticos y probar las leyes de la física en ambientes extremos. La búsqueda de evidencia de civilizaciones avanzadas es otra posibilidad emocionante que permitirá a los científicos probar teorías sobre lo que podrían hacer

las civilizaciones avanzadas (es decir, construir megaestructuras, enviar mundonaves a través del cosmos, inventar sistemas de propulsión avanzados) y otros comportamientos de civilizaciones Tipo II.

## Referencias

[1] Luke Sellers, Alexey Bobrick, Gianni Martire, Michael Andrews, Manfred Paulini, en *Searching for Intelligent Life in Gravitational Wave Signals Part I: Present Capabilities and Future Horizons*. URL: <https://arxiv.org/pdf/2212.02065.pdf>

[2] December 19, 2022 by Matt Williams. *Gravitational Wave Observatories Could Search for Warp Drive Signatures*. Universe Today magazine. URL: <https://www.universetoday.com/159218/gravitational-wave-observatories-could-search-for-warp-drive-signatures/>

[3] Posted on January 19, 2017 by Matt Williams: *What is the Alcubierre "Warp" Drive?* Universe Today magazine. URL: <https://www.universetoday.com/89074/what-is-the-alcubierre-warp-drive/>

Artículo editado y traducido por Juan F. González

## 30. ¿Qué es el motor de curvatura de Alcubierre, o "Alcubierre warp drive"?

[Editar](#)



**Figura 1.** No hay problemas de plausibilidad inmediatos con esta imagen, ya que el velocímetro dice 0.8c. Pasar 1.0c es donde se vuelve complicado.

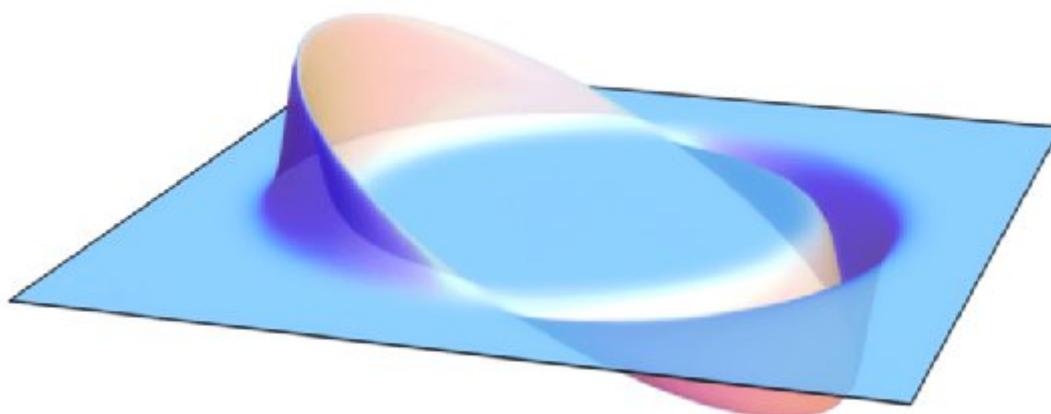
*Publicado el 19 de enero de 2017 por Matt Williams*  
**¿Qué es el Drive "Warp" de Alcubierre?**

Siempre es bueno saber que las ideas que son comunes en la ciencia ficción tienen una base en los hechos científicos. Congeladores criogénicos, pistolas láser, robots, implantes de silicato... ¡y no nos olvidemos del motor warp! Lo crea o no, este concepto, conocido alternativamente como viaje FTL (más rápido que la luz, Faster Than Light en inglés), hiperespacio, velocidad de la luz, etc., en realidad tiene un pie en el mundo de la ciencia real.

En física, es lo que se conoce como Alcubierre Warp Drive. Sobre el papel, es una solución altamente especulativa, pero posiblemente válida, de las ecuaciones de campo de Einstein, específicamente cómo interactúan el espacio, el tiempo y la energía. En este modelo matemático particular del espacio-tiempo, hay características que aparentemente recuerdan el "impulso warp" o "hiperespacio" ficticio de las franquicias de ciencia ficción notables, de ahí la asociación.

*Base o background:*

Desde que Einstein propuso por primera vez la Teoría Especial de la Relatividad en 1905, los científicos han estado operando bajo las restricciones impuestas por un universo relativista. Una de estas restricciones es la creencia de que la velocidad de la luz es irrompible y, por lo tanto, que nunca existirá un viaje o exploración espacial FTL.



**Figura 2.** Visualización de un campo warp, según el Alcubierre Drive. Crédito AllenMcC.

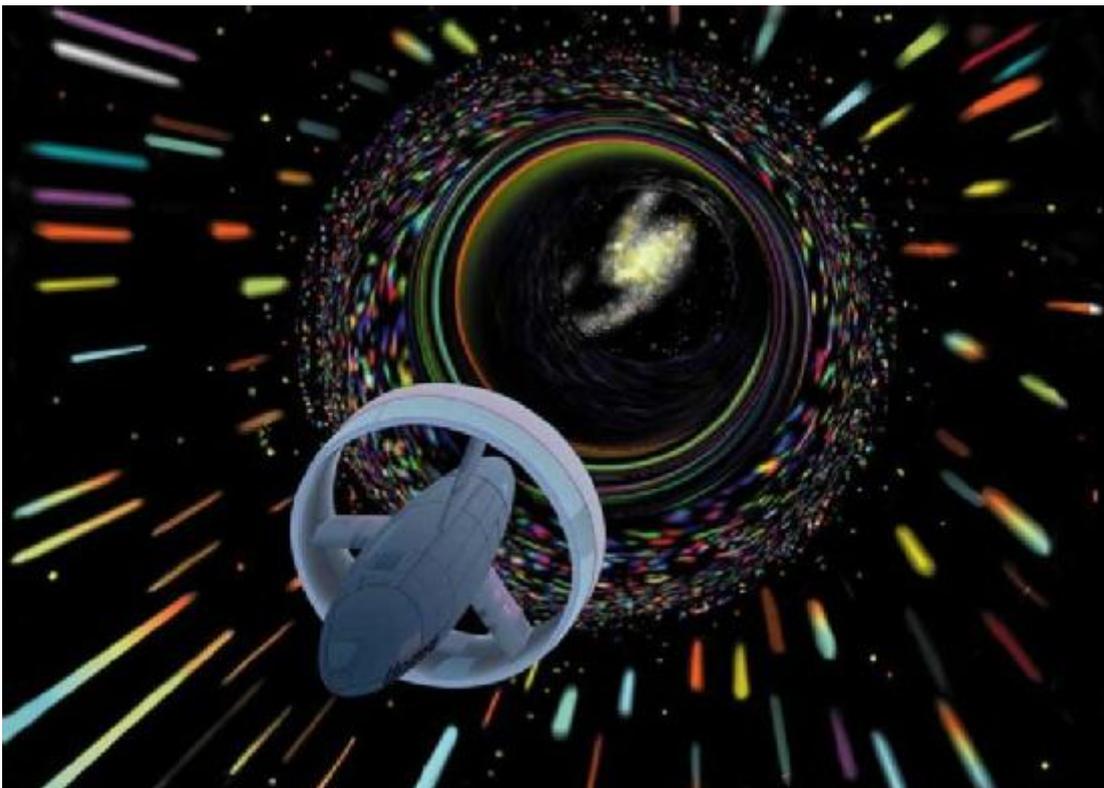
A pesar de que las generaciones posteriores de científicos e ingenieros lograron romper la barrera del sonido y vencer la atracción de la gravedad de la Tierra, la velocidad de la luz parecía ser una barrera destinada a resistir. Pero luego, en 1994, un físico mexicano llamado Miguel Alcubierre presentó un método propuesto para estirar el tejido del espacio-tiempo de una manera que, en teoría, permitiría que los viajes FTL tomaran el ritmo.

**Concepto:**

En pocas palabras, este método de viaje espacial consiste en estirar la estructura del espacio-tiempo en una onda que (en teoría) haría que el espacio delante de un objeto se contrajera mientras que el espacio detrás de él se expandiría. Un objeto dentro de esta ola (es decir, una nave espacial) podría viajar en esta región, conocida como una "burbuja de deformación" del espacio plano.

Es lo que se conoce como la "Métrica de Alcubierre". Interpretada en el contexto de la Relatividad General, la métrica permite que una burbuja warp aparezca en una región previamente plana del espacio-tiempo y se aleje, efectivamente a velocidades que exceden la velocidad de la luz. El interior de la burbuja es el marco de referencia inercial para cualquier objeto que la habite.

Dado que la nave no se mueve dentro de esta burbuja, sino que es arrastrada a medida que la región se mueve, los efectos relativistas convencionales, como la dilatación del tiempo, no se aplicarían. Por lo tanto, las reglas del espacio-tiempo y las leyes de la relatividad no se violarían en el sentido convencional.



**Figura 3.** Concepto artístico de una nave espacial utilizando un Alcubierre Warp Drive. Crédito: NASA.

Una de las razones de esto es que este método no se basaría en moverse más rápido que la luz en el sentido local, ya que un rayo de luz dentro de esta burbuja siempre se movería más rápido que la nave. Solo es "más rápido que la luz" en el sentido de que la nave podría llegar a su destino más rápido que un rayo de luz que viajaba fuera de la burbuja warp.

#### ***Dificultades:***

Sin embargo, hay pocos problemas con esta teoría. Por un lado, no existen métodos conocidos para crear una burbuja de deformación de este tipo en una región del espacio que no contenga una. En segundo lugar, suponiendo que hubiera una forma de crear tal burbuja, todavía no se conoce

ninguna forma de salir una vez dentro de ella. Como resultado, la pulsión (o métrica) de Alcubierre permanece en la categoría de teoría en este momento.

Matemáticamente, se puede representar mediante la siguiente ecuación: , donde  $a$  es la función de lapso que da el intervalo de tiempo propio entre hipersuperficies cercanas,  $\mathbf{a}$  es el vector de desplazamiento que relaciona los sistemas de coordenadas espaciales en diferentes hipersuperficies y  $g$  es una métrica definida positiva en cada una de las hipersuperficies.

### ***Intentos de desarrollo:***

En 1996, la NASA fundó un proyecto de investigación conocido como Breakthrough Propulsion Physics Project (BPP) para estudiar varias propuestas y tecnologías de naves espaciales. En 2002, se interrumpió la financiación del proyecto, lo que llevó al fundador, Marc G. Millis, y a varios miembros a crear la [Fundación Tau Zero](#). Nombrada en honor a la famosa novela del mismo nombre de Poul Anderson, esta organización se dedica a investigar los viajes interestelares.

**Vídeo 1.** Can we really get to Alpha Centauri? Créditos: Fraser Cain. ¿Podemos realmente llegar a Alfa Centauro?

En 2012, el Laboratorio de Física de Propulsión Avanzada de la NASA (también conocido como Eagleworks) anunció que había comenzado a realizar experimentos para ver si era posible un "motor warp". Esto incluyó el desarrollo de un interferómetro para detectar las distorsiones espaciales producidas por la expansión y contracción del espacio-tiempo de la métrica de Alcubierre.

El líder del equipo, el Dr. Harold Sonny White, describió su trabajo en un artículo de la NASA titulado *Warp Field Mechanics 101*. [4] También explicó su trabajo en la publicación Roundup 2012 de la NASA:

“Hemos iniciado un banco de pruebas de interferómetro en este laboratorio, donde vamos a pasar e intentar generar una instancia microscópica de una pequeña burbuja de deformación. Y aunque esto es solo una instancia microscópica de los fenómenos, estamos perturbando el espacio-tiempo, una parte en 10 millones, una cantidad muy pequeña... Las matemáticas te permitirían ir a Alpha Centauri en dos semanas según lo medido por los relojes aquí en la Tierra. . Entonces, el reloj de alguien a bordo de la nave espacial tiene la misma frecuencia de tiempo que alguien en el control de la misión aquí en Houston. No hay fuerzas de marea, ni problemas indebidos, y la aceleración adecuada es cero. Cuando enciendes el campo, no todos van a estrellarse contra el mamparo, (lo cual) sería un viaje muy corto y triste”.

En 2013, el Dr. White y los miembros de Eagleworks publicaron los resultados de su prueba de campo warp de 19,6 segundos en condiciones de vacío. Estos resultados, que se consideraron no concluyentes, se presentaron en el Icarus Interstellar Starship Congress de 2013 celebrado en Dallas, Texas.

**Vídeo 2.** Is The Alcubierre Warp Drive Possible? Créditos: Space-Time Channel. ¿Es el motor de curvatura de Alcubierre posible?

Cuando se trata del futuro de la exploración espacial, algunas preguntas muy difíciles parecen inevitables. Y preguntas como "¿cuánto tiempo nos llevará encontrar la estrella más cercana?" parece bastante preocupante cuando no tenemos en cuenta algún tipo de hipervelocidad o método de tránsito más rápido que la luz. ¿Cómo podemos esperar convertirnos en una especie interestelar cuando todos los métodos disponibles llevarán siglos (o más) o implicarán enviar una nanonave en su lugar?

En la actualidad, tal cosa simplemente no parece estar completamente dentro del ámbito de la posibilidad. Y los intentos de demostrar lo contrario siguen siendo infructuosos o no concluyentes. Pero como nos ha enseñado la historia, lo que se considera imposible cambia con el tiempo. Algún día, ¿quién sabe lo que podríamos lograr? Pero hasta entonces, solo tendremos que ser pacientes y esperar futuras investigaciones.

Si desea obtener más información sobre la unidad "Warp" de Alcubierre, [consulte un artículo de Wikipedia](#). [2]

## Referencias

[1] Posted on January 19, 2017 by Matt Williams, *What is the Alcubierre "Warp" Drive?* Universe Today Magazine. URL: <https://www.universetoday.com/89074/what-is-the-alcubierre-warp-drive/>

[2] Wikipedia, the Free Encyclopedia, Wikimedia Foundation. *The Alcubierre Drive*, URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Alcubierre\\_drive](https://en.wikipedia.org/wiki/Alcubierre_drive)

[3] Mar 10, 2015, NASA news: *Is Warp Drive Real?* URL: <https://www.nasa.gov/centers/glenn/technology/warp/warp.html>

[4] White, Harold (NASA Johnson Space Center Houston, TX, United States), August 25, 2013. *Warp Field Mechanics* 101. URL: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20110015936.pdf>

[5] National Propulsion Systems, "The Alternate View" columns of John G. Cramer. *The Alcubierre Warp Drive*, by John G. Cramer. URL: <https://www.npl.washington.edu/av/altvw81.html>

[6] Miguel Alcubierre, *Classical and Quantum Gravity*, v. 11, pp. L73-L77, (1994). *The Warp Drive: Hyper-fast Travel Within General Relativity*. September 2000. *Classical and Quantum Gravity* 11(5). DOI:10.1088/0264-9381/11/5/001. ArXiv: <https://arxiv.org/pdf/gr-qc/0009013>

[7] C. W. Misner, K. S. Thorne, and J. A. Wheeler, *Gravitation*, W.H. Freeman (1973).

Artículo editado y traducido por Juan F. González

# 31.IXPE y la polarización de los magnétares

[Editar](#)

10 de noviembre de 2022

## **IXPE (telescopio de la NASA de rayos X) encuentra poderosos campos magnéticos y corteza sólida en una estrella de neutrones**

Menos de un año después del lanzamiento, las observaciones de una estrella de neutrones realizadas por Imaging X-ray Polarimetry Explorer (IXPE) de la NASA han llevado a la confirmación de lo que los científicos solo habían teorizado anteriormente: las magnetares tienen campos magnéticos ultrafuertes y están altamente polarizadas.

Los científicos utilizaron IXPE para observar la magnetar 4U 0142+61, una estrella de neutrones ubicada en la constelación de Casiopea, a unos 13000 años luz de la Tierra. Esta es la primera observación de polarización de rayos X de un magnétar, un tipo de estrella de neutrones con los campos magnéticos más poderosos del universo.

Los astrónomos descubrieron que la estrella de neutrones probablemente tenga una superficie sólida y no tenga atmósfera. Esta es la primera vez que los científicos han podido concluir de manera confiable que una estrella de neutrones tiene una corteza sólida desnuda, un hallazgo permitido por las mediciones de polarización de rayos X de IXPE.

La polarización es una propiedad de la luz que nos informa sobre los campos eléctricos y magnéticos interconectados que componen todas las longitudes de onda de la luz. Estos campos oscilan, o vibran, en ángulo recto en relación con la trayectoria de viaje de la luz. Cuando sus campos eléctricos vibran en una sola dirección unificada, decimos que la luz está polarizada.

Los astrónomos también encontraron que el ángulo de polarización depende de la energía de las partículas de luz, con luz de alta energía en un ángulo de polarización de 90 grados en comparación con la luz de baja energía.

"Descubrimos que el ángulo de polarización oscila exactamente 90 grados, siguiendo lo que los modelos teóricos predecirían si la estrella tuviera una corteza sólida rodeada por una magnetosfera externa llena de corrientes eléctricas", dijo Roberto Taverna de la Universidad de Padua, autor principal del estudio. el nuevo estudio en la revista Science.

Los científicos se sorprendieron al saber que los niveles de energía pueden afectar la polarización.

"Según las teorías actuales de los magnétares, esperábamos detectar la polarización, pero nadie predijo que la polarización dependería de la energía, como estamos viendo en este magnétar", dijo Martin Weisskopf, científico emérito de la NASA que dirigió el equipo IXPE desde la base de la misión. inicio hasta la primavera de 2022.

**Vídeo 1.** Este vídeo muestra la posición de la magnetar 4U 0142+61 en el universo. La magnetar es una estrella de neutrones situada en la constelación de Casiopea, a unos 13.000 años luz de la Tierra. Créditos: Roberto Taberna.

Además, la polarización a bajas energías indica que el campo magnético es tan inimaginablemente poderoso que podría haber convertido la atmósfera alrededor de la estrella de neutrones en sólida o líquida.

“Este es un fenómeno conocido como condensación magnética”, dijo el presidente del grupo de trabajo temático de magnetar del IXPE, Roberto Turolla, con la Universidad de Padua y el University College London.

Todavía es un tema de debate si las magnetares y otras estrellas de neutrones tienen atmósferas.

Gracias a las mediciones de polarización de rayos X, los astrofísicos ahora pueden verificar el grado de polarización y su ángulo de posición al probar los parámetros de los modelos de emisión de rayos X. Los hallazgos de las observaciones de IXPE ayudarán a los astrónomos de rayos X a comprender mejor la física de objetos extremos como magnetares y agujeros negros.

"Más allá del magnetar 4U 0142+61, IXPE se está utilizando para estudiar una amplia gama de fuentes extremas de rayos X, y se están obteniendo muchos resultados interesantes", dijo Fabio Muleri, científico del proyecto italiano IXPE del INAF-Institute for Space, Astrophysics and Planetology in Roma.

Para Weisskopf, está claro que las observaciones de IXPE han sido críticas.

“En mi opinión, no puede haber dudas de que IXPE ha demostrado que la polarimetría de rayos X es importante y relevante para mejorar nuestra comprensión de cómo funcionan estos fascinantes sistemas de rayos X”, dijo. “Las misiones futuras tendrán que ser conscientes de este hecho”.

IXPE se basa en los descubrimientos del Observatorio de rayos X Chandra de la NASA y otros telescopios espaciales al medir la polarización de la luz de rayos X.

Parte de la serie de misiones Small Explorer de la NASA, IXPE se lanzó en un cohete Falcon 9 desde el Centro Espacial Kennedy de la NASA en Florida en diciembre de 2021. Ahora orbita 370 millas, o aproximadamente 595 kilómetros, sobre el ecuador de la Tierra. La misión es una asociación entre la NASA y la Agencia Espacial Italiana, con socios y colaboradores científicos en 13 países. Ball Aerospace, con sede en Broomfield, Colorado, gestiona las operaciones de naves espaciales.

Molly Porter  
Centro Marshall de Vuelos Espaciales de la NASA, Huntsville, Alabama (NASA's Marshall  
Space Flight Center, Huntsville, Alabama)  
2 5 6 - 4 2 4 - 5 1 5 8  
molly.a.porter@nasa.gov

Elizabeth Landau  
Sede de la NASA, Washington (NASA Headquarters, Washington)  
elandau@nasa.gov  
202-358-0845

## Referencias

[1] Por Hannah Maginot, Centro Marshall de Vuelos Espaciales de la NASA, (By Hannah Maginot, NASA'S Marshall Space Flight Center), *NASA's IXPE Finds Powerful Magnetic Fields and Solid Crust at Neutron Star*, NASA news, URL: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/ixpe/news/2022/nasa-s-ixpe-finds-powerful-magnetic-fields-and-solid-crust-at-neutron-star.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/ixpe/news/2022/nasa-s-ixpe-finds-powerful-magnetic-fields-and-solid-crust-at-neutron-star.html)

Artículo editado y traducido por Juan F. González

## Apéndice. Glosario

**Polarización:** propiedad de ondas transversales (ondas que vibran perpendicularmente a la dirección de propagación) que mide de algún modo la inclinación relativa de la dirección de vibración a la dirección de propagación.

**Magnétar:** estrella de neutrones con un campo magnético muy intenso.

**Estrella de neutrones:** estrella de pequeño tamaño formada esencialmente por materia neutrónica.

## 32. ¿Es nuestra galaxia, la Vía Láctea, "normal"?

[Editar](#)

**Figura 1.** Mapa de la Vía Láctea. Image Credit/Créditos de la imagen: Pablo Carlos Budassi (Wikimedia Commons). <https://www.universetoday.com/wp->



Publicado el 23 de diciembre de 2022 por Scott Alan Johnston

## ¿Es la Vía Láctea... normal?

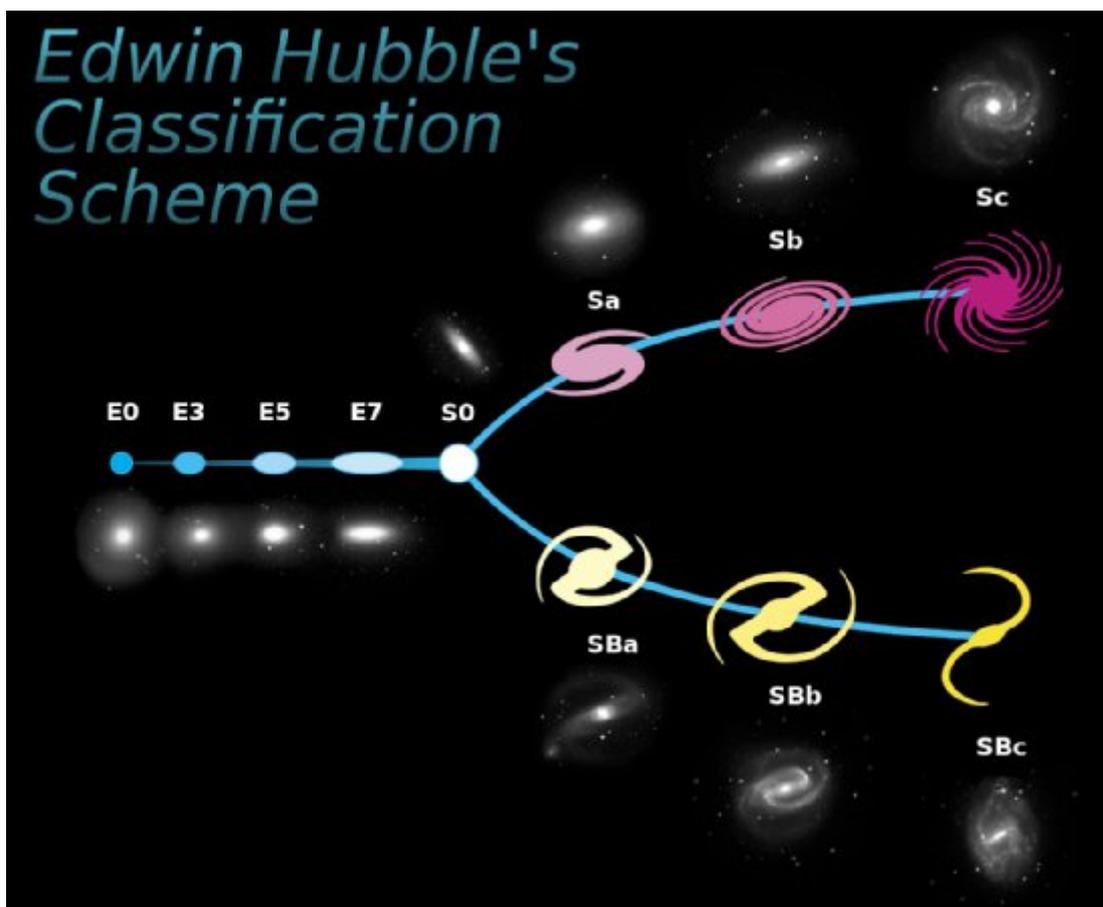
Estudiar la estructura a gran escala de nuestra galaxia no es fácil. No tenemos una visión clara de la forma y las características de la Vía Láctea como la tenemos de otras galaxias, en gran parte porque vivimos dentro de ella. Pero tenemos algunas ventajas. Desde adentro, podemos realizar estudios de cerca de la población estelar de la Vía Láctea y sus composiciones químicas. Eso les da a los investigadores las herramientas que necesitan para comparar nuestra propia galaxia con los muchos millones de otras en el Universo.

Esta semana, un equipo internacional de investigadores de EE.UU., Reino Unido y Chile publicó un artículo que hace precisamente eso. Examinaron un catálogo de diez mil galaxias producido por Sloan Digital Sky Survey, en busca de galaxias con atributos similares a los nuestros.

Descubrieron que la Vía Láctea tiene gemelos, muchos de ellos, pero otros tantos que solo son superficialmente similares, con diferencias fundamentales enterradas en los datos. Lo que descubrieron tiene implicaciones para la evolución futura de nuestra propia galaxia.

### Excavando a través de los datos

Para comenzar su búsqueda, los investigadores redujeron el tamaño de su muestra seleccionando solo aquellas galaxias que coincidían con lo que sabemos sobre la Vía Láctea en tres amplias categorías. Primero, filtraron galaxias con una masa total similar a la de la Vía Láctea. En segundo lugar, descartaron galaxias con una "proporción de abultamiento a total" muy diferente (el tamaño de la galaxia en comparación con su núcleo central brillante). Finalmente, solo eligieron galaxias con un 'Tipo Hubble' similar: un sistema de clasificación que agrupa las galaxias en función de su forma. Algunas galaxias, como la nuestra, tienen forma de espiral, mientras que otras, generalmente las más antiguas, tienen una forma más parecida a manchas borrosas y se conocen como galaxias elípticas. Hay otros refinamientos posibles dentro del sistema de clasificación del Hubble, incluidos los centros en forma de barra para algunas espirales, por ejemplo, pero la idea era usar las clasificaciones para encontrar aproximaciones aproximadas de la Vía Láctea desde las cuales comenzar el trabajo más detallado.



**Figura 2.** El diagrama del diapasón de Hubble, que da una clasificación básica de las clases de galaxias. Una representación simple de las clasificaciones de Hubble, con galaxias espirales a la derecha (galaxias barradas en la rama inferior) y galaxias elípticas a la izquierda. Crédito de la imagen: Cosmogoblin (Wikimedia Commons).

Al final de este proceso, el equipo se quedó con 138 galaxias superficialmente similares a la nuestra. A partir de ahí, podrían profundizar en los detalles para ver qué tan cerca están realmente nuestros primos galácticos de nosotros.

Conectaron los datos a un modelo que predice la formación de estrellas, teniendo en cuenta cómo los vientos estelares expulsan el exceso de gas de los sistemas estelares, que pueden ser atraídos hacia el centro de las galaxias. El modelo también tuvo en cuenta la composición química y la metalicidad de los materiales dentro de diferentes regiones de las galaxias.

### **¿Entonces, qué fue lo que encontraron?**

Resulta que, de hecho, hay galaxias que se parecen mucho a la nuestra. 56 de las 138 galaxias de la muestra terminaron siendo una coincidencia cercana a casa.

Lo que caracteriza a estas galaxias similares a la Vía Láctea es que tienen una larga escala de tiempo en la que se produce la formación de estrellas en sus regiones exteriores, dando a luz nuevas estrellas de manera constante y pausada. La región interior, por otro lado, experimenta un período dramático de intensa formación estelar al principio de la historia de la galaxia, impulsada por un flujo de gas que es atraído hacia el centro desde la región exterior. Más tarde, se produjo un período mucho más lento de formación de estrellas en el núcleo, que dependía del gas reciclado expulsado de estrellas más viejas en la región exterior. Estas nuevas estrellas, hechas de material reciclado, tienen un mayor nivel de metalicidad, con elementos más pesados injertados en ellas que faltaban en la generación inicial de estrellas. Vemos este patrón aquí en casa en nuestra propia galaxia también.

Pero esto no es cierto para las 138 galaxias estudiadas. Una fracción significativa de las galaxias que a primera vista parecían similares a la Vía Láctea terminaron luciendo muy diferentes en una inspección más cercana. Estos se dividen en dos categorías.

La primera categoría (que consta de 55 de las 138 galaxias) son galaxias que parecen no tener ninguna diferenciación entre sus regiones internas y externas. Estas galaxias están experimentando la formación de estrellas de manera uniforme, en un proceso largo y lento sin el estallido salvaje en el núcleo. En estas galaxias, las estrellas en las regiones interior y exterior parecen idénticas.

Mientras tanto, la segunda categoría consiste en lo que se conoce como galaxias 'apagadas centralmente' (27 de 138), y estas son quizás las más extrañas del grupo. Estos valores atípicos parecen carecer de un período significativo de formación estelar reciente a partir de material reciclado en sus núcleos, lo que significa que la entrada radial de gas de las regiones exteriores que vemos en la Vía Láctea no se produce en estas galaxias.

Una característica constante de estas galaxias apagadas centralmente es que, por regla general, parecen haber completado la mayor parte de su formación estelar en el pasado, lo que sugiere que quizás sean más antiguas que la Vía Láctea.

Si eso es cierto, tal vez estemos viendo el propio futuro de la Vía Láctea. Nuestra galaxia también puede terminar algún día con un centro apagado y, por lo tanto, estas galaxias representan una vista previa de la próxima etapa de la evolución galáctica.

“Quizás estas galaxias son las sucesoras evolutivas de la Vía Láctea, que están más avanzadas en sus vidas”, escriben los autores.

También plantean otras posibles explicaciones, como un núcleo galáctico demasiado activo que podría atenuar la formación estelar en las regiones internas de las galaxias.

Todavía hay mucho que aprender, pero este estudio ofrece muchas nuevas posibilidades para analizar en lo que respecta a la evolución galáctica. Fundamentalmente, muestra que no somos del todo únicos. Hay una enorme variedad de tipos de galaxias en el Universo, pero al menos algunas de ellas siguen las mismas reglas que la Vía Láctea, y muchas se encuentran en la misma etapa de vida. Estudiar estos parecidos puede ayudarnos a aprender más sobre nuestro propio hogar, brindándonos la siguiente mejor opción para sostener nuestra galaxia frente a un espejo y mostrarnos nuestro reflejo.

## Referencias

[1] Shuang Zhou, Alfonso Aragón-Salamanca, Michael Merrifield, Brett H. Andrews, Niv Drory, Richard R. Lane. “Are Milky-Way-like galaxies like the Milky Way? A view from SDSS-IV/MaNGA.” ArXiv: <https://arxiv.org/abs/2212.09127>

[2] Posted on December 23, 2022 by Scott Alan Johnston: *Is the Milky Way... Normal?* Revista online *Universe Today*.

Artículo editado y traducido por Juan F. González.

# 33. Resumen de 2022 en la Ciencia de las Matemáticas

[Editar](#)

## El año 2022 en las Matemáticas: un resumen

**Vídeo 1.** En 2022, los matemáticos resolvieron una pregunta de geometría de siglos de antigüedad, demostraron la mejor manera de minimizar el área de superficie de los grupos de hasta cinco burbujas y demostraron una declaración radical sobre cómo surge la estructura en conjuntos y grafos aleatorios. Christopher Webb Young (video) y Myriam Wares (portada) para Quanta Magazine.

## ¿Cómo fue el año 2022 para el mundo de las Matemáticas?

El año en Matemáticas:

1) Se otorgaron cuatro medallas Fields por avances importantes en geometría, combinatoria, física estadística y teoría de números, incluso cuando los matemáticos continuaron luchando con la forma en que las computadoras están cambiando la disciplina.

Podemos pensar en un matemático como una especie de arqueólogo, que limpia minuciosamente el polvo de las estructuras ocultas del mundo. Pero las estructuras que revelan los matemáticos no solo son duraderas, sino también inevitables. Nunca podrían haber sido de otra manera. También están notablemente interconectados: aunque cada año la frontera matemática continúa expandiéndose a medida que se realizan nuevos descubrimientos, la expansión de las subdisciplinas también se reduce un poco a medida que se encuentran conexiones entre dominios aparentemente remotos.

Puede ser difícil transmitir al no experto cuán impactantes son algunas de estas conexiones. En 2022, como siempre, hemos dado lo mejor de nosotros.

Fue un año de artículos breves, una prueba de seis páginas que señalaba cuándo emerge la estructura en grafos aleatorios [1], y largos, un artículo de 912 páginas [2] que muestra que los agujeros negros que giran lentamente seguirán girando lentamente hasta el final de los tiempos.

Algunos resultados matemáticos pueden ser impenetrables no solo para el público sino también para otros matemáticos. Quanta habló con Lillian Pierce, teórica de números de la Universidad de Duke, sobre su trabajo para hacer que las pruebas y técnicas importantes sean comprensibles para una gama más amplia de matemáticos, y con Wei Ho, quien descubrió nuevos límites en el número de soluciones enteras para ecuaciones llamadas curvas elípticas.

Alex Kontorovich, en un video y en la columna que lo acompaña, habló sobre el amplio programa Langlands que ha estado haciendo conexiones a través de campos dispares de las matemáticas.

Aunque muchos de estos resultados no tienen aplicaciones prácticas inmediatas, es difícil saber qué resultado abstracto terminará siendo crucial para generar cifrados criptográficos nuevos y seguros o actualizar los códigos de corrección de errores necesarios para que las comunicaciones modernas funcionen.

Una cosa que quedó clara del último año de cobertura matemática en Quanta es que no existe un único camino para convertirse en el tipo de matemático que puede descubrir una verdad fundamental que nadie más podría. Algunos se centran singularmente en las matemáticas desde una edad temprana; otros llegan a ella más tarde en la vida. Algunos satisfacen un estereotipo de brillantez distraída; otros no.

Como dijo Huh, cuando se trata de cómo la mente humana da saltos de razonamiento matemático, "es bueno admitir que no sabemos lo que está pasando".

### **Matemáticas galardonadas**

Cada cuatro años, la Unión Matemática Internacional otorga una moneda de oro con la cabeza de Arquímedes grabada a un máximo de cuatro matemáticos menores de 40 años "para reconocer

logros matemáticos sobresalientes por el trabajo existente y por la promesa de logros futuros". Este año, la Medalla Fields fue para June Huh, James Maynard, Maryna Viazovska y Hugo Duminil-Copin.

En una entrevista, Huh explicó que "las matemáticas podrían darle lo que la poesía no pudo: la capacidad de buscar la belleza fuera de sí mismo, de tratar de captar algo externo, objetivo y verdadero". El premio reconoció su prueba de una serie de conjeturas diferentes. Entre otras cosas, encontró una estructura geométrica profunda "que se esconde debajo de las propiedades combinatorias de los grafos" cuando demostró algo conocido como la conjetura de Read.

El premio de Maynard fue por sus descubrimientos en la teoría analítica de números. No mucho después de terminar la escuela de posgrado, demostró que hay un número infinito de pares primos que difieren en 600 o menos. Este fue un resultado histórico, pero habría sido aún más significativo si otro matemático no hubiera demostrado la existencia de un límite finito en las brechas entre los pares primos unos meses antes. Fue un ejemplo notable de progreso paralelo en un problema relacionado con preguntas sobre la distribución de números primos. Pero Maynard amplió su trabajo sobre los espacios entre números primos al demostrar que hay una cantidad infinita de números primos que no contienen un dígito dado, como el 7.

Hace tiempo que se sabe que la forma más densa de empaquetar círculos en un plano es en un panal, y hace una década se demostró una conjetura que se había mantenido desde el siglo XVII sobre cómo empaquetar esferas en tres dimensiones de manera más eficiente. Pero las dimensiones superiores son en su mayoría un misterio. Viazovska demostró que una red particular de ocho dimensiones proporciona la forma más eficiente de empaquetar esferas en ocho dimensiones. Luego, ella y sus colaboradores generalizaron ese resultado para demostrar que esta red minimiza la energía de un sistema en una amplia variedad de contextos.

Duminil-Copin, el cuarto medallista, ganó por proponer una teoría generalizada de cómo fluyen los líquidos a través de medios porosos.

Las Medallas Fields no fueron los únicos premios otorgados este año.

2) Dennis Sullivan ganó el Premio Abel por sus contribuciones a la topología, que incluyeron idear una nueva forma de clasificar ciertos tipos de variedades: espacios que parecen planos a pequeña escala pero que son más complicados cuando se examinan en su totalidad.

Y por lograr una mejor comprensión de los llamados operadores cuasiperiódicos, que se utilizan para modelar el comportamiento de los electrones, Svetlana Jitomirskaya recibió el primer Premio Ladyzhenskaya en Física Matemática.

### **Nuevas pruebas de viejos problemas de teoría de números**

Fue un año excelente para los teóricos de números de todas las edades, luego de un productivo 2021. Un estudiante de secundaria, Daniel Larsen, encontró un límite en las brechas entre los pseudoprimos llamados números de Carmichael, como 561, que se asemejan a los números primos en cierto sentido matemático pero pueden ser factorizado (en este caso  $561 = 3 \times 11 \times 17$ ).

Jared Lichtman, un estudiante graduado de la Universidad de Oxford, demostró que los números primos reales son, según cierta medida, el mayor ejemplo de algo llamado conjunto primitivo.

Dos matemáticos del Instituto de Tecnología de California demostraron una conjetura de 1978 que predecía que las sumas cúbicas de Gauss, que suman números de la forma  $n^2$  para algún número primo  $P$ , siempre suman alrededor de  $\frac{1}{2}n^3$ . Su prueba asumió la verdad de algo llamado la hipótesis generalizada de Riemann, que los matemáticos creen que es verdad pero que aún no han probado. Mientras tanto, se resolvió un análogo más simple de la hipótesis de Riemann llamado problema de subconvexidad.

Un par de matemáticos demostraron que si un número entero tiene un número par o impar de factores primos no tiene ningún efecto sobre si el número entero anterior o posterior tiene un número par o impar.

Otro grupo mostró que al menos  $\frac{2}{21}$  y no más de  $\frac{5}{6}$  de números enteros se pueden escribir como la suma de dos fracciones al cubo.

En 1993, un matemático llamado Peter Stevenhagen conjeturó que la ecuación  $x^2 + y^2 = dz^2$  tiene una solución entera alrededor del 58% del tiempo bajo ciertas restricciones en  $d$ . Este año, su hipótesis fue probada.

Fue una de varias conjeturas de larga data que se demostró que era cierta. La conjetura de André-Oort de 30 años sobre la estructura de algo llamado variedades de Shimura finalmente se demostró, al igual que la conjetura de Van der Waerden de 85 años, que estima cuántos polinomios tienen raíces no intercambiables.

En la década de 1970, Paul Erdős y Ronald Graham propusieron que conjuntos suficientemente grandes de números enteros deben contener subconjuntos cuyos recíprocos sumen 1, lo que se demostró este año. También se demostró que conjuntos tan grandes de números enteros deben contener algo llamado suma infinita; esto se demostró utilizando métodos del estudio de sistemas dinámicos.

00:00

00:03

**Vídeo 2.** El remolino de las Matemáticas. Créditos: DVDP for Quanta Magazine.

### **Matemáticas de aprendizaje automático/Matemáticas de Machine Learning**

El aprendizaje profundo, la técnica de IA ampliamente utilizada que ha vencido a campeones en juegos como el ajedrez y el Go y ha demostrado ser extremadamente precisa en tareas como el reconocimiento de voz, también se está implementando en algunas áreas de las matemáticas. Los investigadores lo utilizaron para buscar singularidades inusuales, puntos de ruptura en ecuaciones que modelan el flujo de fluidos. Un equipo separado usó pruebas asistidas por computadora para demostrar definitivamente que una versión particular de las ecuaciones de Euler, que modelan ciertos tipos de fluidos ideales, falla. Otro grupo investigó las ecuaciones de Navier-Stokes relacionadas, que modelan con mayor precisión la mayoría de los fluidos del mundo real, para ver

si también podrían fallar. (Cualquiera que demuestre que lo sabe puede ganar un premio de un millón de dólares del Clay Mathematics Institute).

Varios otros grupos utilizaron el aprendizaje automático para resolver problemas en teoría de grafos y combinatoria, crear mejores técnicas para multiplicar matrices y generar nuevas conjeturas en teoría de nudos. Sébastien Bubeck y Mark Sellke cambiaron las tornas al usar técnicas matemáticas para analizar redes neuronales y demostrar qué tan grandes deben ser para funcionar de manera sólida.

En episodios del podcast Joy of Why de Quanta, Steve Strogatz le preguntó a Kevin Buzzard si las computadoras pueden ser matemáticas y habló con Melanie Matchett Wood sobre lo que se necesita para que los matemáticos realmente crean que se ha probado un resultado.

### **Burbujas, Formas y Espacios**

Para no quedarse atrás, los geómetras también tuvieron un año ajetreado. En mayo, Emanuel Milman y Joe Neenan descubrieron la forma de grupos de burbujas que pueden encerrar de manera más eficiente tres o cuatro volúmenes, en cualquier número de dimensiones.

Isabel Vogt y Eric Larson resolvieron el problema de la interpolación, una vieja pregunta sobre cuántos puntos aleatorios en un espacio de alta dimensión pueden atravesar ciertos tipos de curvas.

Andras Máthé, Oleg Pikhurko y Jonathan Noel resolvieron un problema aún más antiguo al descubrir cómo se puede cortar un círculo en piezas visualizables que se pueden reorganizar en un cuadrado. ([Una columna de Quantized Academy](#) explica el proceso más simple de averiguar si dos polígonos tienen la misma área).

Martin y Erik Demaine (padre e hijo) publicaron un artículo que muestra cómo tomar cualquier poliedro y doblarlo en una forma plana, siempre que permita una cantidad infinita de pliegues. ([Una columna de Quantized Academy](#) explicó cómo los tetraedros, las pirámides, tienen relaciones mucho más complejas entre sus ángulos interiores que los triángulos, su análogo bidimensional). En agosto, una colaboración de matemáticos y físicos publicó un artículo que exponía una nueva teoría de cómo la curvatura de los materiales delgados afecta las arrugas que se forman cuando se aplanan.

Dusa McDuff y varios colaboradores encontraron estructuras fractales intrincadas que surgían cuando intentaban incrustar formas llamadas elipsoides en algo llamado superficies de Hirzebruch, un lugar donde nadie esperaba encontrar fractales.

Otros matemáticos avanzaron en la demostración de la conjetura de Kakeya, que establece límites sobre el tamaño del espacio que se necesita para girar una aguja y que pueda apuntar en cualquier dirección, pero existen dudas sobre si la conjetura es cierta en el dominio de los números reales.

### **Aventuras en topología**

Este año, [Quanta cubrió el trabajo de Will Hide y Michael Magee](#), quienes en 2021 utilizaron técnicas prestadas de la teoría de grafos para mostrar la existencia de tipos de superficies de alto

género que están profundamente interconectadas entre sí de una manera que se había pensado durante mucho tiempo, pero no probado, ser posible.

Ian Agol [demostró una conjetura de 1981](#) sobre cómo clasificar la complejidad de los nudos.

Los nudos en dos dimensiones se pueden usar para delinear los límites de algo llamado superficie de Seifert. Muchos pares de superficies de Seifert que son distintas entre sí incluso si los nudos se manipulan en un espacio tridimensional pueden hacerse equivalentes si los nudos se manipulan en una cuarta dimensión. Los topólogos encontraron, [por primera vez](#), un par de superficies de Seifert que permanecían distintas entre sí incluso en cuatro dimensiones. [Una columna explicaba los orígenes de la teoría de los nudos](#), y Colin Adams y Lisa Piccirillo le contaron a [Steven Strogatz sobre su fascinación por los nudos en un episodio del podcast Joy of Why](#).

### **El surgimiento de la estructura aleatoria**

Una prueba notablemente breve publicada en marzo demostró la conjetura de Kahn-Kalai, que establece las condiciones bajo las cuales surge la estructura en grafos aleatorios. Esto siguió [a una prueba en enero](#) de que siempre es posible construir un "hipergrafo", una especie de generalización altamente conectada de un grafo, de una manera que satisfaga dos criterios aparentemente incompatibles, siempre que haga que el hipergrafo sea lo suficientemente grande.

Seguían llegando nuevos resultados de la teoría de grafos. En abril, Oliver Janzer y Benny Sudakov [respondieron una pregunta de hace medio siglo sobre](#) cuándo los grafos deben volverse inevitablemente "regulares" o interconectados de tal manera que cada nodo esté conectado a la misma cantidad de aristas. Y [una columna](#) dio una introducción a la teoría de grafos a través de un juego de mesa para romper el hielo.

Corrección: 23 de diciembre de 2022

Una versión anterior de este artículo expresó erróneamente la conjetura de Steinhagen. La descripción ha sido modificada.

### **Referencias**

[1] Jeff Kahn, Gil Kalai. *Thresholds and expectation thresholds*. ArXiv: <https://arxiv.org/abs/math/0603218>, con una descripción informal en Quanta Magazine, Jordana Cepelewicz: *Elegant Six-Page Proof Reveals the Emergence of Random Structure*. URL: <https://www.quantamagazine.org/elegant-six-page-proof-reveals-the-emergence-of-random-structure-20220425/>

[2] Sergiu Klainerman, Jeremie Szeftel, Elena Giorgi, *Wave equations estimates and the nonlinear stability of slowly rotating Kerr black holes* ArXiv: <https://arxiv.org/abs/2205.14808> y ArXiv: [Kerr stability for small angular momentum](#), Sergiu Klainerman, Jeremie Szeftel; descripción informal en Quanta Magazine, Steve Nadis: *At Long Last, Mathematical Proof That Black Holes Are Stable*. URL: <https://www.quantamagazine.org/black-holes-finally-proven-mathematically-stable-20220804/>

[3] *The Year in Math*, Quanta Magazine. URL: <https://www.quantamagazine.org/the-biggest-math-breakthroughs-in-2022-20221222/>

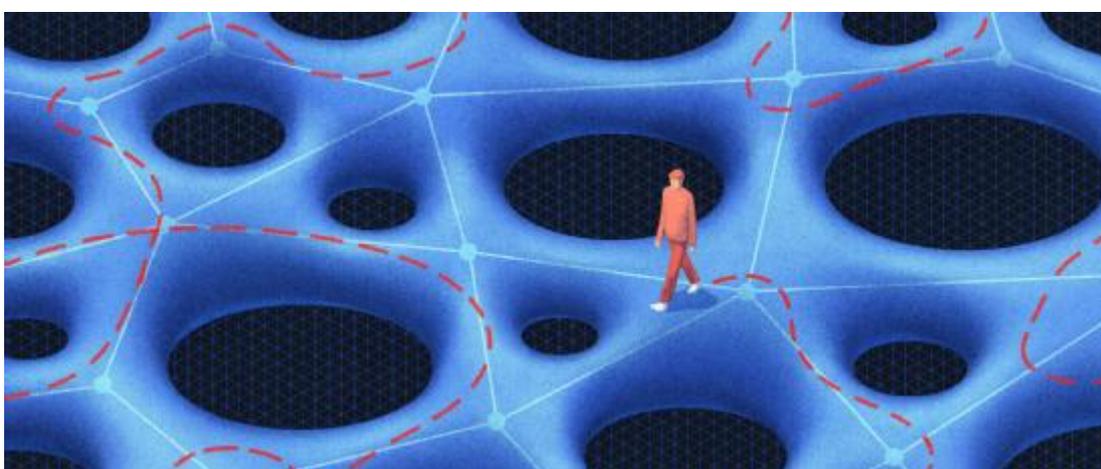
**Apéndice. Ilustraciones de Quanta Magazine.**



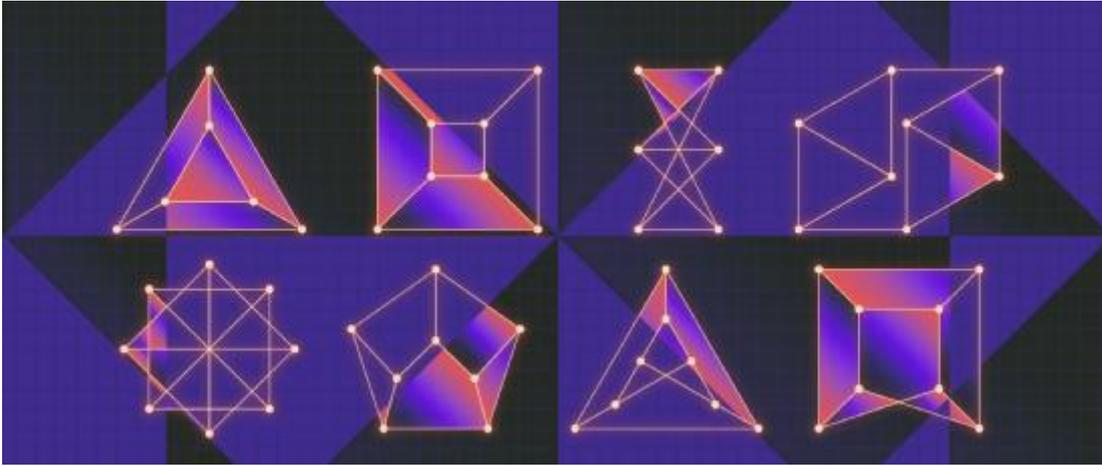
**Figura 1.** Gauss. Kristina Armitage for Quanta Magazine.



**Figura 2.** Curvas. Nadzeya Makeyeva for Quanta Magazine.



**Figura 3.** Superficies de Riemann. Myriam Wares for Quanta Magazine.



**Figura 4.** Grafos. Kristina Armitage for Quanta Magazine.

Artículo editado y traducido por Juan F. González.

## 34. Resumen de 2022 en la Ciencia de la Física

[Editar](#)

### El año 2022 en la Física

2022 fue un año repleto de dulces nuevas observaciones en astronomía y tentadores avances en la física de la materia condensada, el nuevo telescopio espacial se lleva la palma.

**Figura 1.** JWST. Myriam Wares for Quanta Magazine. URL:

<https://d2r55xnwy6nx47.cloudfront.net/uploads/2022/12/YiR-PHYSICS-byMyriamWares-Lede-scaled.webp>

El año comenzó justo cuando el Telescopio Espacial James Webb estaba desplegando su protector solar: la manta gigante, delgada y delicada como para morderse las uñas que, una vez abierta, sumergiría el observatorio en una sombra gélida y abriría su vista del universo infrarrojo. A las pocas horas de que la pelota cayera aquí en la ciudad de Nueva York, el parasol podría haberse enganchado, arruinando el nuevo telescopio y tirando al vacío miles de millones de dólares y décadas de trabajo. En cambio, el parasol se abrió perfectamente, lo que hizo que el nuevo año en física tuviera un excelente comienzo.

JWST pronto comenzó a vislumbrar hermosas caras nuevas del cosmos. El 11 de julio, el presidente Biden presentó la [primera imagen pública del telescopio](#): una vista panorámica de miles de galaxias a varias distancias en el espacio y el tiempo. Al día siguiente se publicaron otras cuatro

imágenes icónicas al instante. Desde entonces, los datos del telescopio se han distribuido entre cientos de astrónomos y cosmólogos, y están surgiendo descubrimientos y artículos cósmicos.

La astronomía está nadando en datos frescos de todo tipo. En mayo, por ejemplo, el [Event Horizon Telescope publicó la primera foto del agujero negro supermasivo en el corazón de nuestra galaxia](#), una de varias observaciones recientes que están ayudando a los astrofísicos a descubrir cómo funcionan las galaxias. Otros telescopios están mapeando las ubicaciones de millones de galaxias, un esfuerzo que recientemente arrojó evidencia sorprendente de una asimetría en la distribución de galaxias.

Los avances también están llegando rápidamente en la física de la materia condensada. [Un experimento publicado en septiembre](#) casi demostró el origen de la superconductividad a alta temperatura, lo que podría ayudar en la búsqueda perenne del campo de una versión aún más cálida del fenómeno que podría funcionar a temperatura ambiente. Ese es también un objetivo de la investigación sobre materiales bidimensionales. Este año, una especie de cristal plano que una vez ayudó a lubricar los esquís se ha convertido en una poderosa plataforma para fenómenos cuánticos exóticos y potencialmente útiles.

Los físicos de partículas, que buscan nuevos ingredientes fundamentales del universo, han tenido menos suerte. Continuaron desentrañando características de partículas que ya conocemos, incluido [el protón](#), el tema de un maravilloso proyecto visual que publicamos este otoño. Pero los teóricos tienen pocas pistas concretas, si es que tienen alguna, sobre cómo ir más allá del modelo estándar de la física de partículas, el conjunto de ecuaciones sofocantemente completo para el mundo cuántico que ha sido la teoría a batir durante medio siglo. Sin embargo, la esperanza es una virtud, y al menos una posible grieta en el modelo estándar se abrió este año. Comencemos la lista de grandes éxitos de 2022 allí.



**Figura 2.** El bosón W. Créditos: Samuel Velasco/Quanta Magazine.

### **Un bosón tentadoramente pesado**

El colisionador Tevatron en Illinois aplastó sus últimos protones hace una década, pero sus controladores han seguido analizando sus detecciones de bosones W, partículas que median la fuerza débil. [En abril](#) anunciaron que, al rastrear minuciosamente y eliminar las fuentes de error en los datos, habían medido la masa del bosón W con mayor precisión que nunca y encontraron

que la partícula era significativamente más pesada de lo previsto por el modelo estándar de física de partículas.

Una verdadera discrepancia con el Modelo Estándar sería un descubrimiento monumental, que apuntaría a nuevas partículas o efectos más allá del alcance de la teoría. Pero aguanta los aplausos. Otros experimentos que pesan la W, sobre todo el experimento ATLAS en el Gran Colisionador de Hadrones de Europa, midieron una masa mucho más cercana a la predicción del Modelo Estándar. La nueva medición de Tevatron pretende ser más precisa, pero uno o ambos grupos podrían haber pasado por alto alguna fuente sutil de error.

El experimento ATLAS pretende resolver el asunto. Como dijo Guillaume Unal, miembro de ATLAS, “El bosón W tiene que ser el mismo en ambos lados del Atlántico”.

00:00

00:21

**Vídeo 1.** Créditos: Emily Buder/Quanta Magazine; Kristina Armitage and Rui Braz for Quanta Magazine.

### **Repensar la naturalidad**

Todo ese rumor sobre un tenue indicio de un problema con el modelo estándar refleja la situación problemática en la que se encuentran los físicos de partículas. Las 17 partículas elementales que se sabe que existen, las descritas por el modelo estándar, no resuelven todos los misterios del universo. Sin embargo, el Gran Colisionador de Hadrones no ha llegado al 18.

Durante años, los teóricos han luchado sobre cómo proceder. Pero recientemente, se ha abierto una nueva dirección. Los teóricos están repensando una suposición de larga data conocida como naturalidad, una forma de razonar sobre lo que es natural o esperado en las leyes de la naturaleza. La idea está estrechamente relacionada con la estructura reduccionista de la naturaleza, donde las cosas más pequeñas explican las cosas grandes. Ahora, los teóricos se preguntan si los problemas profundos de [naturalidad](#), como la falta de nuevas partículas del Gran Colisionador de Hadrones, podrían significar que las leyes de la naturaleza no están estructuradas de una manera tan simple de abajo hacia arriba después de todo. En una avalancha de artículos nuevos, están explorando cómo la gravedad podría cambiar drásticamente la imagen.

“Algunas personas lo llaman crisis”, dijo la física teórica de partículas Isabel García García, refiriéndose al momento actual en el campo. Pero eso es demasiado pesimista, en su opinión: “Es un momento en el que siento que estamos ante algo profundo”.

(Por cierto, además de repensar la naturalidad, García García también estudia [la física de la nada](#), el tema de un divertido libro publicado en agosto).

### **Física 2D desbloqueada**

Miles de físicos de materia condensada han estudiado el grafeno, una hoja de cristal hecha de átomos de carbono que tiene propiedades especiales. Pero últimamente ha aparecido una nueva

familia de cristales planos: los dicalcogenuros de metales de transición o TMD. El apilamiento de diferentes TMD da lugar a materiales personalizados con diferentes comportamientos y propiedades cuánticas.

Las propiedades casi mágicas de estos materiales se conocen en gran parte gracias a Jie Shan y Kin Fai Mak, una pareja casada que codirige un laboratorio en la Universidad de Cornell. El perfil de Quanta de Shan y Mak, publicado el verano pasado, cuenta la historia de los materiales 2D en el contexto de la física de la materia condensada, al mismo tiempo que revela una gran cantidad de nuevos y emocionantes avances que surgen del laboratorio de Shan y Mak, desde átomos artificiales hasta átomos de larga vida. excitones También apareció [un breve documental sobre el dúo](#) y sus descubrimientos en el canal de [YouTube de Quanta](#).

00:00

00:10

**Vídeo 2.** Créditos: Kim Taylor for Quanta Magazine.

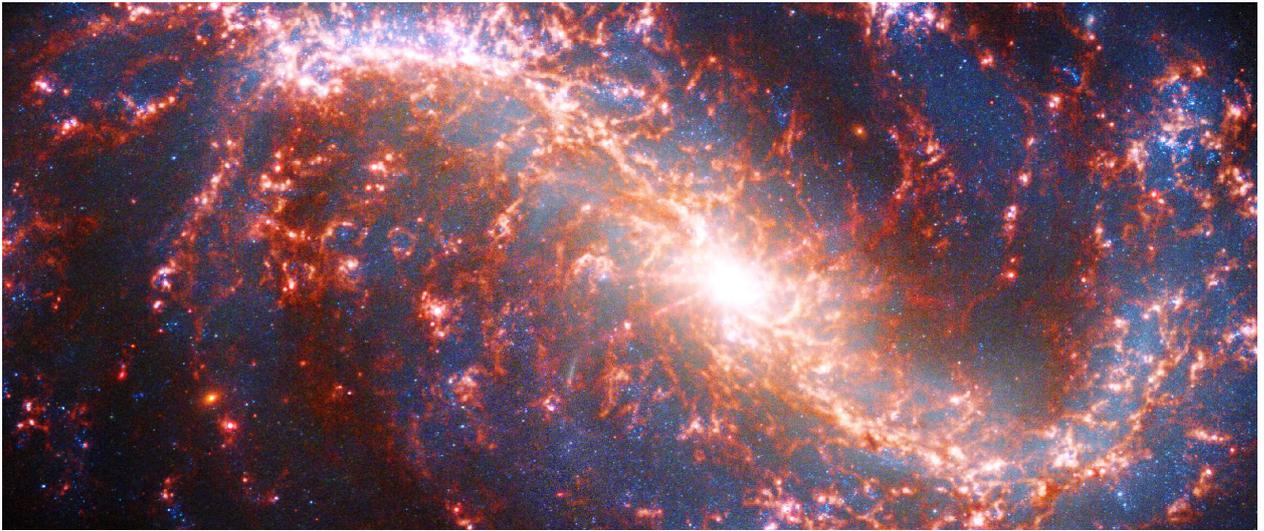
### **Un agujero de gusano holográfico**

En noviembre, los físicos anunciaron el primer "experimento de gravedad cuántica en un chip" de su tipo, en palabras de la líder del equipo Maria Spiropulu del Instituto de Tecnología de California. Ejecutaron un ["protocolo de teletransportación de agujeros de gusano"](#) en la computadora cuántica Sycamore de Google, manipulando el flujo de información cuántica en la computadora de tal manera que era matemáticamente equivalente, o dual, a la información que pasaba a través de un agujero de gusano entre dos puntos en el espacio-tiempo.

Para ser claros, el agujero de gusano no es parte del espacio-tiempo que habitamos. Es una especie de simulación u holograma, aunque no uno de los tipos a los que estamos acostumbrados, y tiene una geometría de espacio-tiempo diferente a la del espacio-tiempo 4D real, positivamente curvado, en el que vivimos. El objetivo del experimento era para demostrar la dualidad holográfica, un importante descubrimiento teórico de los últimos 25 años que establece que ciertos sistemas cuánticos de partículas pueden interpretarse como un continuo espacio-tiempo flexible y gravitante. (El espacio-tiempo puede considerarse vagamente como un holograma que emerge del sistema cuántico de menor dimensión). En los próximos años, los investigadores esperan explorar la mecánica de la dualidad holográfica en experimentos informáticos cuánticos más avanzados, con el objetivo final de desentrañar si "la gravedad en nuestro universo emerge de algunos [bits] cuánticos de la misma manera que este pequeño agujero de gusano unidimensional emerge" del chip Sycamore, dijo Daniel Jafferis de la Universidad de Harvard, quien desarrolló el protocolo de teletransportación del agujero de gusano.

El agujero de gusano holográfico generó innumerables opiniones entre físicos y lectores legos por igual. Algunos físicos pensaron que la simulación cuántica era demasiado reducida en comparación con el modelo teórico en el que se basaba para tener una descripción dual holográfica como un agujero de gusano. Muchos sintieron que los físicos detrás del trabajo, y nosotros, los

periodistas que lo cubrimos, deberíamos haber enfatizado mejor que este no era un agujero de gusano real que podría transportar personas a Andrómeda. De hecho, para abrir un agujero de gusano en el espacio-tiempo real, necesitarías materia de energía negativa, y eso no parece existir. ¿O sí si contamos a la energía oscura?



**Figura 3.** NASA, ESA, CSA, STScI and Judy Schmidt.

### **JWST está revolucionando la astronomía**

Lo más grande en física este año está flotando a un millón de millas de distancia, en un lugar en el espacio llamado Lagrange Point 2, donde su protector solar puede bloquear simultáneamente la Tierra, la luna y el sol. Las imágenes de JWST han hecho que los corazones se detengan. Sus datos ya están remodelando nuestra comprensión del cosmos.

Cuando Biden reveló la primera imagen de JWST, los investigadores inmediatamente comenzaron a detectar galaxias interesantes en el vasto cuadro. Los artículos científicos aparecieron en línea en cuestión de días. Dos semanas después, [Quanta informó](#) que los datos de JWST ya habían arrojado nuevos descubrimientos sobre galaxias, estrellas, exoplanetas e incluso Júpiter. Uno de los primeros hallazgos más emocionantes fue que las galaxias parecen haberse ensamblado sorprendentemente temprano en la historia cósmica, tal vez incluso antes de lo que los modelos cosmológicos pueden explicar fácilmente. Espere escuchar más sobre esto en 2023.

También tendremos que esperar pacientemente los tan esperados estudios de JWST de los planetas rocosos en un sistema estelar cercano llamado TRAPPIST-1. Una especialidad clave de JWST es diseccionar la luz estelar que atraviesa la atmósfera de un planeta distante a medida que el planeta se mueve frente a su estrella. Esto revela de qué está hecha la atmósfera del planeta, incluida la posible evidencia de gases de "biofirma" que podrían significar biología alienígena. El telescopio ya ha producido [excelentes espectros de exoplanetas](#). Pero los mundos potencialmente habitables, como los planetas TRAPPIST-1, son tan pequeños que necesitarán transitar frente a sus soles varias veces durante los próximos años antes de que aparezcan las características atmosféricas.

Ver firmas biológicas claras en sus cielos podría ser poco probable. Aún así, algunos astrónomos han esperado toda su carrera para que comience la búsqueda. Lisa Kaltenegger, directora del Instituto Carl Sagan de la Universidad de Cornell y una de las principales modeladoras

informáticas de mundos potencialmente habitables, llegó a la mayoría de edad justo cuando se descubrieron los primeros exoplanetas. Se unió a un grupo de soñadores que comenzaron a pensar en cómo encontrar vida en uno. [Nuestro perfil de Kaltenegger](#) describe cómo ella y su generación de astrónomos de exoplanetas han planificado esta era durante décadas, preparando el escenario para una detección histórica. Más sobre eso en los próximos años.

## Referencias

[1] Quanta Magazine, Natalie Wolchover, *The Year in Physics*. URL:

<https://www.quantamagazine.org/the-biggest-discoveries-in-physics-in-2022-20221222/>

[2] Jonathan O'Callaghan, *Black Hole Image Reveals the Beast Inside the Milky Way's Heart*.

Quanta Magazine: *Black Hole Image Reveals the Beast Inside the Milky Way's Heart*.

URL: <https://www.quantamagazine.org/black-hole-image-reveals-sagittarius-a-20220512/>

[3] Jonathan O'Callaghan, *Two Weeks In, the Webb Space Telescope Is Reshaping Astronomy*.

Quanta Magazine: URL: <https://www.quantamagazine.org/two-weeks-in-the-webb-space-telescope-is-reshaping-astronomy-20220725/>

Artículo editado y traducido por Juan F. González

# 35. Un ordenador cuántico de IBM alcanzará más de 1000 qubits en 2023

[Editar](#)



**Figura 1.** Un investigador del Centro de Investigación Thomas J. Watson de IBM examina parte del hardware cuántico que se está construyendo allí. Connie Zhou/IBM. URL: <https://spectrum.ieee.org/media-library/this-photo-shows-a-woman-working-on-a-piece-of-apparatus-that-is-suspended-from-the-ceiling-of-the-laboratory.jpg?id=32303847&width=3600&height=2700>

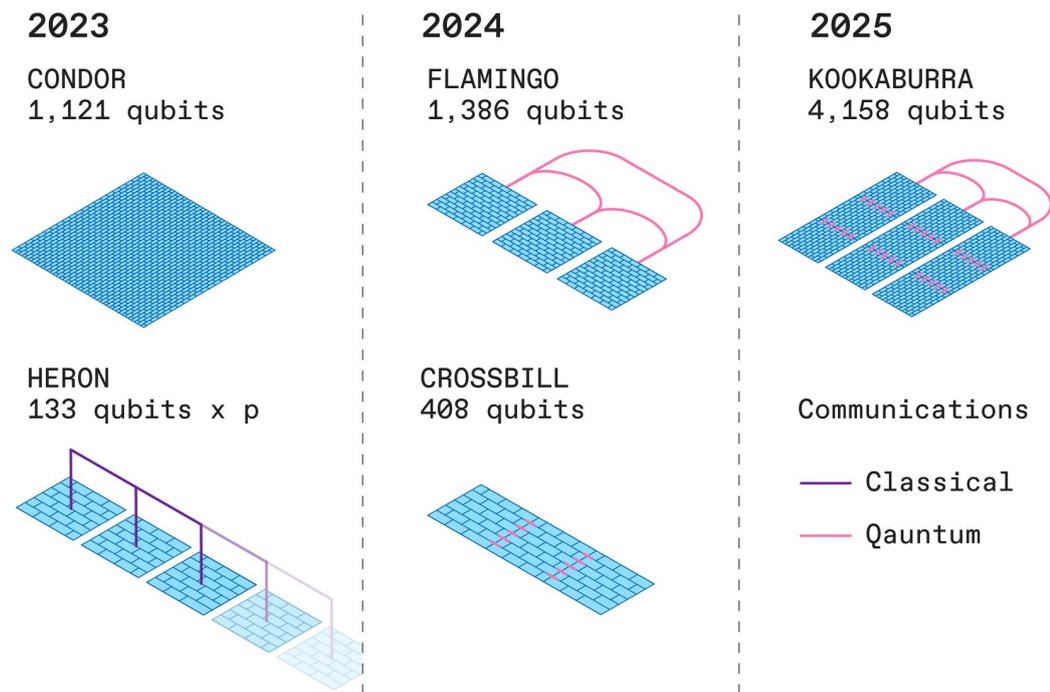
### **1000 qubits: la barrera que un ordenador cuántico de IBM superará en 2023**

Condor de IBM, la primera computadora cuántica universal del mundo con más de 1000 qubits, debutará en 2023. También se espera que el año vea a IBM lanzar Heron, el primero de una nueva bandada de procesadores cuánticos modulares que, según la compañía, pueden ayudarlo. producir computadoras cuánticas con más de 4000 qubits para 2025.

Si bien las computadoras cuánticas pueden, en teoría, encontrar rápidamente respuestas a problemas que las computadoras clásicas tardarían eones en resolver, el hardware cuántico de hoy todavía tiene pocos qubits, lo que limita su utilidad. El entrelazamiento y otros estados cuánticos necesarios para la computación cuántica son infames y frágiles, siendo susceptibles al calor y otras perturbaciones, lo que hace que aumentar la cantidad de qubits sea un gran desafío técnico.

Sin embargo, IBM ha aumentado constantemente su número de qubits. En 2016, colocó la primera computadora cuántica en la nube con la que alguien experimentó: un dispositivo con 5 qubits, cada uno de los cuales es un circuito superconductor enfriado hasta casi el cero absoluto. En 2019, la empresa creó el Falcon de 27 qubits; en 2020, el Hummingbird de 65 qubits; en 2021, el Eagle de

127 qubits, el primer procesador cuántico con más de 100 qubits; y en 2022, el Osprey de 433 qubits.



**Figura 2.** IBM espera construir computadoras cuánticas de complejidad creciente en los próximos años, comenzando con aquellas que usan el procesador Condor o múltiples procesadores Heron en paralelo. Carl De Torres/IBM. URL: <https://spectrum.ieee.org/media-library/this-diagram-shows-the-quantum-processors-that-ibm-expects-to-have-ready-in-2023-condor-and-heron-in-2024-flamingo-and-cross.png?id=32330564&width=1984&quality=80>

Otras computadoras cuánticas tienen más qubits que el procesador Condor de 1121 qubits de IBM; por ejemplo, D-Wave Systems presentó un sistema de 5000 qubits en 2020. Pero las computadoras de D-Wave son máquinas especializadas para resolver problemas de optimización, mientras que Condor será la más avanzada del mundo. procesador cuántico de propósito general más grande.

“Mil qubits realmente amplían los límites en términos de lo que realmente podemos integrar”, dice Jerry Chow, director de infraestructura cuántica de IBM. Al separar los cables y otros componentes necesarios para la lectura y el control en sus propias capas, una estrategia que comenzó con Eagle, los investigadores dicen que pueden proteger mejor los qubits de la interrupción e incorporar un mayor número de ellos. “A medida que escalamos hacia arriba, estamos aprendiendo reglas de diseño como 'Esto puede pasar por encima de esto; esto no puede superar esto; este espacio se puede usar para esta tarea’”, dice Chow.

Existen otras computadoras cuánticas con más qubits, pero Condor será el procesador cuántico de propósito general más grande del mundo.

Con solo 133 qubits, Heron, el otro procesador cuántico que IBM planea para 2023, puede parecer modesto en comparación con Condor. Pero IBM dice que su arquitectura mejorada y su diseño modular anuncian una nueva estrategia para desarrollar poderosas computadoras cuánticas. Mientras que Condor usa una arquitectura de acoplamiento fijo para conectar sus qubits, Heron

usará una arquitectura de acoplamiento ajustable, que agrega uniones Josephson entre los bucles superconductores que transportan los qubits. Esta estrategia reduce la diafonía entre qubits, lo que aumenta la velocidad de procesamiento y reduce los errores. (Google ya está utilizando una arquitectura de este tipo con su procesador Sycamore de 53 qubit).

Además, los procesadores Heron están diseñados para la comunicación clásica en tiempo real entre sí. La naturaleza clásica de estos enlaces significa que sus qubits no pueden enredarse en los chips Heron para el tipo de impulsos en la potencia informática por los que se conocen los procesadores cuánticos. Aún así, estos enlaces clásicos permiten técnicas de "tejido de circuitos" en las que las computadoras cuánticas pueden obtener ayuda de las computadoras clásicas.

Por ejemplo, utilizando una técnica conocida como "forja de entrelazamiento", los investigadores de IBM descubrieron que podían simular sistemas cuánticos como moléculas utilizando solo la mitad de los qubits que normalmente se necesitan. Este enfoque divide un sistema cuántico en dos mitades, modela cada mitad por separado en una computadora cuántica y luego usa la computación clásica para calcular el entrelazamiento entre ambas mitades y unir los modelos.

### **Vídeo 1.** IBM Quantum State of the Union 2022.

Si bien estos enlaces clásicos entre procesadores son útiles, IBM tiene la intención de reemplazarlos eventualmente. En 2024, la compañía tiene como objetivo lanzar Crossbill, un procesador de 408 qubits hecho de tres microchips acoplados mediante enlaces de comunicación cuántica de corto alcance, y Flamingo, un módulo de 462 qubits que planea unir mediante una comunicación cuántica de aproximadamente 1 metro de largo. se vincula a un sistema de 1386 qubits. Si estos experimentos de conectividad tienen éxito, IBM tiene como objetivo presentar su módulo Kookaburra de 1386 qubits en 2025, con enlaces de comunicación cuántica de corto y largo alcance que combinan tres de estos módulos en un sistema de 4158 qubits.

La estrategia metódica de IBM de "apuntar a mejoras paso a paso es muy razonable y probablemente conducirá al éxito a largo plazo", dice Franco Nori, científico jefe del Laboratorio de Física Cuántica Teórica del instituto de investigación Riken en Japón.

### **Los saltos cuánticos de IBM en software**

En 2023, IBM también planea mejorar su software central para ayudar a los desarrolladores a utilizar la computación cuántica y clásica al unísono en la nube. "Estamos sentando las bases para el aspecto de una supercomputadora centrada en la cuántica", dice Chow. "No vemos a los procesadores cuánticos como totalmente integrados, sino como agregados sueltos". Este tipo de marco otorgará la flexibilidad necesaria para adaptarse a las actualizaciones constantes que probablemente experimenten el hardware y el software cuánticos, explica.

En 2023, IBM planea comenzar a crear prototipos de aplicaciones de software cuántico. Para 2025, la compañía espera introducir dichas aplicaciones en aprendizaje automático, problemas de optimización, ciencias naturales y más.

Los investigadores esperan en última instancia utilizar la corrección de errores cuánticos para compensar los errores que los procesadores cuánticos son propensos a cometer. Estos esquemas distribuyen datos cuánticos a través de qubits redundantes, lo que requiere múltiples qubits físicos

para cada qubit lógico útil. En cambio, IBM planea incorporar esquemas de mitigación de errores en su plataforma a partir de 2024, para evitar estos errores en primer lugar. Pero incluso si los errores de disputa terminan exigiendo muchos más qubits, IBM debería estar en una buena posición con su Códor de 1121 qubits.

## Referencias

[1] IEEE Spectrum, Charles Q. Choi. *An IBM Quantum Computer Will Soon Pass the 1000-Qubit Mark : The Condor processor is just one quantum-computing advance slated for 2023.*

## Glosario

*qubit*: unidad básica de información en computación cuántica. Matemáticamente es una superposición lineal con coeficientes de números enteros de dos vectores en un espacio de Hilbert. Matemáticamente se escribe

$$|\Psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$$

donde son números complejos que satisfacen la denominada condición de normalización

*qudit*: generalización del qubit para , siendo  $d = 2$  el caso del qubit. Generalmente escribimos

y donde la normalización es ahora .

*quit*: generalización o extensión de la noción de qubit y qudit al caso infinito-dimensional (o caso de campos). Matemáticamente

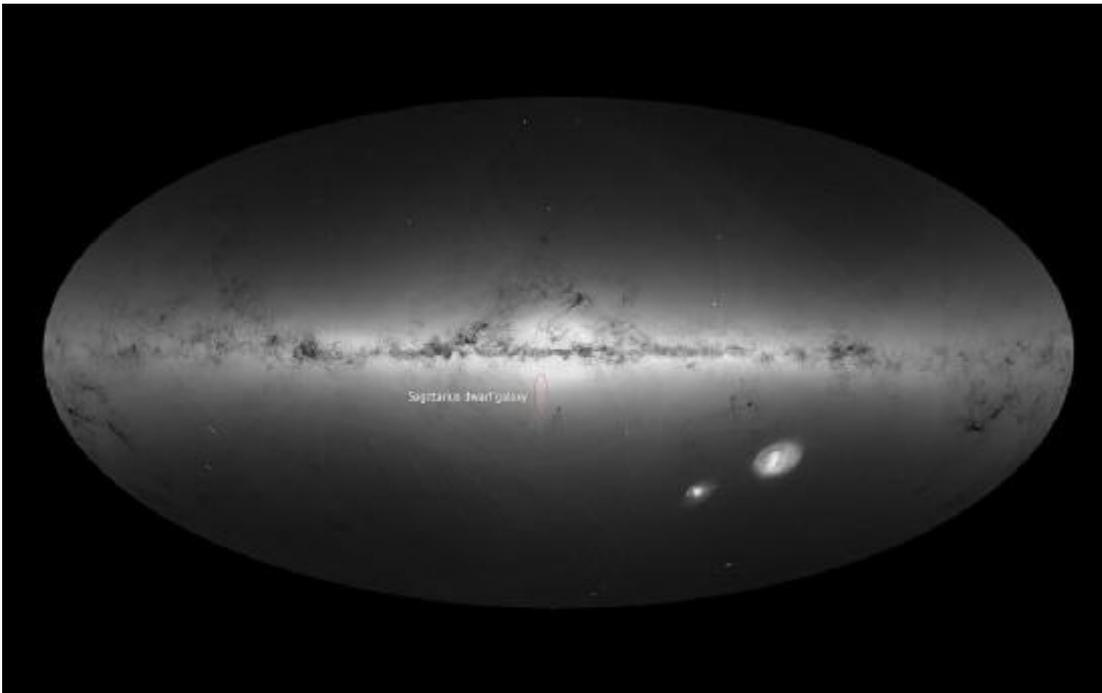
donde la normalización es ahora , y es asumido que dicha suma tiene sentido por convergencia.

**Artículo editado y traducido por Juan F. González**

## 36. MOG vs. MOND vs. DM

*Nuevas mediciones de la rotación de galaxias se inclinan hacia la gravedad modificada como explicación de la materia oscura*

por Brian Koberlein, Universe Today.

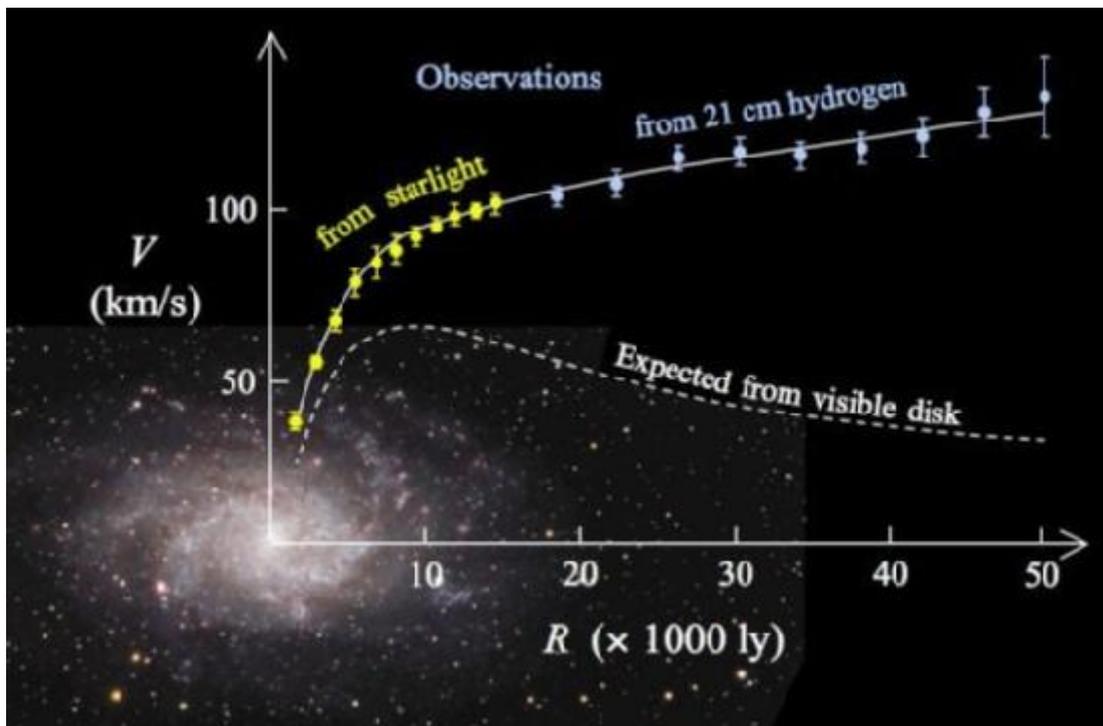


**Figura 1.** Imagen de galaxia enana en Sagitario, créditos: ESA (European Space Agency).

Aunque la materia oscura es una parte central del modelo cosmológico estándar, no está exenta de problemas. Continúa habiendo misterios persistentes sobre la materia, uno de los cuales es el hecho de que los científicos no han encontrado evidencia de partículas directas que formen la esquiva materia oscura (Dark Matter, DM, en inglés).

A pesar de numerosas búsquedas, todavía tenemos que detectar partículas de materia oscura. Entonces, algunos astrónomos favorecen una alternativa, como la dinámica newtoniana modificada (MoND, Modified Newtonian Dynamics) o el modelo de gravedad modificado (MOG, Modified Gravity). Y un nuevo estudio de la rotación galáctica parece respaldarlos [1].

La idea de MoND se inspiró en la rotación galáctica. La mayor parte de la materia visible en una galaxia está agrupada en el medio, por lo que cabría esperar que las estrellas más cercanas al centro tuvieran velocidades orbitales más rápidas que las estrellas más lejanas, de forma similar a los planetas de nuestro sistema solar. Lo que observamos es que las estrellas de una galaxia giran todas aproximadamente a la misma velocidad. La curva de rotación es esencialmente plana en lugar de caer. La solución de la materia oscura es que las galaxias están rodeadas por un halo de materia invisible, pero en 1983 Mordehai Milgrom [3,4,5] argumentó que nuestro modelo gravitacional o inercial debe estar equivocado a ciertas escalas.

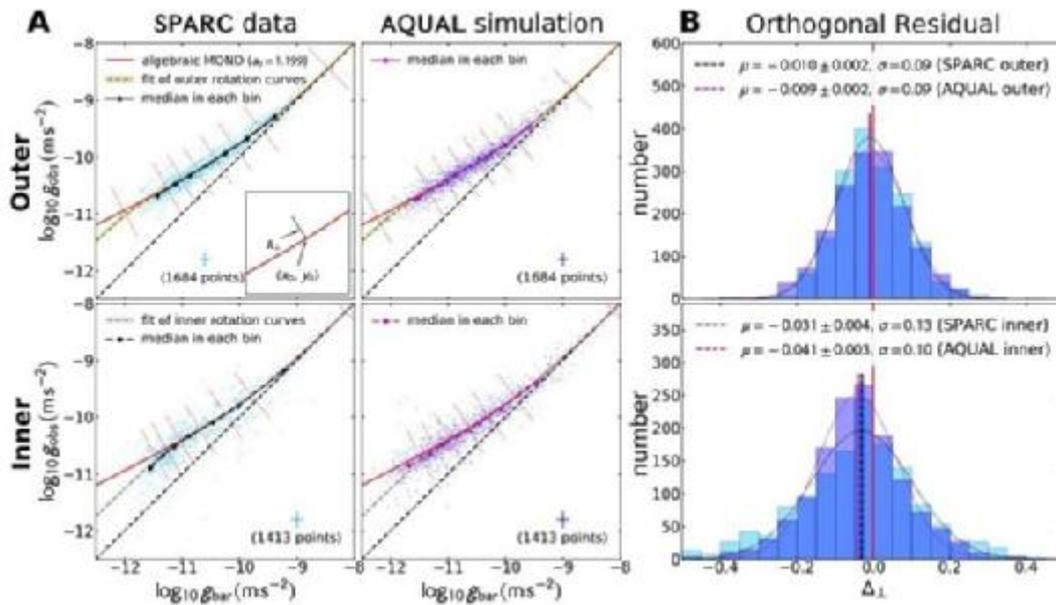


**Figura 2.** Curva de rotación de la galaxia espiral típica M 33 (puntos amarillos y azules con barras de error) y la prevista a partir de la distribución de la materia visible (línea blanca). La discrepancia entre las dos curvas se explica añadiendo un halo de materia oscura que rodea la galaxia. Crédito: Wikipedia.

A distancias interestelares, la atracción gravitatoria entre las estrellas es esencialmente newtoniana. Entonces, en lugar de modificar la relatividad general, Milgrom propuso modificar la ley de la gravedad universal de Newton o bien la ley de fundamental de la dinámica a bajas aceleraciones, y cambiar la sacrosanta segunda ley de Newton. Argumentó que en lugar de la fuerza de atracción como una relación pura del cuadrado inverso, la gravedad tiene una pequeña atracción remanente independientemente de la distancia. Este remanente es solo unas 10 billonésimas de  $G$ , pero es suficiente para explicar las curvas de rotación galáctica. Equivalentemente, Milgrom propuso modificar la ley de aceleración dada por el enunciado "La fuerza es proporcional a la aceleración" por "La fuerza es proporcional al cuadrado de la aceleración a bajas aceleraciones".

Por supuesto, solo agregar un término pequeño a la gravedad de Newton significa que también debe modificar las ecuaciones de Einstein de la relatividad general, o cambiar lo que entendemos por principio de equivalencia si modificamos la noción de fuerza=aceleración. Entonces, MoND se ha generalizado de varias maneras, como AQUAL, que significa "un Lagrangiano cuadrático" (A QUAdratic lagrangian). Un lagrangiano es un objeto que describe la dinámica en una forma diferente pero equivalente a las leyes de Newton usuales, aunque fundado en el principio de mínima acción, la mecánica racional (generalización del siglo XIX de las leyes dinámicas usando energía en vez de aceleraciones y fuerzas), y funciones y operadores en espacios funcionales. Tanto AQUAL como el modelo LCDM (Lambda Cold Dark Matter) estándar pueden explicar las curvas de rotación galáctica observadas, pero existen algunas diferencias sutiles.

Aquí es donde entra en juego un estudio reciente. Una diferencia entre AQUAL y LCDM está en las velocidades de rotación de las estrellas de la órbita interna frente a las estrellas de la órbita externa. Para LCDM, ambos deben regirse por la distribución de la materia, por lo que la curva debe ser suave. AQUAL predice una pequeña torcedura en la curva debido a la dinámica de la teoría. Es demasiado pequeño para medirlo en una sola galaxia, pero estadísticamente debería haber un pequeño cambio entre las distribuciones de velocidad interna y externa.



**Figura 3.** Desplazamiento medido entre los movimientos estelares internos y externos. Crédito: Kyu-Hyun Chae.

Entonces, el autor de este artículo analizó las curvas de velocidad de alta resolución de 152 galaxias observadas en la base de datos Spitzer Photometry and Accurate Rotation Curves (SPARC). Encontró un turno de acuerdo con AQUAL. Los datos parecen respaldar la gravedad modificada sobre la cosmología estándar de la materia oscura.

El resultado es emocionante, pero no anula de manera concluyente la materia oscura. El modelo AQUAL tiene sus propios problemas, como su desacuerdo con la lente gravitacional observada por las galaxias. Pero es una victoria para la teoría desvalida, que tiene a algunos astrónomos vitoreando "¡Vive le MoND!"

La investigación se publica en el servidor de preimpresión arXiv.

## Referencias

- [1] Kyu-Hyun Chae, *Distinguishing Dark Matter, Modified Gravity, and Modified Inertia with the Inner and Outer Parts of Galactic Rotation Curves*, [arXiv \(2022\)](https://arxiv.org/abs/2207.11069). <https://dx.doi.org/10.48550/arxiv.2207.11069>
- [2] December 30, 2022, *New measurements of galaxy rotation lean toward modified gravity as an explanation for dark matter*, by Brian Koberlein, Universe Today magazine. URL: <https://phys.org/news/2022-12-galaxy-rotation-gravity-explanation-dark.html>

[3] Milgrom, M. (1983). "A modification of the Newtonian dynamics as a possible alternative to the hidden mass hypothesis". *Astrophysical Journal*. 270: 365–370. DOI: <https://doi.org/10.1086%2F161130>

[4] Milgrom, M. (1983). "A modification of the Newtonian dynamics - Implications for galaxies". *Astrophysical Journal*. 270: 371–383. DOI: <https://doi.org/10.1086%2F161131>

[5] Milgrom, M. MOND - A PEDAGOGICAL REVIEW. URL: [https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Sept01/Milgrom2/Milgrom\\_contents.html](https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Sept01/Milgrom2/Milgrom_contents.html)

[6] Juan F. González. *Extended Relativity: Beyond*. IARD 2016. Talk given in June, 6th, at The 10th Biennial Conference on Classical and Quantum Relativistic Dynamics of Particles and Fields. Disponible en la URL: [https://www.academia.edu/26730540/Extended\\_Relativity\\_Beyond](https://www.academia.edu/26730540/Extended_Relativity_Beyond)

### **Apéndice (I).** Modified Newtonian Dynamics, a.k.a., MOND.

En 1983, Milgrom propuso modificar la segunda ley de Newton para explicar las curvas de rotación de galaxias espirales típicas. Introdujo la variación:

$$m\mu\left(\frac{a}{a_0}\right)a = F$$

donde la función de interpolación MOND  $\mu$  se define como sigue:

$$\mu\left(\frac{a}{a_0}\right) = \begin{cases} 1, & \text{si } a \gg a_0 \\ \frac{a}{a_0}, & \text{si } a \ll a_0 \end{cases}$$

La función de interpolación  $\mu$  no está definida unívocamente, y en general varias alternativas han sido propuestas en la literatura MOND. Las dos opciones más habituales son, sin embargo,

*Opción 1. MOND simple.*

$$\mu\left(\frac{a}{a_0}\right) = \frac{1}{1 + \frac{a}{a_0}}$$

*Opción 2. MOND estándar.*

$$m\mu\left(\frac{a}{a_0}\right) = \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{a_0}{a}\right)^2}}$$

Con estas dos opciones, el límite  $a \ll a_0$  proporciona una fuerza de la segunda ley de Newton proporcional al cuadrado de la aceleración, y no a la aceleración. Matemáticamente, en este límite, MOND produce

$$F_{MOND} = m \frac{a^2}{a_0}$$

Aplicando este resultado a la gravedad, y para una órbita circular con aceleración centrípeta

$$a = \frac{v^2}{r}$$

obtenemos para estas dos opciones de MOND

$$G \frac{Mm}{r^2} = m \frac{\frac{v^4}{r^2}}{a_0} = m \frac{v^4}{a_0 r^2}$$

de donde se infiere la constancia observada de la velocidad de los brazos espirales de la galaxia espiral típica

$$v = \sqrt[4]{GMa_0}$$

que es diferente a lo que esperamos en el sentido newtoniano, y que se ve en escala de los sistemas solares:

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}} \propto \frac{1}{\sqrt{r}}$$

### **Apéndice (II). Una alternativa a MOND: aceleración mínima.**

Una alternativa variante de MOND es que hay una aceleración mínima que entra en la segunda ley de Newton y no puede ser "eliminada" por un sistema inercial. Esta idea, compatible con una extensión sutil del principio de relatividad [6] lleva a la siguiente ley modificada:

$$m \frac{v^2}{r} = \frac{GMm}{r^2} + ma_0$$

o bien

$$v^2 = \frac{GM}{r} + a_0 r$$

Ahora, elevando al cuadrado los miembros de esta ecuación, deducimos

$$v^4 = \left( \frac{GM}{r} + a_0 r \right)^2$$

$$v^4 = \frac{G^2 M^2}{r^2} + a_0^2 r^2 + 2GMa_0$$

Suponiendo que  $G^2 M^2 \ll 1$ ,  $a_0^2 r^2 \ll 1$  pero que  $GMa_0$  NO es despreciable, se deduce de nuevo la curva de rotación galáctica para galaxias espirales normales

$$v = \sqrt[4]{2GMa_0}$$

Artículo editado, traducido y completado/explicado por Juan F. González.

## 37. Los teoremas maravillosos de Emmy Noether(I)

### Los teoremas maravillosos de Emmy Noether(I)

por Juan F. González (circa MMXXII)

#### Invariante Variationsprobleme.

(F. Klein zum fünfzigjährigen Doktorjubiläum.)

Von

Emmy Noether in Göttingen.

Vorgelegt von F. Klein in der Sitzung vom 26. Juli 1918<sup>1)</sup>.

Es handelt sich um Variationsprobleme, die eine kontinuierliche Gruppe (im Lieschen Sinne) gestatten; die daraus sich ergebenden Folgerungen für die zugehörigen Differentialgleichungen finden ihren allgemeinsten Ausdruck in den in § 1 formulierten, in den folgenden Paragraphen bewiesenen Sätzen. Über diese aus Variationsproblemen entspringenden Differentialgleichungen lassen sich viel präzisere Aussagen machen als über beliebige, eine Gruppe gestattende Differentialgleichungen, die den Gegenstand der Lieschen Untersuchungen bilden. Das folgende beruht also auf einer Verbindung der Methoden der formalen Variationsrechnung mit denen der Lieschen Gruppentheorie. Für spezielle Gruppen und Variationsprobleme ist diese Verbindung der Methoden nicht neu; ich erwähne Hamel und Herglotz für spezielle endliche, Lorentz und seine Schüler (z. B. Fokker), Weyl und Klein für spezielle unendliche Gruppen<sup>2)</sup>. Insbesondere sind die zweite Kleinsche Note und die vorliegenden Ausführungen gegenseitig durch einander beein-

1) Die endgiltige Fassung des Manuskriptes wurde erst Ende September eingereicht.

2) Hamel: Math. Ann. Bd. 59 und Zeitschrift f. Math. u. Phys. Bd. 50. Herglotz: Ann. d. Phys. (4) Bd. 36, bes. § 9, S. 511. Fokker, Verlag d. Amsterdamer Akad., 27/1. 1917. Für die weitere Litteratur vergl. die zweite Note von Klein: Göttinger Nachrichten 19. Juli 1918.

In einer eben erschienenen Arbeit von Kneser (Math. Zeitschrift Bd. 2) handelt es sich um Aufstellung von Invarianten nach ähnlicher Methode.

**Figura 1.** La primera página de [1], que supuso una revolución en la Física Teórica y llamó la atención del mismísimo A.Einstein.



**Figura 2.** La matemática alemana Emmy Noether revolucionó la Física y el álgebra moderna en el primer y segundo cuarto de siglo XX.

La formulación newtoniana de las leyes de la Mecánica deja sin resolver muchas cuestiones, además de que su tratamiento es complicado al versar sobre fuerzas y aceleraciones (o momentos), que son magnitudes vectoriales. En el siglo XIX, Lagrange y Hamilton, junto a otros investigadores, desarrollaron formulaciones alternativas de la Mecánica Clásica, conocida como Mecánica Analítica o Racional, usando procedimientos matemáticos que hoy día se conocen como análisis variacional y cálculo funcional.

En la formulación de Lagrange, el objeto fundamental es la integral de acción de una función, hoy día denominada lagrangiano (o densidad lagrangiana en la versión de campos o sistemas continuos, aunque por abuso de lenguaje se sigue llamando lagrangiano a la densidad lagrangiana). La acción es

$$S(q) = \int_M L dt$$

El lagrangiano  $L$  es una función matemática que depende de unas variables  $q(t)$  llamadas coordenadas generalizadas (que pueden ser escalares, vectores o incluso tensores, espinores, etcétera).

**Caso de lagrangianos de primer orden**  $L = L(q, \dot{q})$

Para un lagrangiano que depende de las coordenadas generalizadas y sus derivadas temporales de primer orden, se tiene que:

$$\delta L(q, \dot{q}) = \frac{\partial L}{\partial q} \delta q + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \delta \dot{q}$$

Usando la regla de Leibniz de derivación de un producto, podemos escribir esta expresión como sigue:

$$\delta L(q, \dot{q}) = \frac{\partial L}{\partial q} \delta q + \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \delta q \right) - \left( \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) \delta q$$

o reorganizando los términos

$$\delta L(q, \dot{q}) = E_1(L) \delta q + \frac{d}{dt} (p \delta q)$$

donde hemos definido el momento generalizado

$$p = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}}$$

y el operador de Euler de primer orden

$$E_1(L(q, \dot{q})) = \frac{\partial L}{\partial q} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}}$$

El movimiento de un cuerpo o sistema definido por coordenadas generalizadas es aquel que minimiza la acción (más generalmente, la extremiza), y  $\delta S = 0$  implica generalmente que  $\delta L = 0$  para variaciones arbitrarias de  $\delta q$ . De hecho, la minimización de la acción es invariante salvo términos de borde o frontera, esto es, la minimización de la acción (o extremización) implica que se puede añadir un término de derivada total al lagrangiano, que no contribuye más que con una constante y no afecta a las ecuaciones de movimiento. El hecho de que el lagrangiano sea cuasiinvariante (invariante salvo una derivada total temporal) se expresa generalmente como el principio gauge

$$\delta L = \frac{d\Lambda}{dt}$$

y entonces la variación global del lagrangiano de primer orden se puede escribir

$$\delta L = \frac{\partial L}{\partial q} \delta q - \left( \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) \delta q + \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \delta q \right) = E_1(L) + \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \delta q \right) = E_1(L) + \frac{d}{dt} (p \delta q) = \frac{d\Lambda}{dt}$$

o bien

$$\delta L = E_1(L)\delta q + \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \delta q \right) = E_1(L) + \frac{d}{dt} (p\delta q - \lambda)$$

La criticalidad de la acción y el lagrangiano de primer orden, implica el cumplimiento de las ecuaciones de Euler-Lagrange:

$$E_1(L) = \frac{\partial L}{\partial q} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} = 0$$

Además, el término de borde o frontera, es la cantidad conservada o carga de Noether bajo transformaciones de simetría  $\delta q$  arbitrarias (como veremos más adelante, es uno de los teoremas de Noether):

$$C = \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \delta q - \lambda \right)$$

Lo divertido de todo esto, es que podemos generalizarlo a derivadas de orden superior y de alto orden arbitrario.

### Caso de lagrangianos de segundo orden $L(q, \dot{q}, \ddot{q})$

Supongamos ahora que  $L = L(q, \dot{q}, \ddot{q})$ , que se corresponde a un lagrangiano que depende de la posición, velocidad y aceleración generalizadas. La variación del lagrangiano es ahora

$$\delta L(q, \dot{q}, \ddot{q}) = \frac{\partial L}{\partial q} \delta q + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \delta \dot{q} + \frac{\partial L}{\partial \ddot{q}} \delta \ddot{q}$$

o bien, de nuevo usando la regla del producto de Leibniz

$$\delta L(q, \dot{q}, \ddot{q}) = \left( \frac{\partial L}{\partial q} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) \delta q + \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \delta q \right) + \frac{\partial L}{\partial \ddot{q}} \delta \ddot{q}$$

Para el último término del miembro derecho, aplicamos nuevamente 2 veces la regla de Leibniz para eliminar la dependencia temporal de las variaciones hasta donde podemos:

$$\frac{\partial L}{\partial \ddot{q}} \delta \ddot{q} = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \ddot{q}} \delta \dot{q} \right) - \left[ \frac{d}{dt} \left( \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \ddot{q}} \delta \dot{q} \right) - \frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial L}{\partial \ddot{q}} \delta q \right]$$

Usando el mismo tipo de reorganización que con el lagrangiano de primer orden, obtenemos ahora la variación total del lagrangiano

$$\delta L(q, \dot{q}, \ddot{q}) = \left( \frac{\partial L}{\partial q} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} + \frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial L}{\partial \ddot{q}} \right) \delta q + \frac{d}{dt} \left[ \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \delta q - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \ddot{q}} \delta q \right) + \frac{\partial L}{\partial \ddot{q}} \delta \dot{q} \right]$$

Esta expresión puede reescribirse sucintamente como

$$\delta L = E_2(L(q, \dot{q}, \ddot{q}))\delta q + \frac{d}{dt} [E_1(L(\dot{q}, \ddot{q}))\delta q + E_0(L(\ddot{q}))\delta \dot{q}]$$

y donde hemos definido los operadores de Euler

$$E_2(L(q, \dot{q}, \ddot{q})) = \frac{\partial L}{\partial q} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} + \frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial L}{\partial \ddot{q}}$$

$$E_1(L(\dot{q}, \ddot{q})) = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \delta q - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \ddot{q}}$$

$$E_0(L(\ddot{q})) = \frac{\partial L}{\partial \ddot{q}}$$

La extremización de la acción (invarianza) y la cuasiinvariancia del lagrangiano genera las ecuaciones de movimiento

$$E_2 = \frac{\partial L}{\partial q} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} + \frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial L}{\partial \ddot{q}} = 0$$

y la conservación de la carga de Noether en la frontera

$$C = \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \ddot{q}} - \Lambda \right) \delta q + \frac{\partial L}{\partial \ddot{q}} \delta \dot{q}$$

**Caso de lagrangianos de tercer orden**  $L = L(q, \dot{q}, \ddot{q}, \dots q)$

Se deja como ejercicio para el lector interesado y fascinado por estas líneas, calcular los detalles (por fuerza bruta de derivación via regla de Leibniz) para el lagrangiano cuya variación es

$$\delta L = \delta L(q, \dot{q}, \ddot{q}, \dots q) = \frac{\partial L}{\partial q} \delta q + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \delta \dot{q} + \frac{\partial L}{\partial \ddot{q}} \delta \ddot{q} + \frac{\partial L}{\partial \dots q} \delta \dots q$$

Evidentemente, el problema es reescribir el término

$$\frac{\partial L}{\partial \dots q} \delta \dots q$$

como sigue

$$\frac{\partial L}{\partial \dots q} \delta \dots q = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dots q} \delta \ddot{q} \right) - \frac{d}{dt} \left( \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dots q} \delta \dot{q} \right) + \frac{d}{dt} \left( \frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial L}{\partial \dots q} \delta q \right) - \frac{d^3}{dt^3} \frac{\partial L}{\partial \dots q} \delta q$$

con lo que la variación del lagrangiano es ahora

$$\delta L = E_3(L(q, \dot{q}, \ddot{q}, \dots q))\delta q + \frac{d}{dt} C$$

donde ahora tenemos, en virtud de la extremización de la acción, y de la cuasiinvariancia del lagrangiano, respectivamente, las ecuaciones de movimiento y la carga de Noether del término de frontera de la acción para el lagrangiano :

$$E_3(L(q, \dot{q}, \ddot{q}, \dots, q)) = \frac{\partial L}{\partial q} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} + \frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial L}{\partial \ddot{q}} - \frac{d^3}{dt^3} \frac{\partial L}{\partial \dots q} = 0$$

$$C = E_2(L(\dot{q}, \ddot{q}))\delta q + E_1(L(\ddot{q}, \dots, q))\delta \dot{q} + E_0(L(\dots, q))\delta \ddot{q}$$

y donde la carga de Noether para el lagrangiano de tercer orden  $C$  puede reexpresarse también como

$$C = \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \ddot{q}} + \frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial L}{\partial \dots q} \right) \delta q + \left( \frac{\partial L}{\partial \ddot{q}} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dots q} \right) \delta \dot{q} + \frac{\partial L}{\partial \dots q} \delta \ddot{q}$$

**Caso de lagrangianos de enésimo orden**  $L = L(q, Dq, D^2q, \dots, D^n q)$

Aplicando inducción, podemos obtener las ecuaciones de Euler-Lagrange de enésimo orden (orden  $n$ ), simplemente cuidando algo la notación de las derivadas.  $D = d/dt$ ,  $D^2 = d^2/dt^2$ , ...,  $D^n = d^n/dt^n$  son las derivadas temporales de orden 1 hasta orden  $n$  (por generalidad  $D^0 f = 1f = f$ ). No es complicado deducir lo siguiente inductivamente:

$$\delta L = E_n(L(q, Dq, \dots, D^n q))\delta q + \frac{dC}{dt}$$

donde ahora se tienen las ecuaciones de Euler-Lagrange y la carga de Noether

$$E_n(L) = \sum_{j=0}^n D^j \frac{\partial L}{\partial D^j q} = 0$$

$$C = \sum_{k=0}^n E_k \delta D^{n-k-1} q - \Lambda \delta q$$

o bien

$$C = \left( \frac{\partial L}{\partial Dq} - D \frac{\partial L}{\partial D^2 q} + D^2 \frac{\partial L}{\partial D^3 q} - \dots - \Lambda \right) \delta q + \left( \frac{\partial L}{\partial D^2 q} - D \frac{\partial L}{\partial D^3 q} + \dots \right) \delta Dq + \dots + \frac{\partial L}{\partial D^n q} \delta D^{n-1} q$$

### Sistemas continuos: campos y densidades lagrangianas

El caso anterior puede generalizarse cuando pasamos de coordenadas discretas de partículas  $q(t)$  a campos en una determinada variedad (en física, generalmente el espacio-tiempo, aunque no siempre es esta la única variedad que se estudia). Un campo  $\phi(x) = \phi(x^\mu)$  depende de las coordenadas  $x^\mu$  de la variedad espacio-tiempo. El lagrangiano  $L$  se convierte en una densidad lagrangiana  $\mathcal{L}$ , y la acción se define análogamente sobre dicha variedad

$$S = \int_M \mathcal{L} = \int_M \mathcal{L}(\phi, \partial\phi, \partial^2\phi, \dots, \partial^s\phi) d^D x$$

donde  $D$  es ahora la dimensión (no confundir con el  $D$  usado para la derivada temporal antes). La derivada temporal es ahora solamente una de las derivadas parciales  $\partial = \partial_\mu$ . Mutatis mutandis, si cambiamos  $q(t)$  por  $\phi(x)$ , las derivadas temporales por derivadas parciales, todo lo anterior puede generalizarse. Ahora la carga es una corriente  $J$  (la carga de Noether sería esencialmente la integral volúmica de la componente temporal de la corriente) que será conservada. Esto es debido a que la ecuación de continuidad tiene la forma

$$\partial_\mu J^\mu = 0 = \partial_0 J^0 + \partial_i J^i = \partial_t Q + \partial_i J^i$$

de donde

$$Q = - \int \partial_i J^i dt$$

por lo que  $Q$  se conservará cuando dicha integral se anule. La condición de cuasiinvariancia del lagrangiano pasa ahora a ser una cuasiinvariancia de una divergencia, es decir,  $\mathcal{L}$  puede cambiar como una transformación de gauge hasta una derivada parcial de una cantidad  $\lambda^\mu$  manteniendo la integral de acción invariante, ya que  $\partial_\mu \lambda^\mu$  en los bordes o frontera no contribuirá generalmente a las ecuaciones de movimiento clásicas.

*Caso de densidades lagrangianas de orden 1.*

$$E_1(\mathcal{L}) = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \phi} - \partial_\mu \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \partial_\mu \phi} = 0$$

Ecuaciones de movimiento:

$$J^\mu = \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \partial_\mu \phi} \delta \phi - \lambda^\mu \right)$$

Corriente de Noether:

*Caso de densidades lagrangianas de orden 2.*

$$E_2(\mathcal{L}) = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \phi} - \partial_\mu \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \partial_\mu \phi} + \partial_\mu \partial_\nu \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \partial_\mu \partial_\nu \phi} = 0$$

Ecuaciones de movimiento:

$$J^\mu = \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \partial_\mu \phi} - \partial_\mu \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \partial_\mu \partial_\nu \phi} - \lambda^\mu \right) \delta \phi + \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \partial_\mu \partial_\nu \phi} \delta \partial_\mu \phi$$

Corriente de Noether:

*Caso de densidades lagrangianas de orden 3.*

Para facilitar la notación, indicaremos las sucesivas derivadas por índices.

Así,  $\partial_\mu \partial_\nu \phi = \phi_{\mu\nu}$ , ...  $\partial^s \phi = \partial_{\mu_1} \dots \partial_{\mu_s} \phi = \phi_{\mu_1 \dots \mu_s}$

Ecuaciones de movimiento:

$$E_3(\mathcal{L}) = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \phi} - \partial_\mu \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \phi_\mu} + \partial_{\mu\nu} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \phi_{\mu\nu}} - \partial_{\mu_1 \mu_2 \mu_3} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \phi_{\mu_1 \mu_2 \mu_3}} = 0$$

Corriente de Noether:

$$J = \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \phi_\sigma} - \partial_\mu \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \phi_{\mu\sigma}} + \partial_\mu \partial_\nu \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \phi_{\mu\nu\sigma}} - \lambda^\mu \right) \delta\phi + \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \phi_{\sigma\nu}} - \partial_\mu \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \phi_{\mu\nu\sigma}} \right) \delta\phi_\nu + \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \phi_{\mu\nu\sigma}} \delta\phi_{\mu\nu}$$

Caso de densidades lagrangianas de orden  $n$ .

$$\text{Ecuaciones de movimiento: } \delta \mathcal{L} = E_n(\mathcal{L}(\phi, D\phi, \dots, D^n\phi))\delta\phi + \partial_\mu \lambda^\mu$$

y ahora las ecuaciones de Euler-Lagrange de campo y la corriente de Noether adquieren las formas funcionales

$$E_n(\mathcal{L}) = \sum_{j=0}^n D^j \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial D^j \phi} = 0$$

$$J = \sum_{k=0}^n E_k \delta D^{n-k-1} \phi - \lambda \delta\phi$$

o bien

$$J = \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial D\phi} - D \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial D^2\phi} + D^2 \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial D^3\phi} - \dots - \lambda \right) \delta\phi + \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial D^2\phi} - D \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial D^3\phi} + \dots \right) \delta D\phi + \dots + \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial D^n\phi} \delta D^{n-1}\phi$$

### Primer teorema de Noether: enlace de simetrías (invariancias) y leyes de conservación

La importancia del teorema de Noether reside en la conexión de simetrías (o leyes de invariancia) con las leyes de conservación. Así, la invariancia del lagrangiano frente a traslaciones implica la conservación del momento, la invariancia frente a traslaciones temporales implica la conservación de la energía (más generalmente, la invariancia frente a traslaciones espaciotemporales implica la conservación del denominado tensor energía-momento-impulso), la invariancia frente a rotaciones implica la conservación del momento angular (generalmente un bivector, pero dual a un vector en 3d), la invariancia frente a boosts implica que el centro de masas (o centro de energía en versión relativista) se mueve con movimiento uniforme,...Y más generalmente, el primer teorema de Noether indica que la invariancia de la acción (cuasiinvariancia del lagrangiano) frente a un determinado grupo de transformaciones (fijar el tipo de grupo a nivel matemático es importante, generalmente se prefieren grupos continuos, habitualmente de Lie-Backlund, pero pueden ser grupos más esotéricos como el grupo de Poincaré, el grupo conforme, el grupo de De Sitter, y otros varios).

Por ende, el primer teorema de Noether establece una correspondencia uno a uno (Noether probó esto) y lo recíproco, que una ley de conservación está asociada a una simetría o invariancia, al mismo tiempo que una simetría o invariancia está asociada a una cantidad conservada incluso aunque no sea trivial. Las leyes de conservación de los grupos continuos son leyes aditivas, mientras que las simetrías discretas obedecen leyes de conservación multiplicativas (por ejemplo, la invariancia bajo inversión del sentido del tiempo, la invariancia bajo cambio de partículas por antipartículas o la invariancia bajo reflexión especular con las llamadas simetrías T, C y P, y son también simetrías en la Física de forma combinada, pero no al parecer de forma separada).

### Segundo teorema de Noether: enlace de identidades diferenciales (dependencias de las ecuaciones de movimiento) con invariancia gauge

El segundo teorema de Noether es mucho más abstracto y sutil, y generalmente no tiene unas consecuencias apreciables como el primero. Si el grupo de invariancia se sustituye por un grupo de dimensión infinita y las transformaciones son gauge de un determinado conjunto de funciones hasta un determinado orden en las derivadas, Noether probó que no todas las ecuaciones de movimiento son independientes y hay redundancia o dependencias entre ellas. Al conjunto de estas relaciones, generalmente en la forma de identidades bajo la forma de operadores diferenciales, se le denomina identidades de Bianchi (aunque suele confundirse este término con las identidades de Bianchi de ciertos tensores que pueden o no tener relación con este teorema). No obstante, en la jerga moderna suele denominarse identidades de Noether a estas relaciones entre ecuaciones de movimiento bajo la presencia de grupos de transformaciones que dependen de funciones arbitrarias hasta cierto orden en las derivadas.

El enunciado matemático del segundo teorema de Noether es más complicado, y se incluye en el siguiente artículo(apartado) una versión del mismo algo arcaica. Las versiones más modernas usan formas y tensores, además del elegante lenguaje de fibrados jet de una variedad lagrangiana.

## Referencias

- [1] Noether, E. (1918). "*Invariante Variationsprobleme*". Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. Mathematisch-Physikalische Klasse. [1918: 235–257](#).
- [2] Emmy Noether (1971). Translated by Mort Tavel. "*Invariant Variation Problems*". Transport Theory and Statistical Physics. 1 (3): 186–207. arXiv:[physics/0503066](#)
- [3] Neuenschwander, Dwight E. (2010). *Emmy Noether's Wonderful Theorem*. Johns Hopkins University Press. ISBN 978-0-8018-9694-1.
- [4] Sardanashvily (2009). "*Gauge conservation laws in a general setting. Superpotential*". International Journal of Geometric Methods in Modern Physics. 6 (6): 1047–1056. ArXiv: <https://arxiv.org/pdf/0906.1732.pdf>
- [5] Lanczos, C. (1970). *The Variational Principles of Mechanics* (4th ed.). New York: Dover Publications. pp. 401–5. ISBN 0-486-65067-7.
- [6] Kosmann-Schwarzbach, Yvette (2010). *The Noether theorems: Invariance and conservation laws in the twentieth century*. Sources and Studies in the History of Mathematics and Physical Sciences. Springer-Verlag. ISBN 978-0-387-87867-6.
- [7] Auguste Dick. *Emmy Noether, 1882-1935*. Birkhäuser, Boston, 1981. <https://archive.org/details/EmmyNoether1882-1935>.
- [8] Johnson, Tristan (2016). "*Noether's Theorem: Symmetry and Conservation*". Honors Theses. Union College. Retrieved 28 August 2020.
- [9] Badin, Gualtiero; Crisciani, Fulvio (2018). *Variational Formulation of Fluid and Geophysical Fluid Dynamics - Mechanics, Symmetries and Conservation Laws* -. Springer. p. 218. [doi:10.1007/978-3-319-59695-2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-59695-2)

[10] Quigg, Chris (9 July 2019). "Colloquium: A Century of Noether's Theorem". [arXiv:1902.01989](https://arxiv.org/abs/1902.01989)

Artículo editado y escrito por Juan F. González

## 38. Los maravillosos teoremas de Emmy Noether(II)

### Preludio

Sean  $n$  campos  $\phi^i(x)$ ,  $i = 1, \dots, n$ , que dependen de  $D$  variables o coordenadas  $x = x^\mu = (x^1, x^2, \dots, x^D)$ . Las ecuaciones de Euler-Lagrange de primer orden (se puede extender la discusión a cualquier orden de derivadas mediante el uso de fibrados jet) se escriben

$$E_i(\varphi) = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \phi^i} - \partial_\mu \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial (\partial_\mu \phi^i)} = 0$$

Para la integral de acción

$$S = \int_M \mathcal{L}(x; \phi^i, \partial_\mu \phi^i) d^D x$$

se definen las transformaciones de coordenadas y campos:

$$x^\mu \rightarrow x'^\mu = x^\mu + \delta x^\mu$$

$$\phi^i(x) \rightarrow \phi'^i(x') = \phi^i(x) + \delta \phi^i = \phi^i(x) + \bar{\delta} \phi^i + \partial_\mu \phi^i \delta x^\mu$$

que son transformaciones infinitesimales de las cantidades  $x^\mu, \phi^i$ . Al más bajo orden, la acción cambia

$$\delta S = \int_M \mathcal{L}(x', \phi'(x'), \partial \phi'(x')) d^D x' - \int_M \mathcal{L}(x, \phi(x), \partial \phi) d^D x$$

para dar

$$\delta S = \int_M \left[ E_i(\phi) \bar{\delta} \phi^i + \partial_\mu B^\mu(x, \phi, \partial \phi, \delta x, \delta \phi) \right]$$

y donde  $B^\mu$ ,  $\mu = 1, 2, \dots, D$  son funciones lineales en  $\delta x^\mu, \delta \phi^i$ . Con estas expresiones, Noether enunció sus dos teoremas.

**Teorema 1 (Noether, grupos r-paramétricos). Leyes de conservación implica invariancia y viceversa.**

Si la integral de acción es invariante para un grupo r-paramétrico de Lie (Lie-Backlund hoy día):

$$x^\mu \rightarrow x'^\mu = f^\mu(x, \varphi; \epsilon^1, \dots, \epsilon^r)$$

$$\phi^i(x) \rightarrow \phi'^i(x') = F^i(x, \varphi; \epsilon^1, \dots, \epsilon^r)$$

donde los valores  $\epsilon = \epsilon^\rho = 0 = (0, \dots, 0) = (\epsilon^1, \dots, \epsilon^r)$ , con  $\rho = 1, \dots, r$  dan la transformación identidad. Entonces, para la parametrización

$$\delta x^\mu = X^\mu_\rho(x, \phi) \epsilon^\rho, \quad |\epsilon| < 1$$

$$\delta \phi^i = Z^i_\rho(x, \phi) \epsilon^\rho$$

se demuestra, como hizo Noether, que existen  $r$  corrientes conservadas

$$J^\mu_\rho = T^\mu_\nu X^\nu_\rho - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial (\partial_\mu \phi^i)} Z^i_\rho, \quad \rho = 1, 2, \dots, r$$

con el tensor energía-momento-impulso dado por

$$T^\mu_\nu = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial (\partial_\mu \phi^i)} \partial_\nu \phi^i - \delta^\mu_\nu \mathcal{L}$$

para las soluciones  $\phi^i(x)$  de las ecuaciones de movimiento  $E_i(\phi) = 0$  de un lagrangiano de primer orden.

*Ejemplo 1. Traslaciones espacio-tiempo.*

Las transformaciones de coordenadas

$$x^\mu \rightarrow x^\mu + \epsilon^\mu$$

$$\delta \phi^i = 0$$

proporcionan las corrientes

$$J^\mu_\nu = T^\mu_\nu, \quad \mu, \nu = 1, 2, 3, \dots, D.$$

*Ejemplo 2. Simetrías internas.*

Sean las transformaciones internas

$$\delta x^\mu = 0$$

$$\phi'^i(x) = Y^i_\rho(\epsilon^1, \epsilon^2, \dots, \epsilon^r) \phi^\rho(x)$$

Entonces las siguientes corrientes son conservadas supuestas válidas las ecuaciones de movimiento  $E_i(\phi) = 0$

$$J^\mu_\rho = - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial(\partial_\mu(\phi^i))} Z^i_\rho, \quad \rho = 1, 2, \dots, r$$

También se cumple el recíproco: si hay  $P$  cantidades conservadas, entonces hay grupos de transformaciones que dejan la acción invariante.

**Teorema 2 (Noether, grupos  $\infty$ -paramétricos o transformaciones gauge).** La invariancia bajo un grupo infinitodimensional de transformaciones "gauge" implican dependencias funcionales (redundancias, identidades diferenciales) entre las ecuaciones de movimiento y **viceversa**.

Si la integral de acción es invariante bajo un grupo gauge (infinito-dimensional), los elementos del grupo dependen de  $s$ -funciones suaves o regulares  $\xi^\rho(x)$ ,  $\rho = 1, \dots, s$  y sus derivadas hasta orden  $r_\rho$ , de forma que las variaciones son

$$\delta \phi^j = \sum_{\rho=1}^s \sum_{\sigma_1, \dots, \sigma_D = 0}^{\sigma_1, \dots, \sigma_D = r_\rho} (\epsilon^j(x, \phi; \partial \phi))_{\rho, \sigma_1, \dots, \sigma_D} \frac{\partial^{\sigma_1 + \dots + \sigma_D}}{\partial(x^1)^{\sigma_1} \dots \partial(x^D)^{\sigma_D}} \xi^\rho(x)$$

y existen  $s$ -identidades llamadas identidades de Noether (o identidades de Bianchi) dadas por las expresiones

$$\sum_{\sigma_1, \dots, \sigma_D = 0}^{\sigma_1 + \dots + \sigma_D = r_\rho} (-1)^{\sigma_1 + \dots + \sigma_D} \frac{\partial^{\sigma_1 + \dots + \sigma_D}}{\partial(x^1)^{\sigma_1} \dots \partial(x^D)^{\sigma_D}} (\epsilon(x, \phi, \partial \phi))_{\rho, \sigma_1, \dots, \sigma_D} E_i(\phi) = 0$$

$\rho = 1, \dots, s$ , y que dan relaciones o dependencias entre las  $r_\rho$ -ecuaciones de Euler-Lagrange. La prueba usa integración y el hecho de que uno puede elegir  $\xi^\rho = 0$  y también que podemos escribir

$$\frac{\partial^{\sigma_1 + \dots + \sigma_D}}{\partial(x^1)^{\sigma_1} \dots \partial(x^D)^{\sigma_D}} \xi^\rho = 0$$

en la frontera o borde de  $M$ , topológicamente denotado por  $\partial M$ .

*Ejemplo 1. Electrodinámica clásica.*

En Electrodinámica Clásica se tiene que

$$E_\mu(A) = \partial^\nu F_{\nu\mu}$$

y

$F_{\nu\mu} = \partial_\nu A_\mu - \partial_\mu A_\nu$ . La acción invariante es

$$S(A, F) = -\frac{1}{4} \int d^4x F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

Bajo las transformaciones gauge

$$\delta A^\mu = \partial^\mu \xi(x)$$

se deduce que

$$\partial^\mu E_\mu(A) = 0$$

que es obvio resultado por la antisimetría de  $F$ ,  $F_{\mu\nu} = -F_{\nu\mu}$ .

*Ejemplo 2. Relatividad general.*

En Relatividad General (RG), se tienen las ecuaciones no lineales de campo

$$E_{\mu\nu}(g) = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = G_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

y donde  $R_{\mu\nu}$  es el tensor de Ricci,  $R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}$  es el escalar de curvatura. La invariancia de la acción integral de Einstein-Hilbert

$$S_{EH} = \int d^4x \sqrt{-g} R$$

bajo difeomorfismos o transformaciones generales de coordenadas parametrizadas en la forma

$$\delta x^\mu = \Xi^\mu(x)$$

$$\delta g_{\mu\nu} = D_\mu \Xi_\nu + D_\nu \Xi_\mu$$

donde  $D_\mu$  es la derivada covariante, proporciona 4 identidades de Bianchi (identidades de Noether, dependencias)

dadas por

$$D^\mu E_{\mu\nu}(g) = 0$$

que es obvio por la simetría de  $G_{\mu\nu}$  y esperable por la conservación del tensor energía-momento-impulso  $T_{\mu\nu}$ . Estas relaciones fueron descubiertas por Hilbert y discutidas por él en su primer artículo sobre relatividad general en 1915.

## Teoría de invariantes y álgebra

Emmy Noether (1882-1935) logró su doctorado (Ph.D) en Matemáticas en 1907 en la Universidad de Erlangen. Otra de las facetas de Noether era la teoría de invariantes algebraicos. La teoría de invariantes algebraicos estudia formas multilineales con la expresión formal

$$F^{D,p}(y_1, \dots, y_n; \epsilon) = \sum_{i_1, \dots, i_D=1}^n a_{i_1 i_2 \dots i_D} (y_{i_1})^{\alpha_{i_1}} \dots (y_{i_D})^{\alpha_{i_D}} \quad \text{con } \alpha_{i_1} + \dots + \alpha_{i_D} = p$$

Si uno pasa de variables  $y_j$  a las variables  $x_i$  por transformaciones lineales  $x_i = C_{ij} y_j$ ,  $|C_{ij}| \neq 0$ ,

e insertamos estas relaciones en la fórmula precedente, esperamos encontrar una nueva forma del mismo tipo

$$G^{D,p}(x; b) = F^{D,p}[y(x; c); a]$$

donde los coeficientes  $b^{j_1 \dots j_D}$  son funciones de los coeficientes  $a^{j_1 \dots j_D}$  a través de la matrix de elementos  $C_{ij}$ . La principal cuestión de la teoría de invariantes algebraicos es: ¿qué funciones algebraicas  $f(a)$  de los coeficientes  $a^{j_1 \dots j_D}$  son invariantes bajo transformaciones lineales, tales que se verifica la relación

$$f(b) = |C_{ij}|^g f(a)$$

donde  $g$  es un número racional? Resulta que hay una conexión profunda entre invariantes algebraicos e invariantes diferenciales, que se descubrió ya en el siglo XIX. La propia geometría de Riemann, esencial en la Teoría de la Relatividad General, usa invariantes diferenciales del tipo

$$f(x, dx) = g_{ij}(x) dx^i dx^j$$

aunque se podría también estudiar en principio invariantes más complicados (otras geometrías), del tipo

$$f(x, dx) = g_{i_1 i_2 \dots i_p} dx^{i_1} \dots dx^{i_p}$$

Los teoremas de Noether son relevantes en el estudio del movimiento de fuerzas centrales del tipo inverso del cuadrado (problema de Kepler, con simetría oculta no trivial), el estudio de trompos asimétricos en más dimensiones. or ejemplo, se puede generalizar al denominado grupo  $SO(n)$  el grupo  $SO(3)$  usual de un cuerpo o trompo rígido con ecuaciones de Euler (no confundir estas ecuaciones con las ecuaciones de Euler-Lagrangre):

$$\frac{dj_i^B}{dt} + \sum_{j,k=1}^n C_{ijk} \omega^j j^{kB} = M_i^B$$

con  $i = 1, 2, \dots, n$ . Además, también tiene aplicación en teorías de (super)cuerdas, Mecánica Cuántica, Teorías Cuánticas de Campos (QFT), teorías del estado sólido, incluso en la teoría de agujeros negros (el agujero negro de Kerr con masa y momento angular tiene una constante de movimiento no trivial llamada constante de Carter asociada a una simetría no trivial del agujero negro, llamada simetría de Killing), Cosmología, o en la más humana Ciencia de la atmósfera en fluidos (donde cantidades como vorticidad y enstrofia juegan un papel importante en la dinámica no lineal asociada a los mismos).

Los teoremas de Noether son tan bellos debido a su generalidad y a la relevancia de la simetría en el mundo y en el Universo. A pesar de que se pueden formular hoy día con una elegancia, generalización, abstracción y nivel de sofisticación mayor (quizás escriba una tercera parte sobre este aspecto), la esencia sigue siendo la misma:

1) Simetrías continuas implican leyes de conservación, y viceversa. Matemáticamente, se expresa como ecuaciones de continuidad (campos) o cantidades cuya derivada temporal es cero (en el caso de sistemas de partículas).

2) Simetrías gauge implican dependencias o relaciones funcionales entre ecuaciones de movimiento de campos (partículas), y viceversa. Matemáticamente, se expresa como identidades entre ciertos operadores diferenciales en ecuaciones de tipo ordinario (sistemas de partículas) o en derivadas parciales (teorías de campos).

## Referencias

[1] Hans a. Kastrup, *The contributions of Emmy Noether, Felix Klein and Sophus Lie to the Modern Concept of Symmetries in Physical Sciences*, 1983. Symmetries in Physics (1600-1980), Proceedings of the 1st international Meeting on the History of Scientific Ideas held at Sant Feliu de Guíxols, Spain. UAB.

[2] Olver, Peter (1993). *Applications of Lie groups to differential equations*. Graduate Texts in Mathematics. Vol. 107 (2nd ed.). Springer-Verlag. ISBN 0-387-95000-1.

[3] *Noether's theorem*. Wikipedia, La enciclopedia libre. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Noether%27s\\_theorem](https://en.wikipedia.org/wiki/Noether%27s_theorem)

*Artículo editado, traducido y completado por Juan F. González*

## 39. Los teoremas maravillosos de Emmy Noether(III)

Aquí un pdf con el artículo más completo que la versión actual de este Noticiero.

[https://www.academia.edu/94063999/Los\\_maravillosos\\_teoremas\\_de\\_Emmy\\_Noether?source=wp\\_share](https://www.academia.edu/94063999/Los_maravillosos_teoremas_de_Emmy_Noether?source=wp_share)

## 40. El Aragoscopio

*El nuevo concepto de telescopio espacial podría obtener imágenes de objetos con una resolución mucho más alta que el Hubble*

Los investigadores de la Universidad de Colorado Boulder actualizarán a los funcionarios de la NASA la próxima semana sobre un revolucionario concepto de telescopio espacial seleccionado por la agencia para su estudio en junio pasado que podría proporcionar imágenes hasta 1000 veces más nítidas que el telescopio espacial Hubble.

El profesor de CU-Boulder, Webster Cash, dijo que el paquete de instrumentos consistiría en un telescopio espacial en órbita y un disco opaco frente a él que podría tener hasta media milla de ancho. Según Cash, las ondas de luz difractadas de una estrella objetivo u otro objeto espacial se doblarían alrededor de los bordes del disco y convergerían en un punto central. Esa luz luego se alimentaría al telescopio en órbita para proporcionar imágenes de alta resolución, dijo.

El nuevo concepto de telescopio, llamado Aragoscopio en honor al científico francés Francois Arago, quien detectó por primera vez ondas de luz difractadas alrededor de un disco oscuro, podría permitir a los científicos obtener imágenes de objetos espaciales como "horizontes de eventos" de agujeros negros e intercambios de plasma entre estrellas, dijo Cash del Centro de CU-Boulder de Astrofísica y Astronomía Espacial. El novedoso sistema de telescopio también podría apuntar hacia la Tierra y obtener imágenes de objetos tan pequeños como un conejo, dándole la capacidad de cazar campistas perdidos en las montañas, dijo.

El Aragoscopio CU-Boulder fue una de las 12 propuestas seleccionadas para la Fase Uno de financiación en junio de 2014 por el programa Concepto Innovador Avanzado (NIAC) de la NASA, diseñado para convertir la ciencia ficción en realidad a través del desarrollo tecnológico pionero. Otras propuestas NIAC Fase Uno financiadas, cada una por 100000 dólares durante nueve meses, incluyen un dispositivo en órbita para capturar asteroides que caen y un submarino robótico para explorar lagos de metano en Titán, la luna más grande de Saturno.

En abril, NIAC seleccionará seis de los conceptos de la Fase Uno de 2014 para la financiación de la Fase Dos, que es un premio de 500000 dólares por dos años. En 2004 y 2005, Cash recibió fondos de la Fase Uno y la Fase Dos para un concepto de telescopio y una "sombra estelar" gigante en forma de margarita que bloquearía la luz de una estrella madre y permitiría que la luz de sus planetas se filtrara por los bordes, permitiendo que el equipo los imagine. En 2008, la NASA otorgó a Cash y su equipo 1 millón de dólares adicional para avanzar en el estudio de la sombra estelar del Nuevo Mundo.

“Francamente, nuestro proyecto de sombra estelar New Worlds se superpone con la arquitectura que queremos usar para el Aragoscope, por lo que sentimos que estamos en muy buena forma para entrar en la Fase Dos”, dijo Cash. El Aragoscopio estaría estacionado en una órbita geoestacionaria de 25000 millas de altura que sigue la rotación de la Tierra, haciéndolo parecer inmóvil desde el suelo.

“Tradicionalmente, los telescopios espaciales han sido esencialmente piezas monolíticas de vidrio como el Telescopio Espacial Hubble”, dijo el estudiante de doctorado de CU-Boulder Anthony Harness del Departamento de Ciencias Astrofísicas y Planetarias, quien está trabajando con Cash en el proyecto. “Pero cuanto más pesado es el telescopio espacial, más caro es el costo del lanzamiento. Hemos encontrado una manera de resolver ese problema colocando ópticas grandes y livianas en el espacio que ofrecen una resolución mucho más alta y un costo más bajo”.

El disco espacial opaco estaría hecho de un material fuerte, oscuro, similar al plástico (piense en una bolsa Hefty) que podría lanzarse de forma comprimida como un paracaídas y luego desplegarse en órbita. El escudo espacial estaría atado al telescopio a distancias de decenas a cientos de millas dependiendo del tamaño del disco, dijo Harness.

“El disco opaco del Aragoscopio funciona de manera similar a una lente básica”, dijo Harness. “La luz difractada alrededor del borde del disco circular recorre la misma longitud de camino hacia el centro y se enfoca como una imagen”. Dado que la resolución de la imagen aumenta con el diámetro del telescopio, poder lanzar un disco tan grande pero liviano permitiría a los astrónomos lograr imágenes de mayor resolución que con los telescopios espaciales tradicionales más pequeños, dijo.

Cash y Harness dijeron que esperan realizar una demostración astronómica del concepto Aragoscope en el laboratorio utilizando un disco de 1 metro colocado a varios metros de un telescopio. La fuente de luz estaría fijada unos 5 o 10 metros detrás del disco.

Además, esperan probar el concepto de sombra estelar fijando un disco espacial en la cima de una montaña y colocando un telescopio en un avión flotante para obtener imágenes de Alpha Centauri, un sistema estelar binario que aparece como la tercera estrella más brillante en el cielo.

NIAC se creó en 1998 para solicitar conceptos revolucionarios de personas y organizaciones que pudieran hacer avanzar las misiones de la NASA. Los conceptos ganadores “empujan los límites de la ciencia y la tecnología” y se espera que tarden al menos una década en desarrollarse.

Además del proyecto Aragoscope y Starshade, Cash ganó la financiación de la Fase Uno y la Fase Dos para un tercer concepto NIAC en 2000 y 2001 cuando propuso un interferómetro de rayos X que podría usarse para observar las bocas de los agujeros negros.

El disco espacial opaco estaría hecho de un material fuerte, oscuro, similar al plástico (piense en una bolsa Hefty) que podría lanzarse de forma comprimida como un paracaídas y luego desplegarse en órbita. El escudo espacial estaría atado al telescopio a distancias de decenas a cientos de millas dependiendo del tamaño del disco, dijo Harness.

“El disco opaco del Aragoscopio funciona de manera similar a una lente básica”, dijo Harness. “La luz difractada alrededor del borde del disco circular recorre la misma longitud de camino hacia el centro y se enfoca como una imagen”. Dado que la resolución de la imagen aumenta con el diámetro del telescopio, poder lanzar un disco tan grande pero liviano permitiría a los astrónomos lograr imágenes de mayor resolución que con los telescopios espaciales tradicionales más pequeños, dijo.

Cash y Harness dijeron que esperan realizar una demostración astronómica del concepto Aragoscope en el laboratorio utilizando un disco de 1 metro colocado a varios metros de un telescopio. La fuente de luz estaría fijada unos 5 o 10 metros detrás del disco.

Además, esperan probar el concepto de sombra estelar fijando un disco espacial en la cima de una montaña y colocando un telescopio en un avión flotante para obtener imágenes de Alpha Centauri, un sistema estelar binario que aparece como la tercera estrella más brillante en el cielo.

NIAC se creó en 1998 para solicitar conceptos revolucionarios de personas y organizaciones que pudieran hacer avanzar las misiones de la NASA. Los conceptos ganadores “empujan los límites de la ciencia y la tecnología” y se espera que tarden al menos una década en desarrollarse.

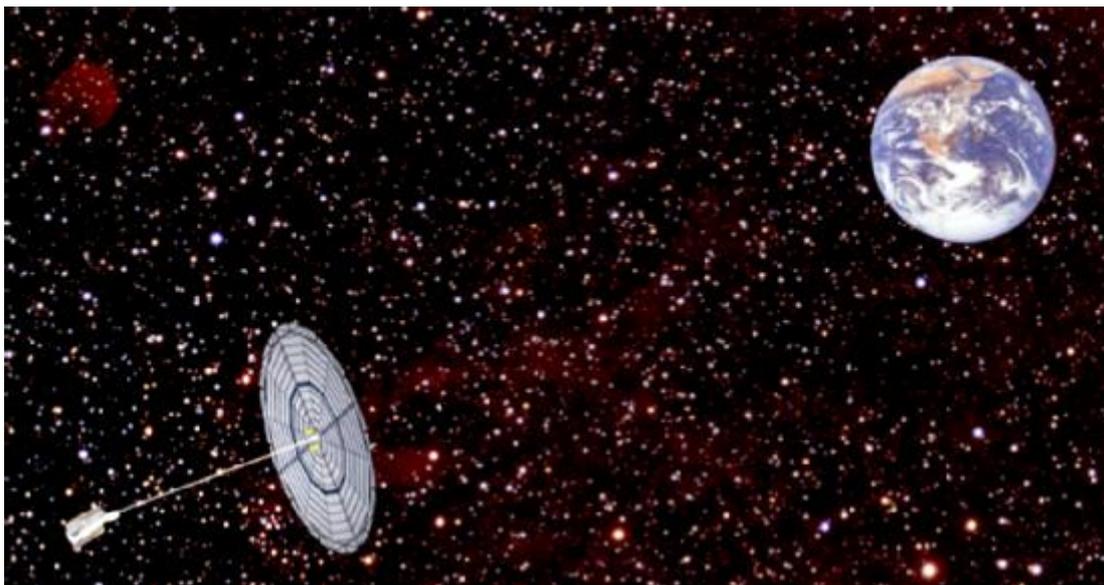
Además del proyecto Aragoscope y Starshade, Cash ganó la financiación de la Fase Uno y la Fase Dos para un tercer concepto NIAC en 2000 y 2001 cuando propuso un interferómetro de rayos X que podría usarse para observar las bocas de los agujeros negros.

Contactos:

Webster Cash, 303-492-4056  
webster.cash@colorado.edu

Anthony Harness, 303-492-5860  
anthony.harness@colorado.edu

Jim Scott, CU-Boulder media relations, 303-492-3114  
jim.scott@colorado.edu



**Figura 1.** Un nuevo concepto de telescopio en órbita desarrollado en CU-Boulder podría permitir a los científicos obtener imágenes de objetos en el espacio o en la Tierra a cientos de veces la resolución del Telescopio Espacial Hubble. Imagen cortesía de la NASA "Tradicionalmente, los telescopios espaciales han sido esencialmente piezas monolíticas de vidrio como el Telescopio Espacial Hubble", dijo el estudiante de doctorado de CU-Boulder Anthony Harness del Departamento de Ciencias Astrofísicas y Planetarias, quien está trabajando con el profesor Webster Cash del Centro de Astrofísica de CU-Boulder. y Astronomía Espacial en el proyecto. "Pero cuanto más pesado es el telescopio espacial, más caro es el costo del lanzamiento.

Hemos encontrado una manera de resolver ese problema colocando ópticas grandes y livianas en el espacio que ofrecen una resolución mucho más alta y un costo más bajo”.

## Referencias

[1] *New space telescope concept could image objects at far higher resolution than Hubble* Published: Jan. 23, 2015. Colorado University news at *CU Boulder Today*. URL: <https://www.colorado.edu/today/2015/01/23/new-space-telescope-concept-could-image-objects-far-higher-resolution-hubble>

[2] *The Aragoscope: Ultra-High Resolution Optics at Low Cost*, by Webster Cash University of Colorado. NASA news Jun 4, 2014, last Updated: Aug 7, 2017. Editor: Loura Hall. URL: <https://www.nasa.gov/content/the-aragoscope-ultra-high-resolution-optics-at-low-cost/#.U5giviKSz8s> , informe técnico del aragoscopio disponible en [https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/2014\\_phase\\_i\\_webster\\_cash\\_the\\_aragoscope.pdf](https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/2014_phase_i_webster_cash_the_aragoscope.pdf)

Artículo editado y traducido por Juan F. González

## 41. Hexaquarks (¿O sexaquarks?).

Los átomos contienen partículas subatómicas, como todos sabemos. No obstante quedan muchos misterios enigmáticos.

Los protones y los neutrones del núcleo hoy día pensamos están formados por quarks. El protón es un estado cuántico  $p = (uud)$ , donde  $u$  es el quark up (arriba) y  $d$  es el quark abajo (down). Los quarks se mantienen unidos, de acuerdo a la Cromodinámica Cuántica (Quantum Chromodynamics, en inglés), mediante gluones, gracias a una propiedad llamada color. Los quarks aislados no existen por la denominada propiedad de confinamiento. Sin embargo, podrían existir además de los bariones usuales (hadrones o partículas de interacción fuerte de 3 quarks) y los mesones (hadrones o partículas de interacción fuerte de dos quarks) estados con múltiples quarks, o incluso híbridos o la posibilidad incluso de estados como el gluonio (gluonium) formado solamente por gluones. Ya hay evidencias directas o indirectas de tetraquarks o pentaquarks.

Dejadme que os hable de una posibilidad exótica particular, un estado de nada más y nada menos que 6 quarks: el asombroso e increíble... **¡Hexaquark!** [1] (También llamado, como un estado cuántico  $S = (uuddss)$ , por algunos *sexaquark* [4], pero tiene un sonido y nombre más sucio así, por lo que se sigue prefiriendo el nombre de hexaquark, después de todo, los científicos no quieren parecer degenerados, incluso aunque estén casi siempre excitados por las novedades).

### La primera pista: el sincrotrón alemán

Un sincrotrón de investigación alemán [2] está pregonando su hallazgo de una nueva partícula exótica con seis quarks, el mayor número de quarks jamás observado. El "dibaryon" (dibarión, dos bariones) se describe en un artículo en *Physical Review Letters* [3].

Si eres como este truco de Vulture South, el documento se lee como un medio muy seco de anunciar un descubrimiento trascendental. Por ejemplo: “Las distribuciones angulares  $A_y$

obtenidas se desvían sistemáticamente de la solución de onda parcial SAID SP07 NN actual. La incorporación de los nuevos datos de Ay en el análisis SAID produce un polo en las ondas  $3D^3 - 3G^3$  que respalda la hipótesis de resonancia  $d^*(2380)$ ".

Pero son las "ondas  $3D^3 - 3G^3$ " las que importan aquí (creemos), ya que indican la cantidad de quarks que observó el experimento.

El comunicado de prensa del Centro de Investigación de Jülich señala que este es un experimento de confirmación de los resultados observados por primera vez en 2011. Sin embargo, el experimento anterior no pudo ser replicado por otros investigadores, por lo que los operadores del acelerador COSY crearon un nuevo experimento que otros investigadores puede reproducirse.

"Las mediciones que realizamos en COSY en 2011 ya eran muy precisas. Pero como los experimentos no se podían repetir en ningún otro acelerador del mundo, tuvimos que idear otro experimento para verificar los resultados", explica el profesor Hans Ströher, director del Instituto de Física Nuclear (IKP-2) en Jülich.

El estado de quark más conocido en el universo es el estado bariónico: tres quarks destinados a formar protones (que duran para siempre), neutrones (que necesitan el cálido abrazo de un átomo para durar más de 15 minutos) y otros bariones que se desintegran en 10-10 segundos. Los mesones, que comprenden un quark y un antiquark, también tienen una vida corta ( $10^{-8}$ ) segundos (10 nanosegundos).

Los teóricos habían predicho estados de quarks superiores durante décadas: se atribuye a Freeman Dyson el primero en sugerirlo, en 1964, y el "tetraquark" que comprende dos quarks y dos antiquarks se ha inferido a partir de observaciones desde 2003.

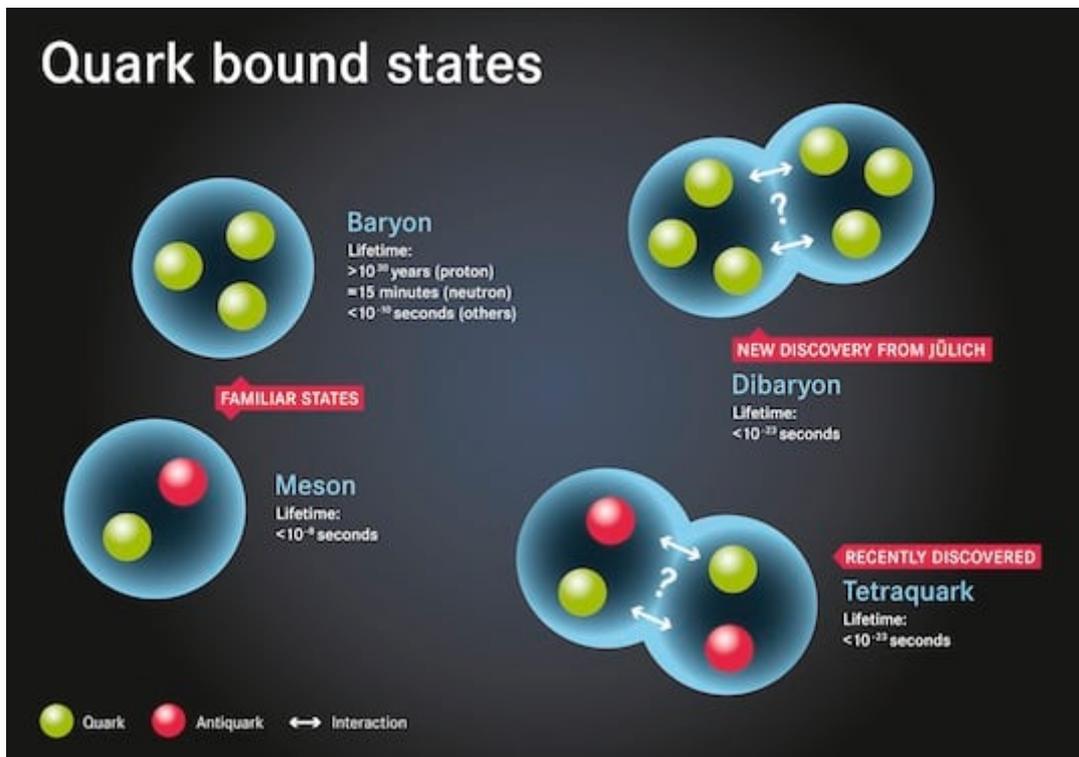
La nueva investigación de Jülich no observa el hexaquark directamente: más bien, el experimento observa los productos de descomposición de la partícula de corta duración.

En este experimento, denominado "dispersión elástica", los investigadores bombardearon un protón con deuterones. "El estado de enlace exótico formado durante la colisión influyó en el ángulo con el que las partículas se alejaron unas de otras después de la colisión, lo que permitió su identificación", afirma el comunicado del centro de investigación.

"Los hallazgos son parte de un panorama más amplio. Si esta partícula existe, entonces teóricamente se puede esperar toda una gama de otros estados exóticos", dice el profesor director de IKP-1 de Jülich, James Ritman.

El Reg señala que esta pieza de física de partículas exóticas no necesitaba el poder del Gran Colisionador de Hadrones del CERN: COSY es un sincrotrón de 184 metros que opera en el rango de potencia "media".

\*Footnote: Como en "No, solo un Zaphod Beeblebrox, ¿no escuchaste que vengo en paquetes de seis?"



**Figura 1.** Diferentes estados de la materia de quarks. Imagen: Centro de Investigación Jülich.

### La segunda pista: una simulación japonesa con superordenador

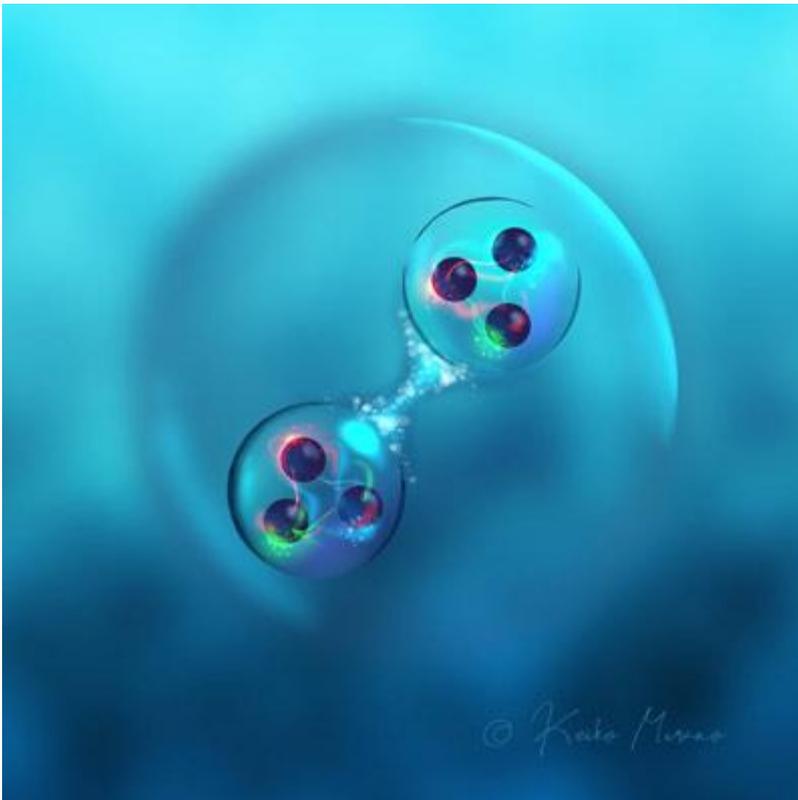
La existencia predicha de una partícula exótica compuesta por seis partículas elementales conocidas como quarks por los investigadores de RIKEN [5, 6] podría profundizar nuestra comprensión de cómo se combinan los quarks para formar los núcleos de los átomos.

Los quarks son los bloques de construcción fundamentales de la materia. Los núcleos de los átomos están formados por protones y neutrones, que a su vez están formados por tres quarks cada uno. Las partículas que consisten en tres quarks se conocen colectivamente como bariones.

Los científicos han reflexionado durante mucho tiempo sobre la existencia de sistemas que contengan dos bariones, que se conocen como dibariones. Solo existe un dibarión en la naturaleza: el deuterón, un núcleo de hidrógeno formado por un protón y un neutrón que están muy ligeramente unidos entre sí. Se han captado destellos de otros dibariones en experimentos de física nuclear, pero tuvieron existencias muy fugaces.

“Aunque el deuterón es el único dibarión estable conocido, pueden existir muchos más dibariones”, dice Takuya Sugiura del Programa Interdisciplinario de Ciencias Matemáticas y Teóricas RIKEN. "Es importante estudiar qué pares de bariones forman dibariones y cuáles no porque esto proporciona información valiosa sobre cómo los quarks forman la materia".

La cromodinámica cuántica es una teoría muy exitosa que describe cómo interactúan los quarks entre sí. Pero el fuerte acoplamiento que se produce entre los quarks en los bariones complica los cálculos de cromodinámica cuántica. Los cálculos se vuelven aún más complejos cuando se consideran los estados ligados de bariones como los dibariones.



**Figura 2.** Impresión de un artista de un estado de seis quarks recién predicho (dibaryon) que consta de dos bariones. © 2021 Keiko Murano.

“Aunque el deuterón es el único dibarión estable conocido, pueden existir muchos más dibariones”, dice Takuya Sugiura del Programa Interdisciplinario de Ciencias Matemáticas y Teóricas RIKEN. "Es importante estudiar qué pares de bariones forman dibariones y cuáles no porque esto proporciona información valiosa sobre cómo los quarks forman la materia".

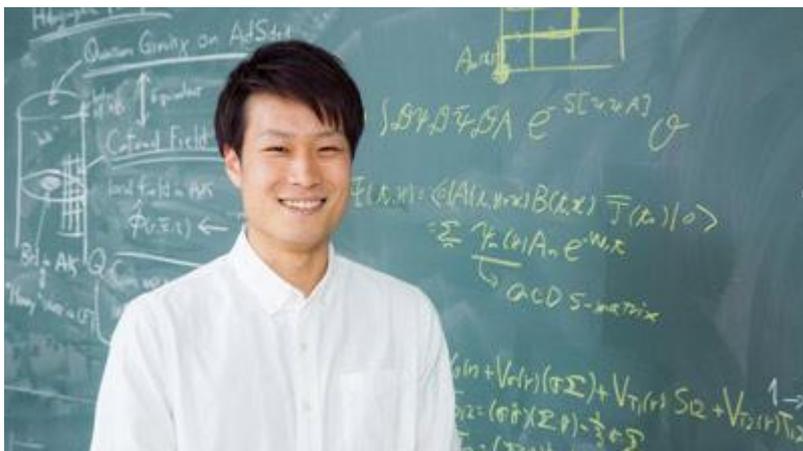
La cromodinámica cuántica es una teoría muy exitosa que describe cómo interactúan los quarks entre sí. Pero el fuerte acoplamiento que se produce entre los quarks en los bariones complica los cálculos de cromodinámica cuántica. Los cálculos se vuelven aún más complejos cuando se consideran los estados ligados de bariones como los dibariones.

Ahora, al calcular la fuerza que actúa entre dos bariones, cada uno de los cuales contiene tres quarks charm (uno de los seis tipos de quarks), Sugiura y sus colaboradores han predicho la existencia de un dibaryon al que llamaron charm di-Omega. Sería un estado cuántico molecular de seis quarks, hexaquark (o sexaquark),  $\Omega_{ccc}\Omega_{ccc} = (cccccc) = \sigma(5670)$ .

Para este cálculo, el equipo resolvió la cromodinámica cuántica con cálculos numéricos a gran escala. Dado que los cálculos involucraban una gran cantidad de variables, utilizaron dos poderosas supercomputadoras: la computadora K y la supercomputadora HOKUSAI. “Fuimos extremadamente afortunados de haber tenido acceso a las supercomputadoras, que redujeron drásticamente el costo y el tiempo para realizar los cálculos”, dice Sugiura. “Pero aun así nos llevó varios años predecir la existencia del charm di-Omega”.

A pesar de la complejidad de los cálculos, el charm di-Omega es el sistema más simple para estudiar interacciones entre bariones. Sugiura y su equipo ahora están estudiando otros hadrones

encantados utilizando la supercomputadora Fugaku, que es la sucesora más poderosa de la computadora K. “Estamos especialmente interesados en las interacciones entre otras partículas que contienen quarks encantados”, dice Sugiura. “Esperamos arrojar luz sobre el misterio de cómo se combinan los quarks para formar partículas y qué tipo de partículas pueden existir”.



**Figura 3.** Takuya Sugiura y sus compañeros de trabajo han predicho la existencia de un dibaryon formado por seis quarks charm. © 2021 RIKEN.

### Los hexaquarks, ¿candidatos a materia oscura?

Algo en el Universo existe que tiene más masa de la que podemos detectar directamente. Sabemos que está allí por su efecto gravitacional sobre las cosas que podemos detectar; pero no sabemos qué es, o cómo llegó aquí.

A esa masa invisible la llamamos "materia oscura", y los físicos acaban de identificar una partícula que podría estar detrás de ella.

El candidato culpable es una partícula subatómica recientemente descubierta llamada hexaquark d-star. Y en la oscuridad primordial que siguió al Big Bang, podría haberse unido para crear materia oscura.

Durante casi un siglo, la materia oscura ha dejado perplejos a los astrónomos. Se notó por primera vez en los movimientos verticales de las estrellas, lo que insinuaba que había más masa a su alrededor de lo que podíamos ver.

Ahora también podemos ver el efecto de la materia oscura en otras dinámicas: en lentes gravitacionales, por ejemplo, en las que la luz se curva alrededor de objetos masivos como cúmulos de galaxias; y la rotación exterior de los discos galácticos, que es demasiado rápida para ser explicada por la masa visible.

Hasta ahora, la materia oscura ha resultado imposible de detectar directamente, ya que no absorbe, emite ni refleja ningún tipo de radiación electromagnética. Pero su efecto gravitatorio es fuerte, tan fuerte que hasta el 85 por ciento de la materia de nuestro Universo podría ser materia oscura.

Sin embargo, a los científicos les gustaría mucho llegar al fondo del misterio de la materia oscura. No es solo porque son muy entrometidos: descubrir qué es la materia oscura podría decirnos mucho sobre cómo se formó nuestro Universo y cómo funciona.

Si la materia oscura en realidad no existe, eso significaría que algo anda muy mal con el modelo estándar de física de partículas que usamos para describir y comprender el Universo.

A lo largo de los años se han presentado varios candidatos a la materia oscura, pero todavía no parece que estemos mucho más cerca de encontrar una respuesta. Aquí es donde el hexaquark estrella-d, más formalmente,  $d^*(2380)$ , entra en escena.

"El origen de la materia oscura en el Universo es una de las preguntas más importantes de la ciencia y, hasta ahora, ha quedado en blanco", explicó el físico nuclear Daniel Watts de la Universidad de York en el Reino Unido.

"Nuestros primeros cálculos indican que los condensados de estrellas d son un nuevo candidato factible para la materia oscura. Este nuevo resultado es particularmente emocionante ya que no requiere ningún concepto que sea nuevo para la física".

Los quarks son partículas fundamentales que normalmente se combinan en grupos de tres para formar protones y neutrones. En conjunto, estas partículas de tres quarks se denominan bariones, y la mayor parte de la materia observable en el Universo está formada por ellas. Eres bariónico. Así es el Sol. Y los planetas, y el polvo espacial.

Cuando seis quarks se combinan, esto crea un tipo de partícula llamada dibarión o hexaquark. En realidad, no hemos observado muchos de estos en absoluto. El hexaquark d-star, descrito en 2014, fue la primera detección no trivial.

Los hexaquarks de estrella D son interesantes porque son bosones, un tipo de partícula que obedece a las estadísticas de Bose-Einstein, un marco para describir cómo se comportan las partículas. En este caso, significa que la colección de hexaquarks de estrella d puede formar algo llamado condensado de Bose-Einstein.

También conocido como el quinto estado de la materia, estos condensados se forman cuando un gas de baja densidad de bosones se enfría justo por encima del cero absoluto. En esa etapa, los átomos en el gas pasan de su movimiento regular y sacudidas a estar completamente quietos, el estado cuántico más bajo posible.

Si tal gas de hexaquarks de estrellas d estuviera flotando en el Universo primitivo mientras se enfriaba tras el Big Bang, según el modelo del equipo, podría unirse para formar condensados de Bose-Einstein. Y esos condensados podrían ser lo que ahora llamamos materia oscura.

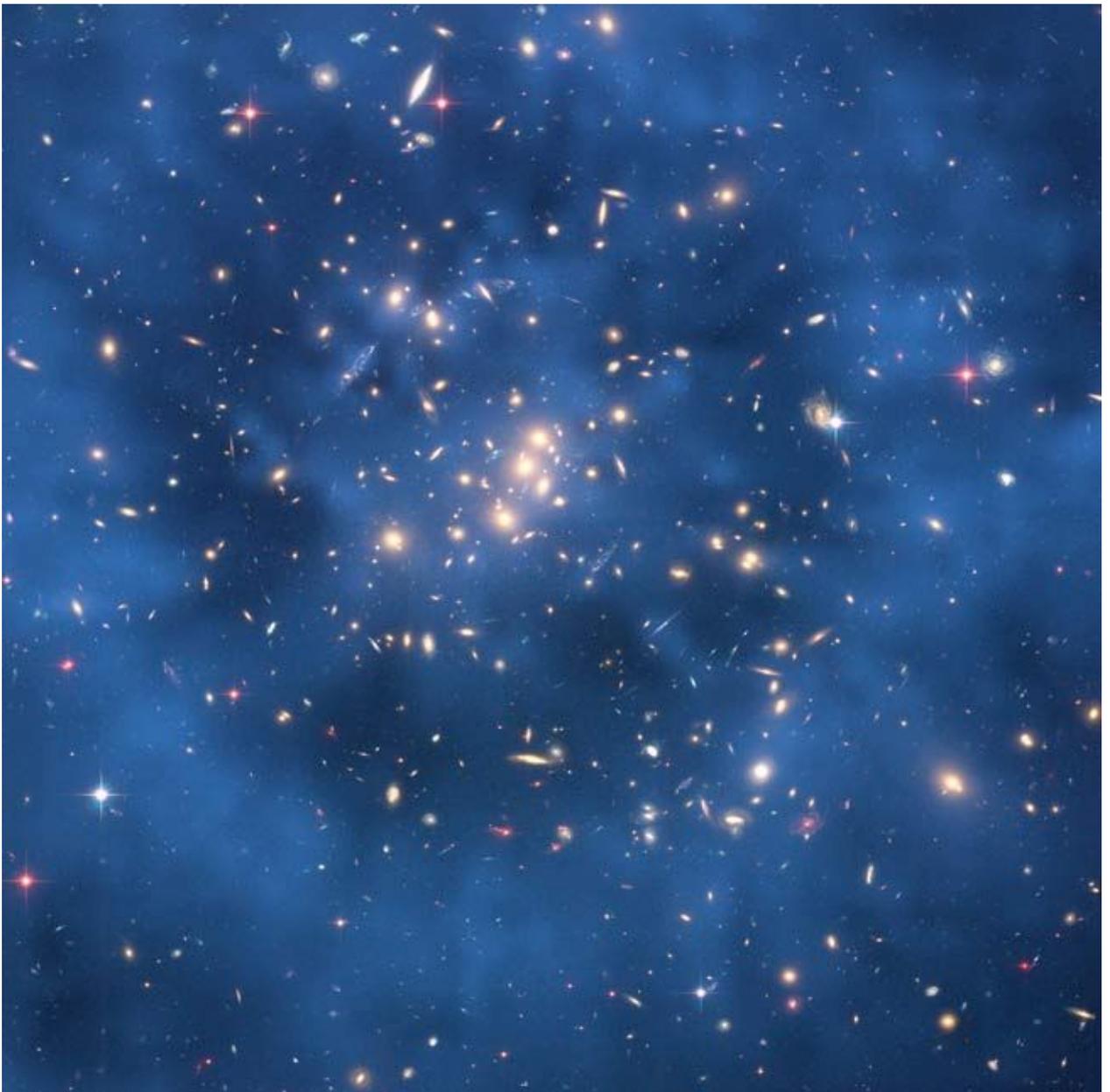
Obviamente, todo esto es muy teórico, pero cuantos más candidatos a materia oscura encontremos, y confirmemos o descartemos, más cerca estaremos de identificar qué es la materia oscura. ¿Y no te mueres por saberlo?

Entonces, hay más trabajo por hacer aquí. El equipo planea buscar hexaquarks de estrella D en el espacio y probar su trabajo actual para ver si pueden romperlo. También planean realizar más trabajos en el laboratorio con hexaquarks de estrella D.

"El próximo paso para establecer este nuevo candidato a materia oscura será obtener una mejor comprensión de cómo interactúan las estrellas d: cuándo se atraen y cuándo se repelen entre sí", dijo el físico de la Universidad de York Mikhail Bashkanov.

"Estamos liderando nuevas mediciones para crear estrellas D dentro de un núcleo atómico y ver si sus propiedades son diferentes a cuando están en el espacio libre".

La investigación ha sido publicada en [7], [8].



**Figura 4.** Un anillo fantasmal de materia oscura flotando en el cúmulo de galaxias ZwCl0024+1652, una de las pruebas más sólidas hasta la fecha de la existencia de materia oscura.

Los astrónomos creen que el anillo de materia oscura se produjo a partir de una colisión entre dos cúmulos gigantes. (Crédito de la imagen: ESA/Hubble)

Los investigadores creen que una partícula subatómica recién identificada pudo haber formado la materia oscura del universo (se abre en una pestaña nueva) justo después del Big Bang (se abre en una pestaña nueva), hace aproximadamente 13 800 millones de años.

Si bien los científicos han determinado que hasta el 27% de la materia en el universo podría ser materia oscura, todavía falta nuestra comprensión de lo que podría ser la misteriosa sustancia, ya que nadie la ha observado directamente.

Ahora, en un nuevo estudio, los físicos nucleares han sugerido que la materia oscura podría formarse a partir de una partícula recién identificada: el hexaquark d-star.

### **¿Qué es un hexaquark?**

La materia se puede descomponer en moléculas, que se pueden descomponer aún más en átomos e incluso más en las partículas subatómicas, protones y neutrones. Luego, cuando los descompones, obtienes quarks. Entonces, todo lo que hemos visto, tocado o probado en última instancia ha estado compuesto de quarks.

Mientras que los neutrones y los protones se componen cada uno de tres quarks, los hexaquarks se componen de seis. Su existencia se predijo durante décadas, y en 2014, los investigadores pudieron confirmar la existencia de los hexaquarks.

Aunque estas partículas exóticas están formadas por más quarks que protones, los hexaquarks son en realidad mucho más pequeños que las partículas más familiares. Los hexaquarks también se descomponen mucho más rápido que otras partículas subatómicas. Los hexaquarks también son un tipo de partícula de bosón, lo que significa que múltiples hexaquarks de estrella d pueden combinarse de maneras diferentes a como se combinan los protones y los neutrones.

Entonces, ¿cómo pueden estos diminutos hexaquarks ser la clave para comprender la materia oscura?

Como Mikhail, Bashkanov, investigador del departamento de física de la Universidad de York en el Reino Unido, le dijo a Space.com [8,9], los hexaquarks podrían haberse condensado en materia oscura en las extrañas condiciones inmediatamente después del Big Bang.

### **Hexaquarks, ¿condensados de Bose-Einstein?**

Inmediatamente después de ese evento, el universo era un mar de partículas subatómicas que se enfriaba, "una gran olla de sopa con quarks", dijo Bashkanov.

Bashkanov y el coautor, el profesor de la Universidad de York Daniel Watts, dijeron en este nuevo estudio que, durante este período súper temprano del universo, los hexaquarks de la estrella d podrían haberse enfriado y expandido en lo que se conoce como un condensado de Bose-Einstein (BEC, Bose-Einstein condensate).

Un BEC es un quinto estado exótico de la materia que se forma cuando una nube de átomos o partículas subatómicas se enfría a temperaturas cercanas al cero absoluto, ó 0 kelvin (menos 459,67 grados Fahrenheit, o menos 273,15 grados Celsius). A estas temperaturas extremas, las partículas (o átomos) se agrupan en una sola entidad que puede describirse mediante una función de onda. En otras palabras, las partículas se unen y se comportan como una sola partícula (o átomo).

Si bien los hexaquarks se descomponen rápidamente en un laboratorio, Bashkanov explicó que son mucho más estables y duraderos dentro de una estrella de neutrones y, según creen los investigadores, posiblemente también en un BEC.

Entonces, como explicó Bashkanov, los científicos creen que, poco después de que el universo comenzara con el Big Bang, los hexaquarks podrían haberse condensado en un BEC, y ese BEC único podría ser materia oscura.

"Nuestros primeros cálculos indican que los condensados de las estrellas d son un nuevo candidato factible para la materia oscura, y esta nueva posibilidad parece digna de una investigación más detallada", dijo Watts en un comunicado (se abre en una pestaña nueva). "El resultado es particularmente emocionante ya que no requiere ningún concepto que sea nuevo para la física".

Este trabajo inicial no ha resuelto definitivamente la cuestión de la materia oscura. Pero Watts y Bashkanov planean continuar estudiando los hexaquarks para comprender mejor las partículas extrañas y explorar más a fondo si realmente podrían ser buenos candidatos para la materia oscura.

Como explicó Bashkanov, los investigadores en el futuro realizarán experimentos para estudiar las propiedades de los hexaquarks, como su tamaño y cómo interactúan tanto con otros hexaquarks como con materia normal o nuclear (protones y neutrones dentro de un núcleo). Si bien los investigadores dijeron (como exploraron en este artículo) que los hexaquarks podrían condensarse en un BEC, esperan demostrar que esto es cierto a través de más estudios y experimentación.

### ***¿Es el "D-star Hexaquark" la partícula de materia oscura?***

Desde la década de 1960, los astrónomos han teorizado que toda la materia visible en el Universo (también conocida como bariónica o "materia luminosa") constituye solo una pequeña fracción de lo que realmente hay allí. Para que la teoría de la gravedad predominante y probada en el tiempo funcione (tal como la define la Relatividad General), los científicos han tenido que postular que aproximadamente el 85% de la masa en el Universo consiste en "Materia Oscura".

A pesar de muchas décadas de estudio, los científicos aún tienen que encontrar evidencia directa de la materia oscura y la partícula constituyente y sus orígenes siguen siendo un misterio. Sin embargo, un equipo de físicos de la Universidad de York en el Reino Unido ha propuesto una nueva partícula candidata que se descubrió recientemente. Conocido como el hexaquark d-star  $d^*$ , esta partícula podría haber formado la "Materia Oscura" en el Universo durante el Big Bang.

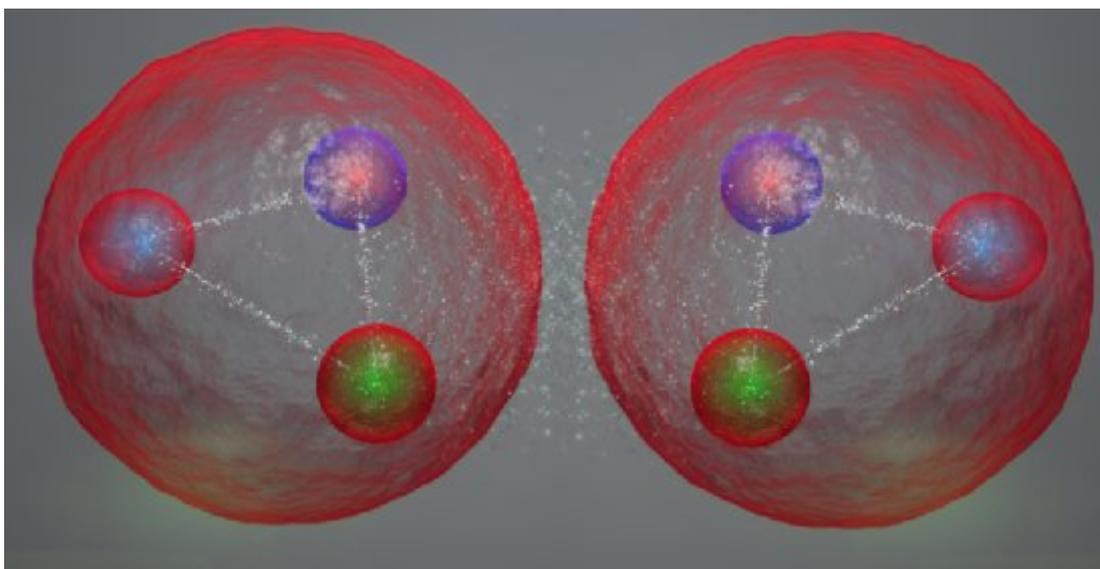
El equipo responsable estaba formado por el Dr. Mikhail Bashkanov y el profesor Daniel Watts del Departamento de Física de la Universidad de York, la pareja calculó las propiedades de los hexaquarks como un nuevo candidato potencial para la materia oscura.

El hexaquark es un ejemplo de un condensado de Bose-Einstein, un "quinto estado de la materia" especial que normalmente se forma cuando bajas densidades de partículas de bosones se enfrían hasta cerca del cero absoluto. Están compuestos por seis quarks, que generalmente se combinan de tres en tres para formar protones y neutrones, para crear una partícula de bosón. Esto significa que la presencia de múltiples estrellas  $d$  puede conducir a combinaciones que producirán otras cosas además de protones y neutrones.

Durante años, la existencia de los hexaquarks  $d$ -star fue meramente teórica hasta que los experimentos realizados en 2011 (y anunciados en 2014) indicaron la posible detección de la partícula. La detección tuvo lugar a un nivel de energía de 2380 MeV y duró solo una fracción de segundo ( $10^{-23}$  segundos). El grupo de investigación de York sugiere que estas son similares a las condiciones que habrían sido poco después del Big Bang.

En este momento, aventuran, muchos hexaquarks de tipo  $d^*$  podrían haberse agrupado a medida que el Universo se enfriaba y expandía para formar el "quinto estado de la materia". Como dijo el Prof. Watts en un reciente comunicado de prensa de la Universidad de York:

*“El origen de la materia oscura en el universo es una de las preguntas más importantes de la ciencia y una que, hasta ahora, se ha quedado en blanco. Nuestros primeros cálculos indican que los condensados de estrellas  $d$  son un nuevo candidato factible para la materia oscura y esta nueva posibilidad parece digna de una investigación más detallada. El resultado es particularmente emocionante ya que no requiere ningún concepto que sea nuevo para la física”.*

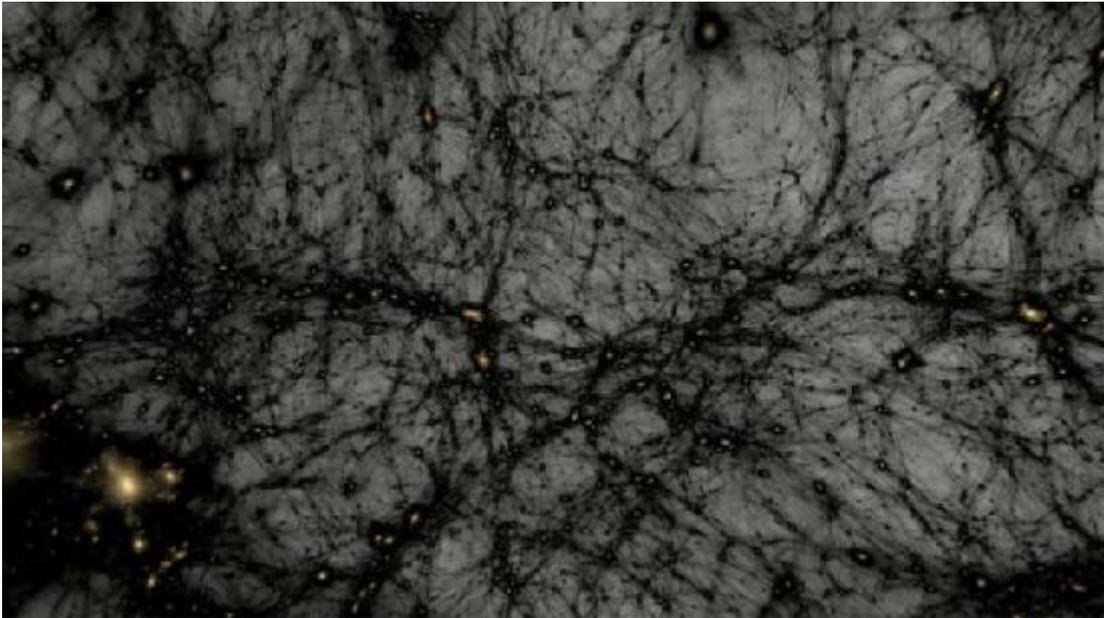


**Figura 5.** Impresión artística de dos bariones, compuestos de tres quarks cada uno, que se combinan para formar un hexaquark. Crédito: Universidad de Edimburgo.

Esencialmente, sus resultados indicaron que durante los primeros momentos después del Big Bang, a medida que el cosmos se enfriaba lentamente, los hexaquarks  $d^*$ (2830) estables podrían haberse formado junto con la materia bariónica. Es más, sus resultados indican que la tasa de producción de esta partícula habría sido suficiente para dar cuenta del 85% de la masa del Universo que se cree que es Materia Oscura.

Los investigadores ahora planean colaborar con científicos en Alemania y los EE. UU. para probar su teoría y buscar hexaquarks  $d^*$  en el Cosmos. Ya tienen en mente algunas posibles firmas astronómicas, que presentaron en su estudio reciente. Además, esperan crear estas partículas subatómicas en un entorno de laboratorio para ver si se comportan como se predijo. Todo esto será objeto de sus próximos estudios.

“El próximo paso para establecer este nuevo candidato a materia oscura será obtener una mejor comprensión de cómo interactúan las  $d^*$ : cuándo se atraen y cuándo se repelen entre sí”, dijo el Dr. Bashkanov. “Estamos liderando nuevas mediciones para crear  $d^*$  dentro de un núcleo atómico y ver si sus propiedades son diferentes a cuando están en el espacio libre”.



**Figura 6.** La web de materia oscura. Courtesy Ralf Kähler (KIPAC/SLAC/Stanford), simulation by Oliver Hahn & Tom Abel.

**Vídeo 1.** <https://www.youtube.com/watch?v=zEEg1XkbXDo> Imagen animada de cómo se forma dicha web de materia oscura. El experto en visualización de KIPAC Ralf Kaehler y su colega el astrofísico Tom Abel unieron fuerzas con Carter Emmart, director de astrovisualización del museo de historia, y Mordecai-Mark Mac Low, curador del museo y profesor de la Universidad de Columbia. Convirtieron simulaciones numéricas calculadas por Abel y el entonces astrofísico de KIPAC Oliver Hahn en escenas impactantes.

### **$d^*(2380)$ : ¿eterno sexaquark?**

Además de ser un personaje que suena genial, el sexaquark eventualmente podría explicar el misterio cada vez más enloquecedor de la materia oscura. Y los físicos han descubierto que si el sexaquark tiene una masa particular, la partícula podría vivir para siempre [11].

Casi todo lo que conoces y amas está hecho de pequeñas partículas conocidas como quarks. Hay seis de ellos, dados los nombres, por varias razones nerd, de arriba, abajo, arriba, abajo, extraño y encanto (y cima y fondo también). Las variedades up y down son las más ligeras del grupo, lo que las convierte en las más comunes con diferencia. (En física de partículas, cuanto más pesado eres, más probable es que te descompongas en cosas más pequeñas y estables).

Los protones y neutrones dentro de su cuerpo están compuestos por tríos de quarks; dos arriba y abajo hacen un protón, y dos abajo y arriba hacen un neutrón. De hecho, debido a la naturaleza complicada de la fuerza fuerte, los quarks realmente disfrutan estar en grupos de tres, y esa es también, con mucho, la configuración más estable y común.

Ocasionalmente, en nuestros colisionadores de partículas, creamos partículas, cada una de las cuales consta de un par de quarks; estos conglomerados son inestables y rápidamente se descomponen en otra cosa. A veces, cuando nos esforzamos mucho, podemos unir cinco quarks y hacer que jueguen bien entre sí, brevemente, antes de que ellos también se descompongan en otra cosa.

**Y hasta la fecha, esas son todas las combinaciones de quarks que hemos podido fabricar.**

**Sin embargo, puede haber algo más extraño.**

Después de décadas de hurgar en los rincones matemáticos de la fuerza nuclear fuerte, los físicos encontraron una extraña combinación que aún no ha aparecido en nuestros experimentos: una disposición de seis quarks, que consta de dos arriba, dos abajo y dos extraños: el sexaquark.

Las teorías no predicen una masa para el sexaquark, aunque hay pistas como en las simulaciones de los japoneses mencionadas antes; este valor dependería de la disposición precisa y la interacción de los quarks individuales dentro de esa partícula, por lo que depende de los físicos experimentales averiguarlo. ¿Y en cuanto a la estabilidad del sexaquark? Los cálculos sugieren que si su masa cae por debajo de cierto umbral, sería absolutamente estable para siempre, lo que significa que nunca se descompondría. Y si la masa es un poco más grande que eso, pero aún por debajo de cierto umbral, entonces la partícula se descompondrá, pero en escalas de tiempo tan largas que bien podría ser estable para siempre.

**Entonces, si es estable, ¿por qué nunca lo hemos visto?**

Curiosamente, el rango de masas estables para el sexaquark cae por debajo del umbral de lo que pueden crear muchos experimentos con colisionadores de partículas; estas herramientas fueron diseñadas para estudiar partículas mucho más raras, mucho más pesadas y mucho más fugaces. En otras palabras, el sexaquark puede estar escondido a simple vista, simplemente habiendo volado bajo el radar todos estos años.

Pero los colisionadores de partículas no son el único lugar para hacer sexaquarks. Los primeros momentos del Big Bang fueron un hervidero frenético de energías nucleares, con temperaturas y presiones lo suficientemente altas como para forjar helio e hidrógeno a partir de una sopa cruda de quarks. Y esa fragua también puede haber inundado nuestro cosmos con sexaquarks, junto con todos los caracteres subatómicos más familiares.

Los cálculos preliminares sugieren que si el sexaquark es algo real dentro del rango correcto de masas, podría haberse producido en una abundancia ridícula en el universo primitivo. Y podría haber sobrevivido a ese infierno juvenil. De hecho, los sexaquarks aún pueden existir, sin interactuar realmente con nada, sin descomponerse en nada más, simplemente existiendo, creando atracciones gravitacionales adicionales donde sea que se acumulen, debido a su masa.

¿Una partícula invisible que está inundando el universo y que interactúa solo a través de la gravedad? Bingo. Eso es materia oscura.

### **Una luz en la oscuridad: los sexy sexaquarks**

Para que el sexaquark forme materia oscura, tiene que existir realmente. Ese es actualmente un tema de debate, porque el objeto nunca ha sido visto en un experimento de colisionador de partículas. Pero como vimos antes, la masa relativamente ligera del sexaquark puede significar que ha pasado desapercibido, simplemente porque no lo hemos estado buscando.

Pero eso está empezando a cambiar. El detector BaBar del SLAC National Accelerator Laboratory en California es realmente bueno para producir muchas combinaciones de quarks, incluidas algunas realmente pesadas que se descomponen en arreglos más estables y razonables. BaBar también debería producir una gran cosecha de sexaquarks, si es que existen.

Un artículo publicado el 2 de enero en la base de datos arXiv [12] informó el último resultado: no hay señales del sexaquark. Pero ese hallazgo es seguro con un nivel de confianza de solo el 90%. Eso significa que si las combinaciones de quarks más masivas y menos estables se desintegran en sexaquarks estables, lo hacen muy raramente, a una tasa de solo 1 decaimiento en cada 10 millones.

¿Esto descarta al sexquark como candidato a materia oscura? No exactamente. Podría ser que las condiciones del universo primitivo permitieran que se hicieran suficientes sexaquarks como para explicar la cantidad de materia oscura que estimamos que hay en el universo. Pero el nuevo resultado dificulta el uso del sexaquark para explicar la materia oscura.

Buen intento, sexaquark, pero sin cigarro, al menos, no todavía. Las predicciones antiguas [13,14,15] de los hexaquarks, tendrán que esperar un poco más (¿quizás también veamos heptaquarks, octaquarks, nonaquarks,... en el futuro? Who knows?). ¿Veremos el hexaquark ( $uuddss$ )= $d^*(2380)$  antes que el dibarión hexaencantado  $\Omega$  ( $ccccc$ )= $S(5670)$ ?

### **Referencias**

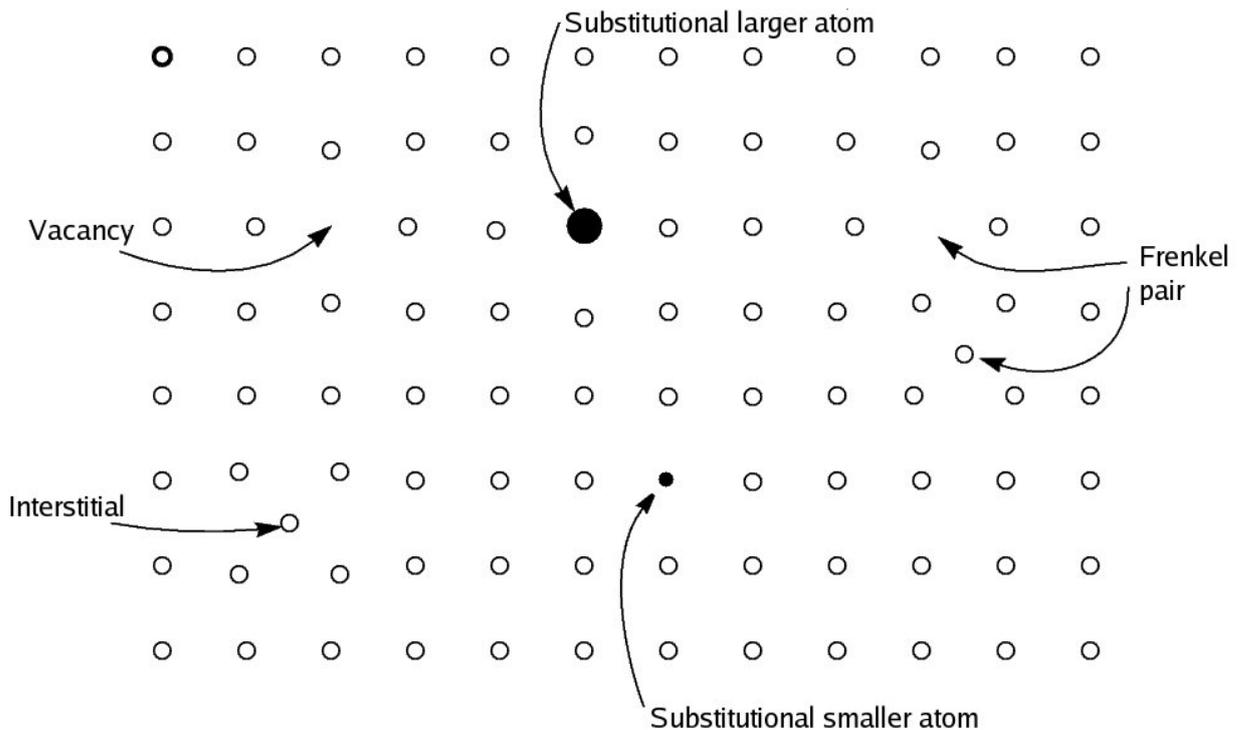
[1] Wikipedia, la Enciclopedia Libre: *Hexaquark*. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Hexaquark>  
Fundación Wikimedia.

[2] Richard Chirgwin. *Massive news in the micro-world: a hexaquark particle 'Didn't you hear, I come in six-packs?'* Tue 10 Jun 2014. URL: [https://www.theregister.com/AMP/2014/06/10/massive\\_news\\_in\\_the\\_microworld\\_a\\_hexaquark\\_particle/](https://www.theregister.com/AMP/2014/06/10/massive_news_in_the_microworld_a_hexaquark_particle/)

[3] Adlarson, P.; et al. (2014). "Evidence for a New Resonance from Polarized Neutron-Proton Scattering". *Physical Review Letters*. 112 (2): 202301. [arXiv:1402.6844](https://arxiv.org/abs/1402.6844). Bibcode:2014PhRvL.112t2301A. [doi:10.1103/PhysRevLett.112.202301](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.202301). S2CID 2280323

- [4] G. R. Farrar, talk given in the Quy Nhon Workshop, Vietnam, July 4, 2019. *Stable Sexaquark: Dark Matter predictions, constraints and lab detection*. URL: [http://vietnam.in2p3.fr/2019/longlived/transparencies/03\\_thursday/01\\_morning/01\\_farrar.pdf](http://vietnam.in2p3.fr/2019/longlived/transparencies/03_thursday/01_morning/01_farrar.pdf)
- [5] Dec. 10, 2021 Research Highlight Physics / Astronomy, RIKEN laboratory news. *Exotic six-quark particle predicted by supercomputers: A new particle predicted by supercomputers could shed light on how matter is formed*. URL: [https://www.riken.jp/en/news\\_pubs/research\\_news/rr/20211210\\_1/index.html](https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/rr/20211210_1/index.html)
- [6] Lyu, Y., Tong, H., Sugiura, T., Aoki, S., Doi, T., Hatsuda, T., Meng, J. & Miyamoto, T. *Dibaryon with highest charm number near unitarity from lattice QCD*. ArXiv: <https://arxiv.org/abs/2102.00181> .Physical Review Letters 127 072003 (2021). doi: [10.1103/PhysRevLett.127.072003](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.127.072003)
- [7] Bashkanov, M. (2020). "A new possibility for light-quark dark matter". Journal of Physics G. 47 (3): 03LT01. arXiv:2001.08654. doi:10.1088/1361-6471/ab67e8. S2CID 210861179
- [8] *Physicists Think We Might Have a New, Exciting Dark Matter Candidate*, Space04 March 2020 By Michelle Starr. URL: <https://www.sciencealert.com/d-star-hexaquark-particles-could-be-responsible-for-creating-dark-matter>
- [9] *Did this newfound particle form the universe's dark matter?* By Chelsea Gohd last updated March 06, 2020 para la revista Space.com. URL: <https://www.space.com/hexaquarks-big-bang-form-universe-dark-matter.html#xenforo-comments-29764>  
Say hello to the d-star hexaquark  $d^*(2380)$ !
- [10] Posted on March 11, 2020 by Matt Williams. Universe Today magazine, *Is the "D-star Hexaquark" the Dark Matter Particle?* <https://www.universetoday.com/145345/is-the-d-star-hexaquark-the-dark-matter-particle/>
- [11] *Oddball sexaquark particles could be immortal, if they exist at all: These supremely stable particles could explain dark matter.*, revista online livescience.com By Paul Sutter published February 04, 2020. URL: <https://www.livescience.com/sexquarks-could-explain-dark-matter.html>
- [12] Romulus Godang, *Search for Dark Matter in Upsilon Decays at BABAR Experiment*, arXiv: <https://arxiv.org/pdf/2001.00600.pdf>
- [13] Jaffe, R. L. (1977). "Perhaps a Stable Dihyperon?" (PDF). Physical Review Letters. 38 (5): 195–198. doi:10.1103/PhysRevLett.38.195. OSTI 1446298
- [14] Ambartsumyan, V. A.; Saakyan, G. S. (1960). "The Degenerate Superdense Gas of Elementary Particles". Soviet Astronomy. 37: 193.
- [15] Kagiya, S.; Nakamura, A.; Omodaka, T. (1992). "Compressible bag model and dibaryon stars". Zeitschrift für Physik C. 56 (4): 557–560.
- [16] K. Azizi, S. S. Agaev, H. Sundu. *The Scalar Hexaquark uuddss: a Candidate to Dark Matter?* ArXiv: <https://arxiv.org/abs/1904.09913>

## 42. ¡Sorpresa!: Compuestos no estequiométricos.



**Figura 1.** Origen del fenómeno del título en los defectos cristalográficos. Se muestra un corte bidimensional a través de un sistema de cristal cúbico primitivo que muestra la matriz cuadrada regular de átomos en una cara (círculos abiertos, o), y con estos, lugares donde faltan átomos de un sitio regular para crear vacantes, desplazados a un espacio aceptable adyacente para crear un par de Frenkel, o sustituido por un átomo más pequeño o más grande que normalmente no se ve (círculos cerrados, •), lo que da como resultado en cada caso un material que se mueve para ser mediblemente no estequiométrico.



**Figura 2.** Pirrotita, ejemplo de compuesto inorgánico no estequiométrico, de fórmula  $S$  ( $x = 0$  a  $0,2$ ).

En química, los compuestos no estequiométricos son compuestos químicos, casi siempre compuestos inorgánicos sólidos, que tienen una composición elemental cuyas proporciones no pueden representarse mediante una relación de números naturales pequeños (es decir, una fórmula empírica); la mayoría de las veces, en tales materiales, falta un pequeño porcentaje de átomos o demasiados átomos están empaquetados en un trabajo de celosía perfecto.

Contrariamente a las definiciones anteriores, la comprensión moderna de los compuestos no estequiométricos los considera homogéneos y no mezclas de compuestos químicos estequiométricos. Dado que los sólidos son en general eléctricamente neutros, el defecto se compensa con un cambio en la carga de otros átomos en el sólido, ya sea cambiando su estado de oxidación, o reemplazándolos con átomos de diferentes elementos con diferente carga. Muchos óxidos y sulfuros metálicos tienen ejemplos no estequiométricos; por ejemplo, el óxido de hierro (II) estequiométrico, que es raro, tiene fórmula  $\text{FeO}$ , mientras que el material más común no es estequiométrico, con la fórmula rara (aparentemente prohibida por la hipótesis atómica)  $\text{Fe}_{0.95}\text{O}$ . El tipo de defectos de equilibrio en compuestos no estequiométricos puede variar con la variación concomitante en las propiedades a granel del material. [1] Los compuestos no estequiométricos también exhiben propiedades eléctricas o químicas especiales debido a los defectos; por ejemplo, cuando faltan átomos, los electrones pueden moverse a través del sólido más rápidamente. Los compuestos no estequiométricos tienen aplicaciones en materiales cerámicos y superconductores y en diseños de sistemas electroquímicos (es decir, baterías).

### **Óxidos de hierro**

La no estequiometría es omnipresente para los óxidos metálicos, especialmente cuando el metal no está en su estado de oxidación más alto.  $\text{Fe}_{0.95}\text{O}$ . La no estequiometría refleja la facilidad de oxidación de  $\text{Fe}^{2+}$  a  $\text{Fe}^{3+}$  reemplazando efectivamente una pequeña porción de  $\text{Fe}^{2+}$  con dos tercios de su número de  $\text{Fe}^{3+}$ . Así, por cada tres iones  $\text{Fe}^{2+}$  "faltantes", el cristal contiene dos iones  $\text{Fe}^{3+}$  para equilibrar la carga. La composición de un compuesto no estequiométrico generalmente varía de manera continua en un rango estrecho. Por lo tanto, la fórmula de la wüstita se escribe como  $\text{Fe}_{1-x}\text{O}$ , donde  $x$  es un número pequeño (0,05 en el ejemplo anterior) que representa la desviación de la fórmula "ideal". [3] La no estequiometría es especialmente importante en polímeros tridimensionales sólidos que pueden tolerar errores. Hasta cierto punto, la entropía hace que todos los sólidos sean no estequiométricos. Pero para fines prácticos, el término describe materiales donde la no estequiometría es medible, generalmente al menos el 1% de la composición ideal.

### **Sulfuros de hierro**

Los monosulfuros de los metales de transición a menudo no son estequiométricos. El más conocido quizás sea nominalmente el sulfuro de hierro (II) (el mineral pirrotita) con una composición  $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$  ( $x = 0$  a  $0,2$ ). El raro extremo estequiométrico de  $\text{FeS}$  se conoce como mineral troilita. La pirrotita es notable porque tiene numerosos polimorfos, es decir, formas cristalinas que difieren en simetría (monoclínica o hexagonal) y composición ( $\text{Fe}_7\text{S}_8$ ,  $\text{Fe}_9\text{S}_{10}$ , y otras). Estos materiales son siempre deficientes en hierro debido a la presencia de defectos de red, a saber, vacantes de hierro. A pesar de esos defectos, la composición suele expresarse como una relación de números grandes y la simetría de los cristales es relativamente alta. Esto significa que las vacantes de hierro no están dispersas al azar sobre el cristal, sino que forman ciertas configuraciones regulares. Esas vacantes afectan fuertemente las propiedades magnéticas de la pirrotita: el magnetismo aumenta con la concentración de vacantes y está ausente para el  $\text{FeS}$  estequiométrico.

## Hidruros de paladio

El hidruro de paladio es un material no estequiométrico de composición aproximada  $PdH_x$  ( $0,02 < x < 0,58$ ). Este sólido conduce hidrógeno en virtud de la movilidad de los átomos de hidrógeno dentro del sólido.

## Óxidos de tungsteno

A veces es difícil determinar si un material no es estequiométrico o si la fórmula se representa mejor con números grandes. Los óxidos de tungsteno ilustran esta situación. Partiendo del material idealizado trióxido de tungsteno, se pueden generar una serie de materiales relacionados que son ligeramente deficientes en oxígeno. Estas especies deficientes en oxígeno pueden describirse como  $W_nO_{3n-2}$ , pero en realidad son especies estequiométricas con celdas unitarias grandes con las fórmulas  $W_nO_{3n-2}$ , donde  $n = 20, 24, 25, 40$ . Por lo tanto, la última especie puede describirse con la fórmula estequiométrica, mientras que la descripción no estequiométrica implica una distribución más aleatoria de vacantes de óxido.

## Otros casos

A altas temperaturas ( $1000^\circ\text{C}$ ), los sulfuros de titanio presentan una serie de compuestos no estequiométricos.[2]

El polímero de coordinación azul de Prusia, nominalmente  $Fe_7$  y sus análogos son bien conocidos por formarse en proporciones no estequiométricas.[5] Las fases no estequiométricas muestran propiedades útiles en relación con su capacidad para unir iones de talio. También los compuestos superconductores de tipo boro o clatratos como  $MgB_2$ ,  $MgB_3C_3$  y otros similares, son de tipo no estequiométrico (se deja como ejercicio para el lector intentar cocinar las valencias o estados de oxidación del boro en estos dos últimos compuestos).

## Aplicaciones

### 1. Catálisis de oxidación

Muchos compuestos útiles se producen por reacciones de hidrocarburos con oxígeno, una conversión que es catalizada por óxidos metálicos. El proceso opera a través de la transferencia de oxígeno "red" al sustrato de hidrocarburo, un paso que genera temporalmente una vacante (o defecto). En un paso posterior, el oxígeno que falta se repone con  $O_2$ . Dichos catalizadores se basan en la capacidad del óxido metálico para formar fases que no son estequiométricas.[6] Una secuencia análoga de eventos describe otros tipos de reacciones de transferencia de átomos, incluidas la hidrogenación y la hidrodesulfuración catalizadas por catalizadores sólidos. Estas

consideraciones también resaltan el hecho de que la estequiometría está determinada por el interior de los cristales: las superficies de los cristales a menudo no siguen la estequiometría del volumen. Las estructuras complejas en las superficies se describen con el término "reconstrucción de la superficie".

## 2. Conducción de iones

La migración de átomos dentro de un sólido está fuertemente influenciada por los defectos asociados con la no estequiometría. Estos sitios defectuosos proporcionan vías para que los átomos y los iones migren a través del denso conjunto de átomos que forman los cristales. Los sensores de oxígeno y las baterías de estado sólido son dos aplicaciones que dependen de las vacantes de óxido. Un ejemplo es el sensor basado en dióxido de cerio en los sistemas de escape de automóviles. A bajas presiones parciales de  $O_2$ , el sensor permite la introducción de más aire para lograr una combustión más completa.[6]

## 3. Superconductividad y superconductores cupratos o clatratos.

Muchos superconductores no son estequiométricos. Por ejemplo, el óxido de itrio, bario y cobre, posiblemente el superconductor de alta temperatura más notable, es un sólido no estequiométrico con la fórmula  $Y_xBa_2Cu_3O_{7-x}$ . La temperatura crítica del superconductor depende del valor exacto de  $x$ . La especie estequiométrica tiene  $x = 0$ , pero este valor puede llegar a 1.[6] También los superconductores clatratos tipo  $MgB_2$  y  $MgB_3C_3$  tienen propiedades no estequiométricas[9].

### Notas históricas

Fue principalmente a través del trabajo de Nikolai Semenovich Kurnakov y sus alumnos que se demostró que la oposición de Berthollet a la ley de Proust tenía mérito para muchos compuestos sólidos. Kurnakov dividió los compuestos no estequiométricos en bertólidos y daltónidos dependiendo de si sus propiedades mostraban un comportamiento monótono con respecto a la composición o no. El término berthollida (bertólidos) fue aceptado por la IUPAC en 1960 en contraposición a los compuestos daltónidos (o atómicos con fórmulas con números enteros solamente).[7] Los nombres provienen de Claude Louis Berthollet y John Dalton, respectivamente, quienes en el siglo XIX defendieron teorías rivales sobre la composición de las sustancias. Aunque Dalton "ganó" en su mayor parte, más tarde se reconoció que la ley de proporciones definidas tenía importantes excepciones.[8]

Para una introducción a estos exóticos compuestos que no se comentan habitualmente, véase [10],[11],[12].

### Referencias

[1] Geng, Hua Y.; et al. (2012). "Anomalies in nonstoichiometric uranium dioxide induced by a pseudo phase transition of point defects". *Phys. Rev. B*. 85 (14): 144111. [arXiv:1204.4607](https://arxiv.org/abs/1204.4607)

[2] N. N. Greenwood & A. Earnshaw, 2012, "Chemistry of the Elements," 2nd Edn., Amsterdam, NH, NLD:Elsevier, ISBN 0080501095.

[3] Lesley E. Smart (2005). *Solid State Chemistry: An Introduction*, 3rd edition. CRC Press. p. 214. ISBN 978-0-7487-7516-3.

[4] Hubert Lloyd Barnes (1997). *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. John Wiley and Sons. pp. 382–390. ISBN 978-0-471-57144-5.

[5] *Metal-Organic and Organic Molecular Magnets Peter Day*, Alan E Underhill Royal Society of Chemistry, 2007, ISBN 1847551394, ISBN 9781847551399

[6] Atkins, P. W.; Overton, T. L.; Rourke, J. P.; Weller, M. T.; Armstrong, F. A., 2010, Shriver and Atkins' *Inorganic Chemistry* 5th Edn., pp. 65, 75, 99f, 268, 271, 277, 287, 356, 409, Oxford, OXF, GBR: Oxford University Press, ISBN 0199236178

[7] *The Rare Earth Trifluorides, Part 2*, Arxius de les Seccions de Ciències Dmitrii N. Khitarov, Boris Pavlovich Sobolev, Irina V. Alexeeva, Institut d'Estudis Catalans, 2000, p75ff. ISBN 847283610X, ISBN 9788472836105

[8] Henry Marshall Leicester (1971). *The Historical Background of Chemistry*. Courier Dover Publications. p. 153. ISBN 9780486610535

[9] Nisha Geng, Katerina P. Hilleke, Li Zhu, Xiaoyu Wang, Timothy A. Strobel, Eva Zurek. *Conventional high-temperature superconductivity in metallic, covalently bonded, binary-guest C-B clathrates*. ArXiv: <https://arxiv.org/abs/2210.05042>

[10] F. Albert Cotton, Geoffrey Wilkinson, Carlos A. Murillo & Manfred Bochmann, 1999, *Advanced Inorganic Chemistry*, 6th Edn., pp. 202, 271, 316, 777, 888. 897, and 1145, New York, NY, USA: Wiley-Interscience, ISBN 0471199575, see [3], accessed 8 July 2015.

[11] Roland Ward, 1963, *Nonstoichiometric Compounds*, Advances in Chemistry series, Vol. 39, Washington, DC, USA: American Chemical Society, ISBN 9780841222076, DOI 10.1021/ba-1964-0039, see [4], accessed 8 July 2015.

[12] J. S. Anderson, 1963, "Current problems in nonstoichiometry (Ch. 1)," in *Nonstoichiometric Compounds* (Roland Ward, Ed.), pp. 1–22, Advances in Chemistry series, Vol. 39, Washington, DC, USA: American Chemical Society, ISBN 9780841222076, DOI 10.1021/ba-1964-0039.ch001, see [5], accessed 8 July 2015.

Artículo editado y traducido por Juan F. González.

**43. ¡Feliz 2023! 2023: curiosidades matemáticas**

Curiosidades sobre el número 2023 (no exhaustivas, si alguien sabe alguna más, que me escriba y las agrego):

$$7 \times 17^2 = 2023$$

2023: MMXXIII

Binario: 2023=11111100111

Octal: 3747

Hexadecimal: 7e7

Descomposición bonita:  $5^2+6^2+7^2+8^2+4^2=5^2+7^2+10^2+4^2=2023$

Descomposición bonita(II):  $2^3+5^3+6^3+7^3+11^3=2023$

Descomposición bonita(III):  $2023=(2+0+2+3)(2^2+0^2+2^2+3^2)^2$

Descomposición bonita(IV):  $2023=-1^3+2^3+3^3+4^3+5^3+6^3+7^3+8^3+9^3$

Aritmética modular:  $2023=7^7 \pmod{7!}$

Número de divisores: 6.

Lista de divisores de 2023: 1, 7, 17, 119, 289, 2023

Base-36: 1K7

2023 es un número de Harshad. Un número de Harshad (también llamado número de Niven) es aquel que es divisible por la suma de sus dígitos. Un ejemplo común es el número del diablo 666, que es divisible entre  $6+6+6=18$ .

El número de dígitos de 2023 es 4. La suma de los dígitos de 2023 es 7:  $2+0+2+3=7$ .

En base 11 es un número planodrómico.

2023 es un número odioso, porque la suma de sus dígitos binarios es impar.

La suma de sus factores primos es 41 (o 24 contando solo los distintos).

El producto de sus dígitos (distintos de cero) es 12, mientras que la suma es 7.

La raíz cuadrada de 2023 es aproximadamente 44.9777722881. La raíz cúbica de 2023 es aproximadamente 12.6473235080.

Sumando a 2023 su reverso (3202), obtenemos un palíndromo (5225).

Se puede dividir en dos partes, la 202 y la 3, que multiplicadas juntas dan un palíndromo (606).

La ortografía de 2023 en palabras es "dos mil veintitrés", y por lo tanto es un número iban. Un se llama iban si su nombre (en inglés) no contiene la letra "i".

2023 es un número duffiniano (Richard Duffy quien los presentó). Son aquellos números compuestos que no tienen factores primos en común con la suma de sus divisores.

Feliz año nuevo 2023, to everyone and everywhere!

Artículo escrito por J. F. G.

#### **Apéndice: 2023 en diferentes bases**

Binario 11111100111

Ternario 2202221

Cuaternario 133213

Quinario 31043

Senario 13211

Octal 3747

Decimal 2023

Duodecimal 1207

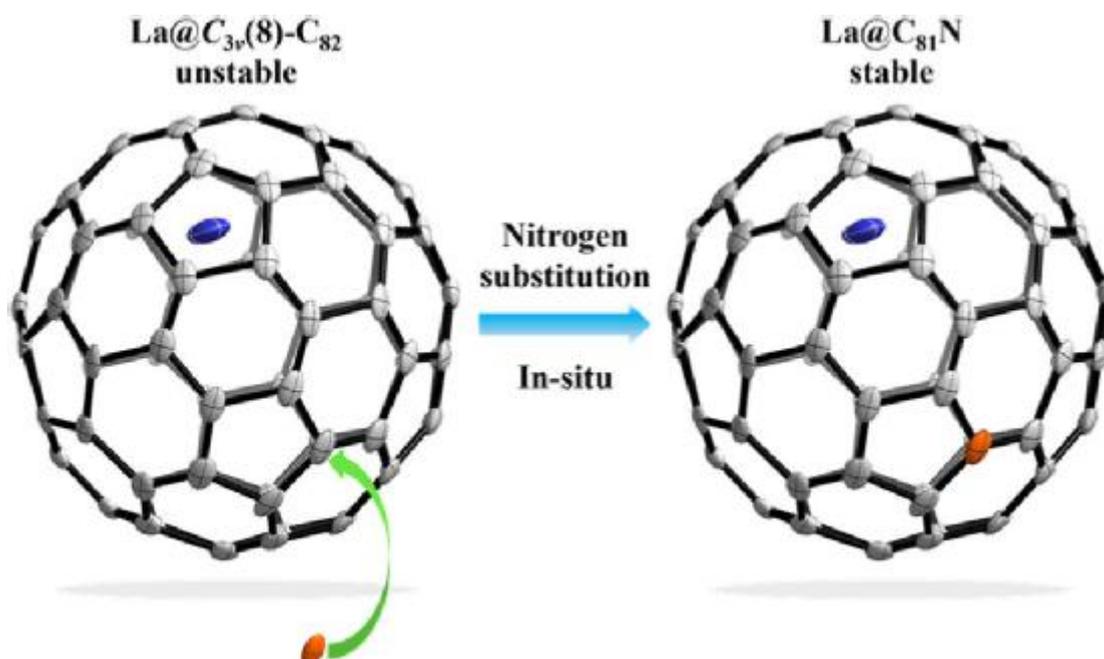
Hexadecimal 7e7

Vigesimal 513

Base36 1k7

2023 es el año 17:17 expresado en base 118 (Cl-Cl).

## **44. Azafullerenos.**



**Figura 1.** Sustitución de átomos de carbono por nitrógeno en la jaula de carbono  $La@C_{3v(8)}-C_{82}$ . Crédito: XIANG Wenhao et al.

Recientemente, un equipo de investigación dirigido por el Prof. Yang Shangfeng de la Universidad de Ciencias y Tecnología de China (USTC) de la Academia de Ciencias de China (CAS) sintetizó por primera vez  $La@N$ , un tipo de azafullereno endoédrico monometálico (MEAF, de Monometallic Endohedral AzaFullerene, en inglés), proporcionando una nueva forma de modular las propiedades electrónicas de los fullerenos endoédricos metálicos a través de modificaciones esqueléticas de la jaula de carbono. Su trabajo fue publicado en Journal of the American Chemical Society.

Los azafullerenos se crean cuando los átomos de carbono de la jaula se reemplazan por átomos de nitrógeno. Los azafullerenos difieren de los fullerenos tanto en sus estructuras electrónicas como en sus propiedades fisicoquímicas. Además de las modificaciones esqueléticas y exoédricas, los fullerenos también se pueden modificar endoédricamente mediante la encapsulación de átomos metálicos o no metálicos, exhibiendo propiedades únicas como el magnetismo de una sola molécula.

Por lo tanto, para combinar las ventajas de ambos tipos de fullerenos, los investigadores han intentado modificar la jaula de los metalofullerenos endoédricos para obtener MEAF. Aunque investigaciones anteriores han detectado MEAF ionizado,  $[La@N]^+$ , en fase gaseosa, nunca se ha sintetizado MEAF prístino.

Basándose en trabajos anteriores sobre la síntesis y el aislamiento de nuevos heterofullerenos de baja estabilidad, el equipo del profesor Yang sintetizó MEAF  $La@N$ , prístino mediante un método de descarga de arco DC de Krätschmer-Huffman modificado y aisló  $La@N$  mediante una cromatografía líquida de alto rendimiento en 4 pasos (HPLC, High Performing Liquid Chromatography).

Para verificar que la jaula de carbono es un azafullereno, caracterizaron la estructura molecular de  $La@N$  mediante difracción de rayos X monocristalinos y confirmaron que la jaula de carbono se derivaba de (8) con un átomo de carbono reemplazado por un átomo de nitrógeno.

Además, el equipo estudió sistemáticamente las propiedades electrónicas de  $La@N$  mediante espectroscopia ESR (Electron paramagnetic resonance (EPR) or electron spin resonance (ESR)[4]), espectroscopia UV-vis-NIR (UltraVioleta-visible-InfraRojo cercano) y electroquímica. También realizaron cálculos DFT (Density Functional Theory [5]) para identificar el posible sitio de sustitución de nitrógeno. Los resultados mostraron que  $La@N$  existe en forma de monómero estable con un estado electrónico de capa cerrada, drásticamente diferente del estado electrónico de capa abierta de  $La@(8)$ . Por lo tanto, la modificación esquelética de la jaula de carbono del fullereno podría regular las propiedades electrónicas de los fullerenos endoédricos metálicos.

Este trabajo abordó el desafío de dos décadas de sintetizar y aislar MEAF prístino. Como comentaron los revisores, "este resultado es muy interesante y útil para comprender las propiedades únicas de los azafullerenos".

Los fullerenos ya han hecho su aparición antes en Física, Química o incluso Astroquímica, véase por ejemplo [3] y la referencias que contiene.

## Referencias

[1] *Monometallic endohedral azafullerene synthesized for first time*, by University of Science and Technology of China para phys.org news. URL: <https://phys.org/news/2023-01-monometallic-endohedral-azafullerene.html>

[2] Wenhao Xiang et al., *Monometallic Endohedral Azafullerene*, Journal of the American Chemical Society (2022). DOI: [10.1021/jacs.2c08679](https://doi.org/10.1021/jacs.2c08679)

[3] Juan F. González, *C<sub>60</sub> from Outer space*, disponible gratis en la URL: [https://www.academia.edu/36837744/C\\_60\\_from\\_the\\_Outer\\_Space](https://www.academia.edu/36837744/C_60_from_the_Outer_Space)

[4] *Electron paramagnetic resonance*, Wikipedia-La Enciclopedia libre. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Electron\\_paramagnetic\\_resonance](https://en.wikipedia.org/wiki/Electron_paramagnetic_resonance)

[5] *Density functional theory*, Wikipedia-La Enciclopedia libre. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Density\\_functional\\_theory](https://en.wikipedia.org/wiki/Density_functional_theory)

Artículo traducido, editado, completado y clarificado por Juan F. González.

## 45. Grafullerita y grafullereno.

*Nueva forma (alótopo) de carbono recién descubierta. Presentamos el grafullereno, el primo 'superatómico' del grafeno*

*por Ellen Neff, Iniciativa Cuántica de la Universidad de Columbia*



**Figura 1.** Grafullereno: fullereno dopado con magnesio. Crédito: Nicoletta Barolini, Universidad de Columbia

El carbono en sus innumerables formas ha cautivado durante mucho tiempo a la comunidad científica. Además de ser el componente principal de toda la vida orgánica en la tierra, las formas materiales de carbono se han ganado una buena cantidad de avances. En 1996, el Premio Nobel de Química fue para los descubridores del fullereno, una estructura simétrica superatómica de 60 átomos de carbono con forma de balón de fútbol; En 2010, los investigadores que trabajaban con una versión de carbono ultraresistente y delgada como un átomo, conocida como grafeno, ganaron el Premio Nobel de Física.

Hoy, en un trabajo publicado en Nature, los investigadores dirigidos por los químicos de Columbia Xavier Roy, Colin Nuckolls y Michael Steigerwald con el posdoctorado y primera autora Elena Meirzadeh han descubierto una nueva versión de carbono que se encuentra en algún lugar entre el fullereno y el grafeno: el grafullereno. Es una nueva forma bidimensional de carbono compuesta por capas de fullerenos enlazados desprendidos en escamas ultrafinas de un cristal de grafullerita más grande, al igual que el grafeno se despega de los cristales de grafito (el mismo material que se encuentra en los lápices).

"Es sorprendente encontrar una nueva forma de carbono en el año 2022", dijo Nuckolls. "También te hace darte cuenta de que hay toda una familia de materiales que se pueden fabricar de manera similar y que tendrán propiedades nuevas e inusuales como consecuencia de la información escrita en los bloques de construcción superatómicos".

Meirzadeh, quien sintetizó los primeros cristales de grafullerita, se refirió al grafullereno como el "primo" superatómico del grafeno. A diferencia del grafeno y la mayoría de los otros materiales bidimensionales que están hechos de elementos repetitivos que se limitan a geometrías de enlace específicas y, como resultado, tienen propiedades específicas, la estructura superatómica del grafullereno lo hace increíblemente modular, explicó. Con 60 átomos de carbono en la bola para trabajar, los fullerenos teóricamente se pueden unir entre sí de varias maneras diferentes, cada una de las cuales podría producir diferentes propiedades electrónicas, magnéticas y ópticas; esta primera versión representa solo una configuración posible, dijo Roy.

Es una nueva forma de pensar sobre las estructuras y sus propiedades a medida que crecen, agregó Steigerwald. "Durante más de 30 años, los investigadores han tenido la idea de que los grupos de átomos se comportarán de manera diferente a los sólidos más grandes que forman", dijo. "Aquí, estamos haciendo un sólido a partir de un superátomo de carbono existente para ver cómo ese tipo de organización influirá en sus propiedades. ¿Se comportaría el nuevo material como fullereno o como algo más?"

El equipo se propuso unir moléculas de fullerenos en lugar de átomos de carbono individuales en un cristal pelable en capas, para estudiar sus propiedades superatómicas en dos dimensiones. Meirzadeh usó una técnica de síntesis de estado sólido a alta temperatura que involucraba un andamio de magnesio que luego se eliminó, un proceso que involucraba ácido que, después de un año de trabajo con cristales sensibles al aire dentro de una guantera, fue un paso final ligeramente estresante. "Como químicos, probamos cosas y no siempre sabemos qué sucederá. Pensé que se desmoronaría, pero permaneció intacto", recordó. "Ver un cristal de carbono puro e intacto que luego pudimos exfoliar y estudiar fácilmente fue una gran sorpresa".

Una vez que se hizo el nuevo material, Meirzadeh envió muestras a colaboradores en Columbia y más allá para la caracterización y la imagen inicial. La batería de pruebas reveló una serie de intrigantes propiedades eléctricas, ópticas y térmicas. Al igual que el grafeno, el grafullereno puede confinar y polarizar la luz, puede aceptar muchos electrones adicionales y puede formar estructuras de superredes sintonizables; estas propiedades lo convierten en un material prometedor con aplicaciones potenciales en nuevos tipos de dispositivos ópticos y electrónicos. En comparación con los fullerenos, los cristales de grafullerita tienen una conductividad térmica mucho más alta, como resultado de los fuertes enlaces covalentes dentro de cada hoja de grafullereno. La conductividad térmica ayuda a disipar el calor, una consideración importante al construir dispositivos.

El trabajo es un punto de partida para que el equipo explore el potencial del grafullereno. Desde una perspectiva química, planean modificar y ajustar sus propiedades modulares e introducir nuevas estructuras, mientras que los colaboradores observarán más de cerca lo que sucede cuando las láminas de grafullereno se combinan con diferentes tipos de materiales bidimensionales estudiados en Columbia para ver qué otros secretos del carbono oculta

"Los descubrimientos tanto del grafeno como de los fullerenos fueron increíblemente impactantes", dijo Roy. Los fullerenos, por ejemplo, se utilizan para construir células fotovoltaicas orgánicas y en medicina como agentes de contraste para imágenes de resonancia magnética y rayos X y para administrar terapias farmacológicas. El grafeno descubierto más recientemente, un material extremadamente ligero pero fuerte con numerosas propiedades únicas, se está explorando

activamente para usos potenciales en electrónica, aplicaciones energéticas y más. "Ahora los hemos combinado en esta nueva forma de carbono. No sabemos exactamente qué resultará de este trabajo, pero será muy emocionante explorarlo", dijo.

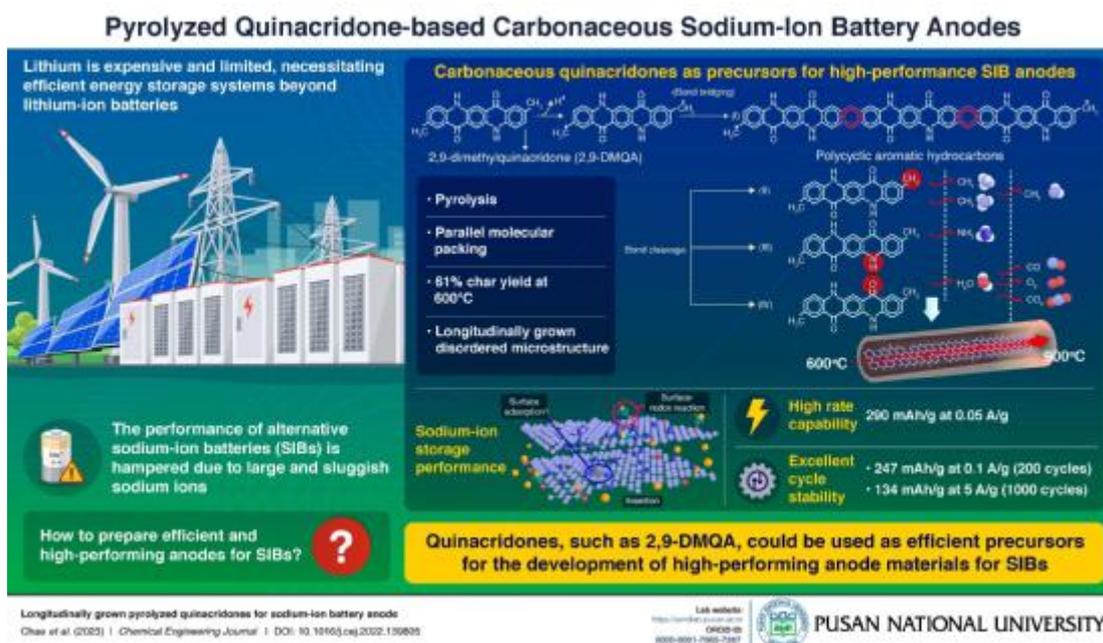
## Referencias

[1] January 5, 2023, Phys.org news, Ellen Neff, Columbia University Quantum Initiative, *Newly discovered form of carbon is graphene's 'superatomic' cousin*. URL: <https://phys.org/news/2023-01-newly-carbon-graphene-superatomic-cousin.html>

[2] Elena Meirzadeh et al., *A few-layer covalent network of fullerenes*, Nature (2023). DOI: [10.1038/s41586-022-05401-w](https://doi.org/10.1038/s41586-022-05401-w)

Artículo editado, traducido y clarificado por Juan F. González.

## 46. Baterías de ión de sodio: un nuevo reto para la sostenibilidad.



**Figura 1.** Investigadores de la Universidad Nacional de Pusan desarrollan un ánodo de batería de iones de sodio eficiente para el almacenamiento de energía. Crédito: Universidad Nacional de Pusan. URL: <https://phys.org/news/2023-01-efficient-sodium-ion-battery-anode-energy.html>

El cambio climático es una gran preocupación mundial. La reducción de las emisiones de carbono mediante el uso de fuentes de energía renovables y el desarrollo de sistemas eficientes de almacenamiento de energía se ha convertido en una prioridad. Las baterías de iones de litio tienen una alta densidad de energía y un ciclo de vida prolongado, lo que las hace indispensables en la electrónica portátil y en los vehículos eléctricos. Sin embargo, el alto costo y el suministro limitado de litio requieren el desarrollo de sistemas alternativos de almacenamiento de energía. Con este

fin, los investigadores han sugerido las baterías de iones de sodio (SIB, Sodium Ion Batteries) como un posible candidato.

Además de tener propiedades fisicoquímicas similares a las del litio, el sodio es sostenible y rentable. Sin embargo, sus iones son grandes y tienen una cinética de difusión lenta, lo que dificulta su alojamiento dentro de las microestructuras de carbono de los ánodos de grafito comercializados. En consecuencia, los ánodos SIB sufren inestabilidad estructural y un bajo rendimiento de almacenamiento. En este sentido, los materiales carbonosos dopados con heteroátomos se muestran prometedores. Sin embargo, su preparación es complicada, costosa y requiere mucho tiempo.

Recientemente, un equipo de investigadores, dirigido por el profesor Seung Geol Lee de la Universidad Nacional de Pusan en Corea, utilizó quinacridonas como precursores para preparar ánodos SIB carbonosos. "Los pigmentos orgánicos como las quinacridonas tienen una variedad de estructuras y grupos funcionales. Como resultado, desarrollan diferentes comportamientos de descomposición térmica y microestructuras. Cuando se usan como precursores de materiales de almacenamiento de energía, las quinacridonas pirolizadas pueden variar en gran medida el rendimiento de las baterías secundarias. Por lo tanto, es posible implementar una batería altamente eficiente mediante el control de la estructura del precursor de pigmentos orgánicos", explica el Prof. Lee.

Su estudio estuvo disponible en línea el 17 de octubre de 2022 y se publicará en el Chemical Engineering Journal el 1 de febrero de 2023.

Los investigadores se centraron en la 2,9-dimetilquinacridona (2,9-DMQA, o 2,9-dimethylquinacridone) en su estudio. El 2,9-DMQA tiene una configuración de empaquetamiento molecular paralelo. Tras la pirólisis (descomposición térmica) a 600°C, el 2,9-DMQA cambió de rojizo a negro con un alto rendimiento de carbón del 61%. A continuación, los investigadores realizaron un análisis experimental exhaustivo para describir el mecanismo de pirólisis subyacente.

Propusieron que la descomposición de los sustituyentes metilo genera radicales libres a 450 °C, que forman hidrocarburos aromáticos policíclicos con una microestructura de crecimiento longitudinal resultante de la formación de puentes de enlace a lo largo de la dirección de empaquetamiento paralela. Además, los grupos funcionales que contienen nitrógeno y oxígeno en 2,9-DMQA liberaron gases, creando dominios desordenados en la microestructura. Por el contrario, la quinacridona no sustituida pirolizada desarrolló estructuras altamente agregadas. Esto sugirió que el desarrollo morfológico se vio significativamente afectado por la orientación del cristal del precursor.

Además, el 2,9-DMQA pirolizado a 600°C exhibió una alta capacidad de velocidad (290 mAh/ga 0,05 A/g) y una excelente estabilidad de ciclo (134 mAh/ga 5 A/g durante 1000 ciclos) como SIB en ánodo. Los grupos que contienen nitrógeno y oxígeno mejoraron aún más el almacenamiento de la batería mediante el confinamiento de la superficie y el incremento de la distancia entre capas.

"Los pigmentos orgánicos como las quinacridonas se pueden utilizar como materiales de ánodo en baterías de iones de sodio. Dada la alta eficiencia, proporcionarán una estrategia eficaz para la

producción en masa de sistemas de almacenamiento de energía a gran escala", concluye el profesor Lee.

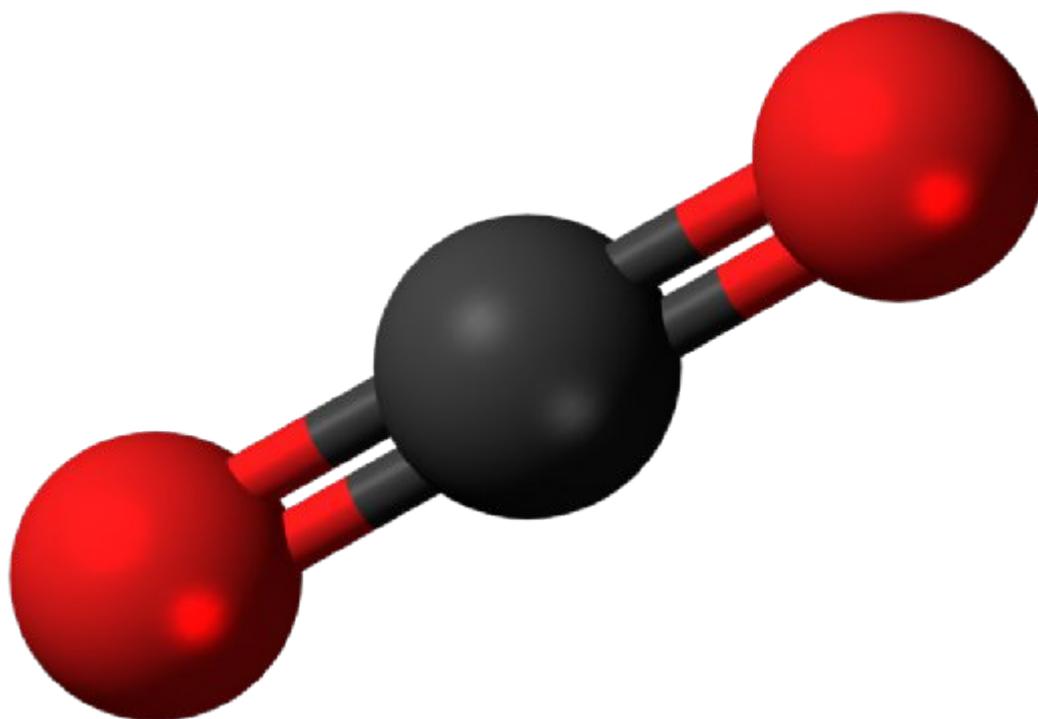
## Referencias

[1] Seongwook Chae et al, *Longitudinally grown pyrolyzed quinacridones for sodium-ion battery anode*, Chemical Engineering Journal (2022). DOI: [10.1016/j.cej.2022.139805](https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139805)

[2] Phys.org news, January 5, 2023, Pusan National University, *Researchers develop efficient sodium-ion battery anode for energy storage*. URL: <https://phys.org/news/2023-01-efficient-sodium-ion-battery-anode-energy.html>

Artículo editado, traducido y clarificado por Juan F. González.

## 47. Electroquímica: transformando el dióxido de carbono en algo útil.



**Figura 1.** Modelo gráfico de dióxido de carbono. Crédito: Wikipedia, la Enciclopedia Libre.

Una colaboración química ha dado lugar a una forma creativa de dar un buen uso, e incluso saludable, al dióxido de carbono: incorporándolo, a través de la electrosíntesis, en una serie de moléculas orgánicas que son vitales para el desarrollo farmacéutico.

En el proceso, el equipo de investigación hizo un descubrimiento innovador. Al cambiar el tipo de reactor electroquímico, podrían producir dos productos completamente diferentes, ambos útiles en química médica.

El artículo del equipo, "El reactor electroquímico dicta la selectividad del sitio en las carboxilaciones de N-heteroareno", publicado el 5 de enero en Nature. Los coautores principales del artículo son los investigadores postdoctorales Peng Yu y Wen Zhang, y Guo-Quan Sun de la Universidad de Sichuan en China.

El equipo de Cornell, dirigido por Song Lin, profesor de química y biología química en la Facultad de Artes y Ciencias, utilizó previamente el proceso de electroquímica para unir moléculas de carbono simples y formar compuestos complejos, eliminando la necesidad de metales preciosos u otros catalizadores. para promover la reacción química.

Para el nuevo proyecto, se fijaron en un objetivo más específico: la piridina, el segundo heterociclo más frecuente en los medicamentos aprobados por la FDA (La Administración de Alimentos y Medicamentos, FDA, por sus siglas en inglés Food and Drug Administration). Los heterociclos son compuestos orgánicos en los que los átomos de las moléculas están unidos en estructuras de anillos, al menos uno de los cuales no es carbono. Estas unidades estructurales se consideran "farmacóforos" por su frecuente presencia en compuestos medicinalmente activos. También se encuentran comúnmente en agroquímicos.

El objetivo de los investigadores era producir piridinas carboxiladas, es decir, piridinas con dióxido de carbono adjunto. La ventaja de introducir dióxido de carbono en un anillo de piridina es que puede cambiar la funcionalidad de una molécula y potencialmente ayudarla a unirse a ciertos objetivos, como las proteínas. Sin embargo, las dos moléculas no son socios naturales. La piridina es una molécula reactiva, mientras que el dióxido de carbono es generalmente inerte.

"Hay muy pocas formas de introducir directamente dióxido de carbono en una piridina", dijo Lin, coautor principal del artículo, junto con Da-Gang Yu de la Universidad de Sichuan. "Los métodos actuales tienen limitaciones muy severas".

El laboratorio de Lin combinó su experiencia en electroquímica con la especialización del grupo de Yu en la utilización de dióxido de carbono en síntesis orgánica, y pudieron crear con éxito piridinas carboxiladas.

"La electroquímica le brinda esa ventaja para marcar el potencial que es suficiente para activar incluso algunas de las moléculas más inertes", dijo Lin. "Así es como pudimos lograr esta reacción".

El descubrimiento fortuito del equipo surgió mientras realizaban la electrosíntesis. Los químicos normalmente ejecutan una reacción electroquímica en una de dos formas: en una celda electroquímica no dividida (en la que el ánodo y el cátodo que suministran la corriente eléctrica están en la misma solución) o en una celda electroquímica dividida (en la que el ánodo y el cátodo están separados por un divisor poroso que bloquea las moléculas orgánicas grandes pero permite el paso de los iones). Un enfoque puede ser más eficiente que el otro, pero ambos producen el mismo producto.

El grupo de Lin descubrió que al cambiar de una célula dividida a una no dividida, podían unir selectivamente la molécula de dióxido de carbono en diferentes posiciones del anillo de piridina,

creando dos productos diferentes: carboxilación C4 en la célula no dividida y carboxilación C5 en la célula dividida.

"Esta es la primera vez que descubrimos que simplemente cambiando la celda, lo que llamamos el reactor electroquímico, cambia completamente el producto", dijo Lin. "Creo que la comprensión mecanicista de por qué sucedió nos permitirá continuar aplicando la misma estrategia a otras moléculas, no solo a las piridinas, y tal vez hacer otras moléculas de esta manera selectiva pero controlada. Creo que ese es un principio general que se puede generalizar a otros sistemas".

Si bien la forma de utilización del dióxido de carbono del proyecto no resolverá el desafío global del cambio climático, dijo Lin, "es un pequeño paso hacia el uso del exceso de dióxido de carbono de una manera útil".

Los coautores incluyeron al investigador postdoctoral Yi Wang y al estudiante de doctorado Zhipeng Lu; e investigadores de la Universidad de Sichuan.

## Referencias

[1] Guo-Quan Sun et al., *Electrochemical reactor dictates site selectivity in N-heteroarene carboxylations*, Nature (2023). DOI: [10.1038/s41586-022-05667-0](https://doi.org/10.1038/s41586-022-05667-0)

[2] David Nutt, Cornell University, Phys.org news, 5 de Enero de 2023. *Electrochemistry converts carbon to useful molecules*. URL: <https://phys.org/news/2023-01-electrochemistry-carbon-molecules.html>

Artículo editado, traducido y clarificado por Juan F. González.

## Glosario

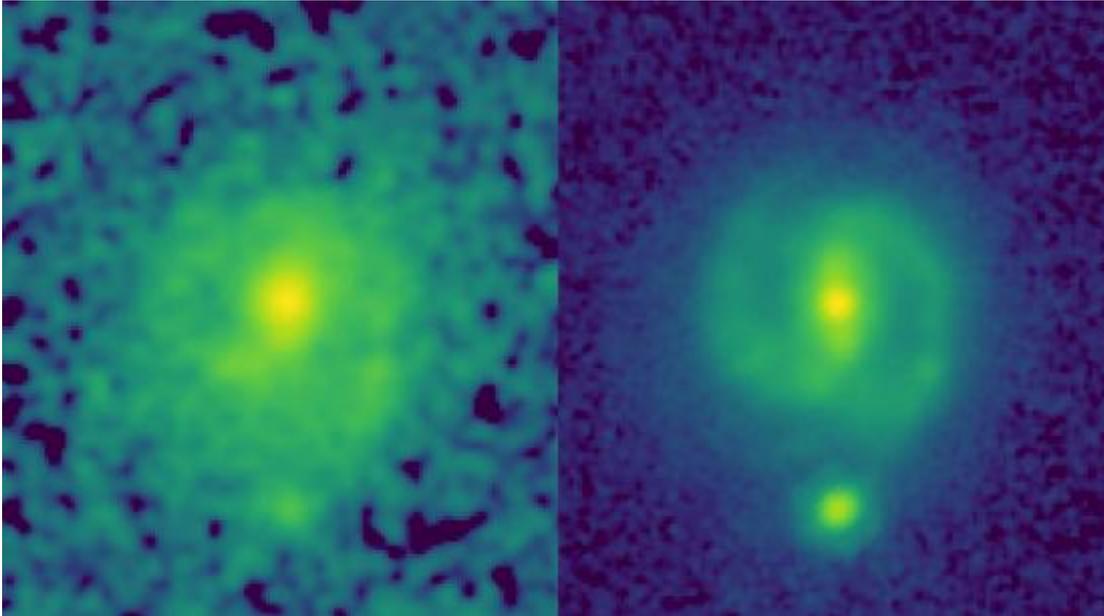
**Piridina:** La piridina (fórmula molecular  $C_5H_5N$ , masa molecular: 79,10 g/mol) es un líquido incoloro de olor desagradable, similar al pescado en mal estado.

**Heteroareno:** Los anillos aromáticos (e.g. aquellos que contienen nitrógeno) se pueden separar en anillos aromáticos básicos que se protonan fácilmente y forman cationes y sales aromáticos (p. ej., piridinio) y anillos aromáticos no básicos. El nombre general para compuestos en forma de anillo con incrustaciones de otros elementos es heteroareno.

**Carboxilo:** Radical –  $COOH$  –.

**Carbonilo:** Radical –  $CO$  –.

## 48. El James Webb halla galaxias espirales en el Universo primitivo.



**Figura 1.** El poder de JWST para mapear galaxias en alta resolución y en longitudes de onda infrarrojas más largas que el Hubble le permite mirar a través del polvo y revelar la estructura subyacente y la masa de galaxias distantes. Esto se puede ver en estas dos imágenes de la galaxia EGS23205, vista como era hace unos 11 mil millones de años. En la imagen del HST (Hubble Space Telescope, izquierda, tomada con el filtro de infrarrojo cercano), la galaxia es poco más que una mancha en forma de disco oscurecida por el polvo e impactada por el resplandor de las estrellas jóvenes, pero en la imagen correspondiente del infrarrojo medio del JWST (tomada el verano pasado), es una hermosa galaxia espiral con una barra estelar clara. Crédito: NASA/CEERS/Universidad de Texas en Austin.

Nuevas imágenes del Telescopio Espacial James Webb (JWST) de la NASA revelan por primera vez galaxias con barras estelares (características alargadas de estrellas que se extienden desde el centro de las galaxias hacia sus discos exteriores) en un momento en que el universo era solo el 25% de su presente. años. El hallazgo de las llamadas galaxias barradas, similares a nuestra Vía Láctea, tan temprano en el universo requerirá que los astrofísicos refinan sus teorías de la evolución de las galaxias.

Antes de JWST, las imágenes del telescopio espacial Hubble nunca habían detectado barras en épocas tan jóvenes. En una imagen del Hubble, una galaxia, EGS-23205, es poco más que una mancha en forma de disco, pero en la imagen correspondiente del JWST tomada el verano pasado, es una hermosa galaxia espiral con una barra estelar clara.

"Eché un vistazo a estos datos y dije: '¡Vamos a dejar todo lo demás!'", dijo Shardha Jogee, profesora de astronomía en la Universidad de Texas en Austin. "Las barras apenas visibles en los datos del Hubble simplemente aparecieron en la imagen del JWST, mostrando el tremendo poder del JWST para ver la estructura subyacente en las galaxias", dijo, describiendo los datos del

Cosmic Evolution Early Release Science Survey (CEERS), dirigido por Profesor de UT Austin, Steven Finkelstein.

El equipo identificó otra galaxia barrada, EGS-24268, también de hace unos 11 mil millones de años, lo que hace que dos galaxias barradas existan más atrás en el tiempo que cualquiera de las descubiertas anteriormente.

En un artículo aceptado para su publicación en *The Astrophysical Journal Letters*, destacan estas dos galaxias y muestran ejemplos de otras cuatro galaxias barradas de hace más de 8 mil millones de años.

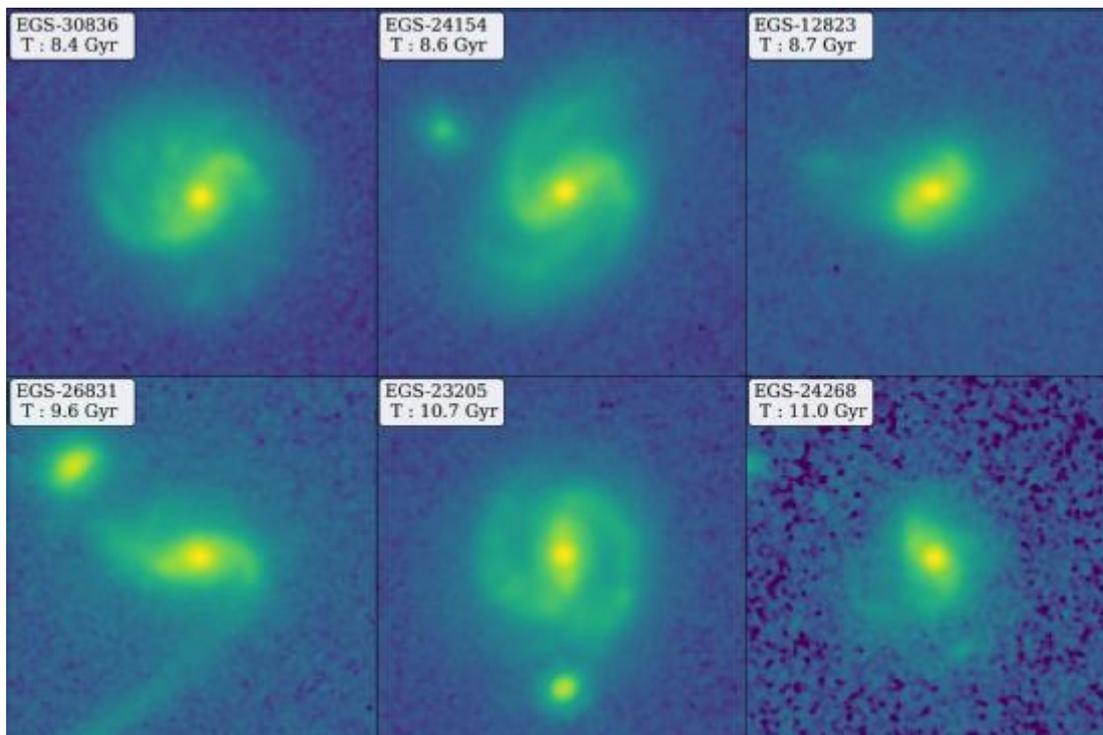
**Vídeo 1.** Esta simulación muestra cómo se forman las barras estelares (izquierda) y las entradas de gas impulsadas por las barras (derecha). Las barras estelares juegan un papel importante en la evolución de las galaxias al canalizar el gas hacia las regiones centrales de una galaxia, donde se convierte rápidamente en nuevas estrellas, a un ritmo típicamente de 10 a 100 veces más rápido que el del resto de la galaxia. Las barras también ayudan indirectamente a que crezcan agujeros negros supermasivos en los centros de las galaxias al canalizar el gas en parte del camino. Crédito: Francoise Combes, Observatorio de París. URL: <https://youtu.be/wpgzLNE02mA>

"Para este estudio, estamos buscando un nuevo régimen en el que nadie haya usado este tipo de datos o realizado este tipo de análisis cuantitativo antes", dijo Yuchen "Kay" Guo, un estudiante de posgrado que dirigió el análisis, "así que todo es nuevo. Es como adentrarse en un bosque en el que nadie ha entrado jamás".

Las barras juegan un papel importante en la evolución de las galaxias al canalizar gas hacia las regiones centrales, lo que impulsa la formación de estrellas.

"Las barras resuelven el problema de la cadena de suministro en las galaxias", dijo Jogee. "Al igual que necesitamos llevar materia prima desde el puerto a las fábricas del interior que fabrican nuevos productos, una barra transporta gas con fuerza a la región central, donde el gas se convierte rápidamente en nuevas estrellas a un ritmo típicamente de 10 a 100 veces más rápido que en el resto de la galaxia".

Las barras también ayudan a que crezcan agujeros negros supermasivos en los centros de las galaxias al canalizar el gas en parte del camino.



**Figura 2.** Montaje de imágenes del JWST que muestran seis ejemplos de galaxias barradas, dos de las cuales representan los tiempos retrospectivos más altos identificados y caracterizados cuantitativamente hasta la fecha. Las etiquetas en la parte superior izquierda de cada figura muestran el tiempo retrospectivo de cada galaxia, que va desde hace 8,4 a 11 mil millones de años (Gyr, de gigayear, gigaaño en español; mil millones de años es un gigaaño), cuando el universo tenía solo entre el 40% y el 20% de su edad actual. Crédito: NASA/CEERS/Universidad de Texas en Austin.

El descubrimiento de barras durante épocas tan tempranas sacude los escenarios de evolución de galaxias de varias maneras.

"Este descubrimiento de barras tempranas significa que los modelos de evolución de galaxias ahora tienen un nuevo camino a través de barras para acelerar la producción de nuevas estrellas en épocas tempranas", dijo Jogee.

Y la existencia misma de estas barras tempranas desafía los modelos teóricos, ya que necesitan obtener la física de la galaxia correcta para predecir la abundancia correcta de barras. El equipo probará diferentes modelos en sus próximos artículos.

El JWST puede revelar estructuras en galaxias distantes mejor que el Hubble por dos razones: en primer lugar, su espejo más grande le otorga una mayor capacidad de captación de luz, lo que le permite ver más lejos y con mayor resolución. En segundo lugar, puede ver mejor a través del polvo, ya que observa en longitudes de onda infrarrojas más largas que el Hubble.

Los estudiantes de pregrado Eden Wise y Zilei Chen jugaron un papel clave en la investigación al revisar visualmente cientos de galaxias, buscando aquellas que parecían tener barras, lo que ayudó a reducir la lista a unas pocas docenas para que los otros investigadores las analizaran con un enfoque matemático más intensivo. Acercarse.

## Referencias

[1] Yuchen Guo et al., *First Look at  $z > 1$  Bars in the Rest-Frame Near-Infrared with JWST Early CEERS Imaging*, arXiv (2022). DOI: [10.48550/arxiv.2210.08658](https://doi.org/10.48550/arxiv.2210.08658)

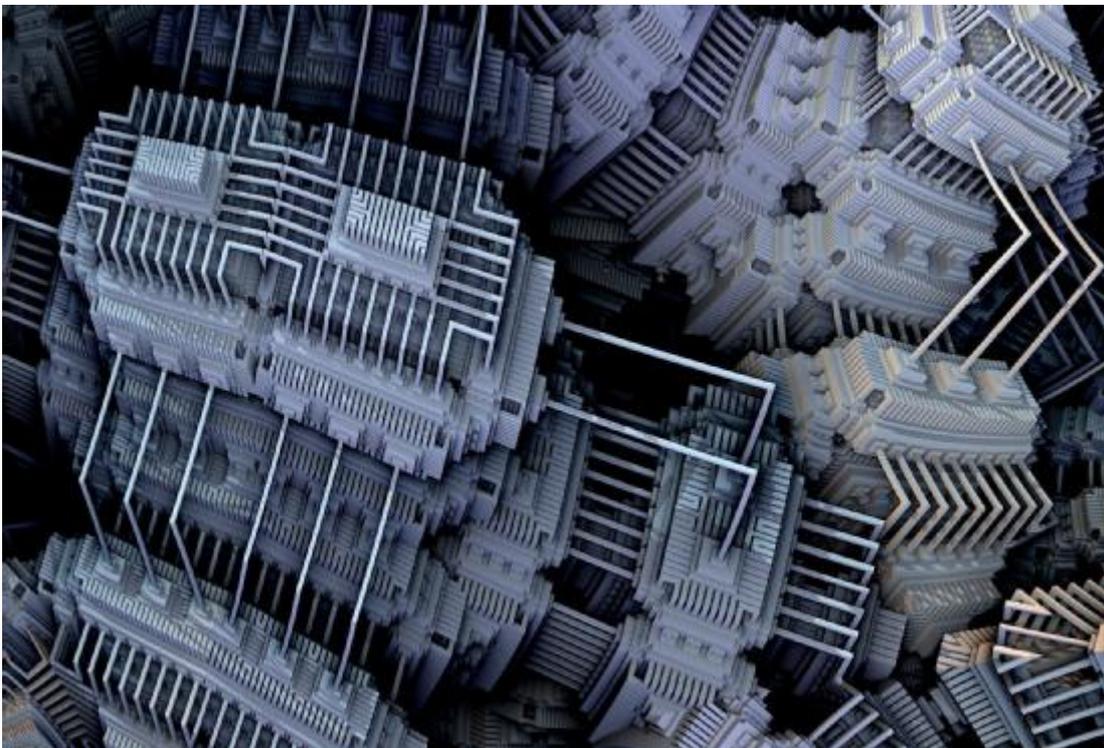
[2] Phys.org news, Universidad de Austin, Texas. *James Webb telescope reveals Milky Way–like galaxies in young universe*. URL: <https://phys.org/news/2023-01-james-webb-telescope-reveals-milky.html>

Artículo editado y traducido por Juan F. González.

## 49. Nueva arquitectura para computación cuántica.

*Una nueva arquitectura de computación cuántica podría usarse para conectar dispositivos a gran escala*

por Adam Zewe, Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT).



**Figura 1.** Imagen artística de microarquitectura de ordenadores en stacks/capas. Credit: CC0 Public Domain. Créditos: CC0 Dominio Público.

Las computadoras cuánticas prometen realizar ciertas tareas que son intratables incluso en las supercomputadoras más poderosas del mundo. En el futuro, los científicos anticipan el uso de la computación cuántica para emular sistemas de materiales, simular la química cuántica y optimizar

tareas difíciles, con impactos que pueden abarcar desde las finanzas hasta los productos farmacéuticos.

Sin embargo, cumplir esta promesa requiere un hardware resistente y extensible. Un desafío en la construcción de una computadora cuántica a gran escala es que los investigadores deben encontrar una forma efectiva de interconectar los nodos de información cuántica: nodos de procesamiento a menor escala separados en un chip de computadora. Debido a que las computadoras cuánticas son fundamentalmente diferentes de las computadoras clásicas, las técnicas convencionales utilizadas para comunicar información electrónica no se traducen directamente en dispositivos cuánticos. Sin embargo, un requisito es seguro: ya sea a través de una interconexión clásica o cuántica, la información transportada debe transmitirse y recibirse.

Con este fin, los investigadores del MIT han desarrollado una arquitectura de computación cuántica que permitirá una comunicación extensible y de alta fidelidad entre los procesadores cuánticos superconductores. En un trabajo publicado en Nature Physics [1], los investigadores del MIT demuestran el primer paso, la emisión determinista de fotones individuales (portadores de información) en una dirección especificada por el usuario. Su método asegura que la información cuántica fluya en la dirección correcta más del 96 por ciento del tiempo.

La vinculación de varios de estos módulos permite una red más grande de procesadores cuánticos que están interconectados entre sí, sin importar su separación física en un chip de computadora.

"Las interconexiones cuánticas son un paso crucial hacia las implementaciones modulares de máquinas a gran escala construidas a partir de componentes individuales más pequeños", dice Bharath Kannan Ph.D. '22, coautor principal de un artículo de investigación que describe esta técnica.

"La capacidad de comunicarse entre subsistemas más pequeños permitirá una arquitectura modular para procesadores cuánticos, y esta puede ser una forma más sencilla de escalar a sistemas de mayor tamaño en comparación con el enfoque de fuerza bruta de usar un solo chip grande y complicado", agrega Kannan.

Kannan escribió el artículo con la coautora principal Aziza Almanakly, una estudiante graduada de ingeniería eléctrica y ciencias de la computación en el grupo de Ingeniería de Sistemas Cuánticos del Laboratorio de Investigación de Electrónica (RLE) en el MIT. El autor principal es William D. Oliver, profesor de ingeniería eléctrica e informática y de física, miembro del Laboratorio Lincoln del MIT, director del Centro de Ingeniería Cuántica y director asociado de RLE.

### **Información cuántica en movimiento**

En una computadora clásica convencional, varios componentes realizan diferentes funciones, como memoria, computación, etc. La información electrónica, codificada y almacenada como bits (que toman el valor de 1 o 0), se transporta entre estos componentes mediante interconexiones, que son cables. que mueven electrones en un procesador de computadora.

Pero la información cuántica es más compleja. En lugar de tener solo un valor de 0 o 1, la información cuántica también puede ser 0 y 1 simultáneamente (un fenómeno conocido como

superposición). Además, la información cuántica puede ser transportada por partículas de luz, llamadas fotones. Estas complejidades añadidas hacen que la información cuántica sea frágil y no se puede transportar simplemente utilizando protocolos convencionales.

Una red cuántica vincula los nodos de procesamiento mediante fotones que viajan a través de interconexiones especiales conocidas como guías de ondas. Una guía de ondas puede ser unidireccional y mover un fotón solo hacia la izquierda o hacia la derecha, o puede ser bidireccional.

La mayoría de las arquitecturas existentes utilizan guías de ondas unidireccionales, que son más fáciles de implementar ya que la dirección en la que viajan los fotones se establece fácilmente. Pero dado que cada guía de ondas solo mueve fotones en una dirección, se necesitan más guías de ondas a medida que se expande la red cuántica, lo que hace que este enfoque sea difícil de escalar. Además, las guías de ondas unidireccionales suelen incorporar componentes adicionales para reforzar la direccionalidad, lo que introduce errores de comunicación.

"Podemos deshacernos de estos componentes con pérdida si tenemos una guía de ondas que pueda admitir la propagación en las direcciones izquierda y derecha, y un medio para elegir la dirección a voluntad. Esta ``transmisión direccional" es lo que demostramos, y es el primer paso hacia la comunicación bidireccional con fidelidades mucho más altas", dice Kannan.

Usando su arquitectura, se pueden unir múltiples módulos de procesamiento a lo largo de una guía de ondas. Una característica notable del diseño de la arquitectura es que el mismo módulo se puede usar como transmisor y como receptor, dice. Y los fotones pueden ser enviados y capturados por dos módulos a lo largo de una guía de ondas común.

"Solo tenemos una conexión física que puede tener cualquier cantidad de módulos en el camino. Esto es lo que la hace escalable. Habiendo demostrado la emisión direccional de fotones de un módulo, ahora estamos trabajando para capturar ese fotón aguas abajo en un segundo módulo", agrega Almanakly.

### **Aprovechando las propiedades cuánticas**

Para lograr esto, los investigadores construyeron un módulo que comprende cuatro qubits.

Los qubits son los componentes básicos de las computadoras cuánticas y se utilizan para almacenar y procesar información cuántica. Pero los qubits también se pueden usar como emisores de fotones. Agregar energía a un qubit hace que el qubit se excite y luego, cuando se desexcite, el qubit emitirá la energía en forma de fotón.

Sin embargo, la simple conexión de un qubit a una guía de ondas no garantiza la direccionalidad. Un solo qubit emite un fotón, pero si viaja hacia la izquierda o hacia la derecha es completamente aleatorio. Para evitar este problema, los investigadores utilizan dos qubits y una propiedad conocida como interferencia cuántica para garantizar que el fotón emitido viaje en la dirección correcta.

La técnica consiste en preparar los dos qubits en un estado entrelazado de excitación única llamado estado de Bell. Este estado de la mecánica cuántica comprende dos aspectos: el qubit izquierdo

está excitado y el qubit derecho está excitado. Ambos aspectos existen simultáneamente, pero se desconoce qué qubit está excitado en un momento dado.

Cuando los qubits están en este estado de campana entrelazada, el fotón se emite de manera efectiva a la guía de ondas en las dos ubicaciones de qubit simultáneamente, y estas dos "trayectorias de emisión" interfieren entre sí. Dependiendo de la fase relativa dentro del estado de Bell, la emisión de fotones resultante debe viajar hacia la izquierda o hacia la derecha. Al preparar el estado de Bell con la fase correcta, los investigadores eligen la dirección en la que viaja el fotón a través de la guía de ondas.

Pueden usar esta misma técnica, pero a la inversa, para recibir el fotón en otro módulo.

"El fotón tiene cierta frecuencia, cierta energía, y puedes preparar un módulo para recibirlo sintonizándolo a la misma frecuencia. Si no están a la misma frecuencia, entonces el fotón simplemente pasará. Es análogo a sintonizar una radio a una estación en particular. Si elegimos la frecuencia de radio correcta, recogeremos la música transmitida en esa frecuencia", dice Almanakly.

Los investigadores descubrieron que su técnica logró más del 96 por ciento de fidelidad, lo que significa que si tenían la intención de emitir un fotón a la derecha, el 96 por ciento de las veces fue a la derecha.

Ahora que han utilizado esta técnica para emitir fotones de manera efectiva en una dirección específica, los investigadores quieren conectar varios módulos y utilizar el proceso para emitir y absorber fotones. Este sería un paso importante hacia el desarrollo de una arquitectura modular que combine muchos procesadores de menor escala en un procesador cuántico de mayor escala y más potente.

## Glosario

*Cubit (Qubit)*: unidad fundamental de computación o información cuántica. Se define como la superposición lineal compleja indefinida

$$|\Psi\rangle = c_0|0\rangle + c_1|1\rangle$$

tal que se cumple la normalización de su longitud a la unidad (unitariedad o conservación de la probabilidad)

$$|\Psi|^2 = \overline{\Psi}\Psi = \overline{c_0}c_0 + \overline{c_1}c_1 = |c_0|^2 + |c_1|^2 = 1$$

*Estado de Bell*: estado cuántico entrelazado no factorizable, entre dos partículas (aunque puede generalizarse a varias partículas) o subsistemas. Hay 4 estados máximamente entrelazados denominados estados de Bell, con las siguientes formas analíticas:

$$|\text{Bell}_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$$

$$|\text{Bell}_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle - |11\rangle)$$

$$|\text{Bell}_3\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle + |10\rangle)$$

$$|\text{Bell}_4\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle - |10\rangle)$$

También pueden representarse como sigue

$$|\text{Bell}_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|--\rangle + |++\rangle)$$

$$|\text{Bell}_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|--\rangle - |++\rangle)$$

$$|\text{Bell}_3\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|-+\rangle + |+-\rangle)$$

$$|\text{Bell}_4\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|-+\rangle - |+-\rangle)$$

o también así:

$$|\text{Bell}_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\downarrow\downarrow\rangle + |\uparrow\uparrow\rangle)$$

$$|\text{Bell}_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\downarrow\downarrow\rangle - |\uparrow\uparrow\rangle)$$

$$|\text{Bell}_3\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\downarrow\uparrow\rangle + |\uparrow\downarrow\rangle)$$

$$|\text{Bell}_4\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\downarrow\uparrow\rangle - |\uparrow\downarrow\rangle)$$

*Entrelazamiento cuántico:* Fenómeno cuántico que tiene lugar cuando dos sistemas tienen un estado cuántico que no puede factorizarse en estado cuántico de uno solo de sus subsistemas. El entrelazamiento cuántico es un resultado de superposición independiente de la base. El ejemplo más simple es el estado de máximo entrelazamiento de los estados de Bell (también llamados estados EPR, de Einstein-Podolski-Rosen, que fueron quienes introdujeron la idea, originaria para demostrar que la teoría cuántica era incompleta y no daba una descripción completa de la realidad). Debido a esta superposición, la medición del qubit lo "colapsará" en uno de sus estados básicos con una probabilidad determinada.] Debido al entrelazamiento cuántico, la medición de un qubit "colapsará" el otro qubit a un estado cuya medición producirá uno de dos valores posibles, donde el valor depende del estado de Bell en el que se encuentren inicialmente los dos qubits. Los estados de Bell se pueden generalizar a ciertos estados cuánticos de sistemas multi-qubit, como el estado GHZ para 3 o más subsistemas.

*Estado GHZ:* un estado de Greenberger-Horne-Zeilinger (estado GHZ) es un cierto tipo de estado cuántico entrelazado que involucra al menos tres subsistemas (estados de partículas, qubits o qudits). Fue estudiado por primera vez por Daniel Greenberger, Michael Horne y Anton Zeilinger en 1989 [3]. Se han observado propiedades del estado extremadamente no clásicas. Matemática toma la forma siguiente para 3 qubits:

$$|\text{GHZ}\rangle = \frac{|000\rangle + |111\rangle}{\sqrt{2}}$$

y en general para  $M > 2$  subsistemas de dimensión  $d$  (qudits), el estado GHZ toma la forma

$$|\text{GHZ}\rangle = \frac{1}{\sqrt{d}} \sum_{i=0}^{d-1} |i\rangle \otimes \dots \otimes |i\rangle = \frac{1}{\sqrt{d}} (|0\rangle \otimes \dots \otimes |0\rangle + \dots + |d-1\rangle \otimes \dots \otimes |d-1\rangle)$$

Para  $M$  qubits se simplifica su forma a

$$|\text{GHZ}\rangle = \frac{|0\rangle^{\otimes M} + |1\rangle^{\otimes M}}{\sqrt{2}}$$

En palabras simples, es una superposición cuántica de todos los subsistemas en el estado 0 y todos ellos en el estado 1 (los estados 0 y 1 de un solo subsistema son completamente distinguibles).

*Estado W:* El estado W es un estado cuántico entrelazado de tres qubits que en la notación bra-ket tiene la siguiente forma

$$|\Psi(W)\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}} (|001\rangle + |010\rangle + |100\rangle)$$

y que es notable por representar un tipo específico de entrelazamiento multipartito y por ocurrir en varias aplicaciones en la teoría cuántica de la información. Las partículas preparadas en este estado reproducen las propiedades del denominado teorema de Bell, que establece que ninguna

teoría clásica de variables ocultas locales puede producir las predicciones de la mecánica cuántica. El estado lleva el nombre de Wolfgang Dür [4], quien informó por primera vez sobre el estado junto con Guifré Vidal e Ignacio Cirac en 2002 [5]. El estado W puede generalizarse a  $n$  qubits como sigue

$$|W\rangle = \frac{1}{\sqrt{n}}(|100\dots 0\rangle + |010\dots 0\rangle + \dots + |00\dots 01\rangle)$$

y luego se refiere a la superposición cuántica con coeficientes de expansión iguales de todos los estados puros posibles en los que exactamente uno de los qubits está en un "estado excitado" 1 ó e, mientras que todos los demás están en el "estado fundamental" 0 ó  $\mathcal{G}$  (ground).

*Teorema de Bell (ó de EPR):* El teorema de Bell es un término que abarca una serie de resultados de la física estrechamente relacionados, todos los cuales determinan que la mecánica cuántica es incompatible con las teorías locales de variables ocultas dadas algunas suposiciones básicas sobre la naturaleza de la medición. "Local" aquí se refiere al principio de localidad, la idea de que una partícula solo puede ser influenciada por su entorno inmediato, y que las interacciones mediadas por campos físicos solo pueden ocurrir a velocidades no mayores que la velocidad de la luz. Las "variables ocultas" son propiedades hipotéticas que poseen las partículas cuánticas, propiedades que son indetectables pero que aún afectan el resultado de los experimentos. En palabras del físico John Stewart Bell, por quien se nombra esta familia de resultados, "Si [una teoría de variables ocultas] es local, no estará de acuerdo con la mecánica cuántica, y si está de acuerdo con la mecánica cuántica, no será local." [6]. Una forma del teorema de Bell viene dado por la desigualdad CHSH ( CHSH de John Clauser, Michael Horne, Abner Shimony, y Richard Holt, quienes la introdujeron en un artículo en 1969 [7])

$$\langle A \cdot B \rangle = \langle A_0 B_0 \rangle + \langle A_0 B_1 \rangle + \langle A_1 B_0 \rangle + \langle A_1 B_1 \rangle \leq 2$$

y donde  $A_i, B_i$  adoptan clásicamente valores binarios en una teoría de variables oculta que fuera responsable de la Mecánica Cuántica. Como toman valores binarios, es fácil ver que esos promedios no pueden ser superiores a 2. Sin embargo, en Mecánica Cuántica, uno puede definir el espín, descrito por ejemplo para partículas de espín 1/2 por las matrices de Pauli (también vale equivalentemente para 2 polarizaciones de un fotón, que aunque con 3 polarizaciones teóricas, da 2 y es equivalente al electrón en espín por la invariancia gauge y ser partícula sin masa), Y preparar un estado entrelazado, como por ejemplo uno de los estados de Bell. En Mecánica Cuántica se puede calcular el valor promedio análogo correspondiente a las desigualdades anterior correspondiente al promedio del valor del espín de una de las partículas en cierta dirección, y se deduce que

$$\langle A_0 \otimes B_0 \rangle = \langle A_0 \otimes B_1 \rangle = \langle A_1 \otimes B_0 \rangle = -\langle A_1 \otimes B_1 \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

con lo que la Mecánica Cuántica daría

$$\langle A \cdot B \rangle \leq 2\sqrt{2}$$

y violaría las desigualdades de CHSH, y por tanto, las condiciones del teorema de Bell. Esta desigualdad es un caso particular de cota denominada cota de Tsirelson en Mecánica Cuántica.

La violación de las desigualdades de Bell, como las desigualdades de CHSH, experimentalmente, recibió el premio Nobel de Física el año 2022.

## Referencias

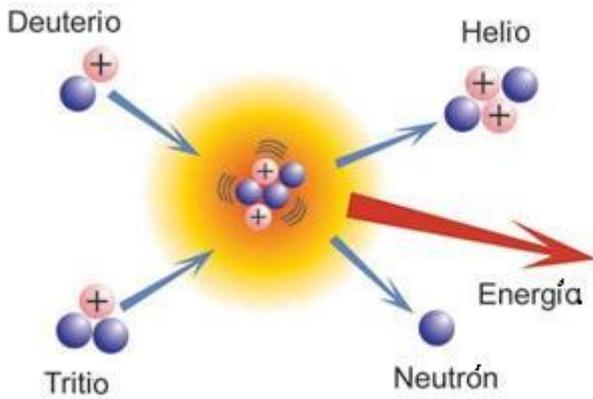
- [1] Bharath Kannan, *On-demand directional microwave photon emission using waveguide quantum electrodynamics*, Nature Physics (2023). DOI: [10.1038/s41567-022-01869-5](https://doi.org/10.1038/s41567-022-01869-5). [www.nature.com/articles/s41567-022-01869-5](https://www.nature.com/articles/s41567-022-01869-5)
- [2] Phys.org news, by Adam Zewe, Massachusetts Institute of Technology (MIT), *New quantum computing architecture could be used to connect large-scale devices*. URL: <https://phys.org/news/2023-01-quantum-architecture-large-scale-devices.html>
- [3] Daniel M. Greenberger; Michael A. Horne; Anton Zeilinger (2007), *Going beyond Bell's Theorem*, [arXiv:0712.092](https://arxiv.org/abs/0712.092)
- [4] Cabello, Adán (February 5, 2002). "*Bell's theorem with and without inequalities for the three-qubit Greenberger-Horne-Zeilinger and W states*". Physical Review A. 65 (3): 032108. [arXiv:quant-ph/0107146](https://arxiv.org/abs/quant-ph/0107146). doi:[10.1103/PhysRevA.65.032108](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.65.032108). ISSN 1050-2947.
- [5] W. Dür; G. Vidal & J. I. Cirac (2000). "*Three qubits can be entangled in two inequivalent ways*". Phys. Rev. A. 62 (6): 062314. [arXiv:quant-ph/0005115](https://arxiv.org/abs/quant-ph/0005115). Bibcode:2000PhRvA..62f2314D. doi:[10.1103/PhysRevA.62.062314](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.62.062314). S2CID 16636159
- [6] Bell, John S. (1987). *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*. Cambridge University Press. p. 65. ISBN 9780521368698. Existe traducción al castellano, en *Lo decible e indecible en Mecánica Cuántica*, ediciones de bolsillo de Alianza Editorial.
- [7] J.F. Clauser; M.A. Horne; A. Shimony; R.A. Holt (1969), "*Proposed experiment to test local hidden-variable theories*", Phys. Rev. Lett., 23 (15): 880–4, doi:[10.1103/PhysRevLett.23.880](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.23.880)

Artículo editado, traducido y comentado con glosario breve por Juan F. González.

## 50. La fusión nuclear.

# La fusión nuclear

¿Podría ser la fusión nuclear sea una fuente importante de energía en unos años?



**Figura 1.** Reacción de fusión deuterio-tritio, una de las reacciones posibles para la fusión nuclear comercial. No todas las reacciones de fusión producen la misma energía, depende siempre de los núcleos que se unen y de los productos de la reacción. La reacción más fácil de conseguir es la del deuterio (un protón más un neutrón) y tritio (un protón y dos neutrones) para formar helio (dos neutrones y dos protones, también conocido como partícula alfa ( $\alpha$ )) y un neutrón, liberando una energía de 17,6 MeV, es decir:



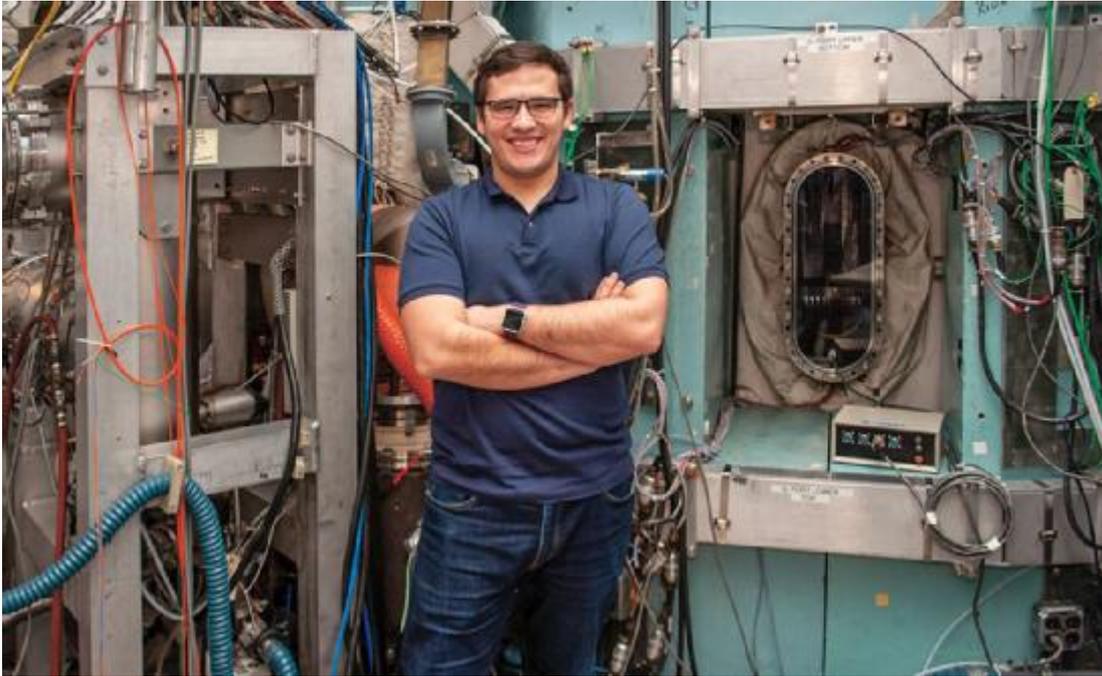
Créditos: <http://www.inin.gob.mx/temasdeinteres/fusionnuclear.cfm>

En física nuclear, la fusión nuclear es una reacción nuclear en la que varios núcleos atómicos se unen y forman un núcleo más pesado.

Este proceso puede crear energía, pero hasta hace poco gastaba más al crearse que la que propiamente producía. Y recientemente se ha descubierto una forma para que sea rentable y debido a esto se ha producido un gran interés global por la posibilidad de sustituir otros tipos de fuentes de energía.

La fusión nuclear es precisamente lo contrario a la fisión, la cual es la utilizada en las centrales nucleares actuales. Y aunque muchos científicos e investigadores explican que la gente ha exagerado en exceso por este descubrimiento, tendremos que esperar unos cuantos años para saber si esta nueva fuente de energía puede sorprendernos.

En cabeza de la competición está el MIT, de Boston, donde un ingeniero español, Pablo Rodríguez-Fernández (Madrid, 1991), comenta que probablemente veremos un reactor comercial de fusión en torno a 2035.



**Figura 2.** Pablo Rodríguez-Fernández(Madrid, 1991). Este científico madrileño es un genio que puede cambiar el mundo. Su equipo del MIT (Boston) es uno de los que lidera la competición por lograr una energía limpia e inagotable: la fusión nuclear. Créditos: ABC semanal, foto de Raúl Rivenberg, URL <https://www.abc.es/xlsemanal/personajes/pablo-rodriguez-fernandez-genio-cientifico-energia-infinita-inagotable-fusion-nuclear.html>

Unos cuarenta laboratorios de todo el mundo compiten por construir ese primer reactor de fusión. Y uno de los proyectos que lidera la carrera es el SPARC, que desarrolla el MIT.

## Referencias

[1] Wikipedia, la Enciclopedia Libre, Fundación Wikimedia, *Fusión nuclear*, URL: [https://es.wikipedia.org/wiki/Fusi%C3%B3n\\_nuclear](https://es.wikipedia.org/wiki/Fusi%C3%B3n_nuclear)

[2]Entrevista a Laura Ortiz, científica, «Se ha exagerado mucho con lo conseguido en la fusión nuclear», en El Debate.com, URL: <https://www.eldebate.com/ciencia/20230108/exagerado-mucho-conseguido-fusion-nuclear-84079.html>

[3] ABC semanal, artículo escrito por Carlos Manuel Sánchez, *El genio de la energía infinita Pablo Rodríguez-Fernández, ingeniero del MIT.* URL: <https://www.abc.es/xlsemanal/personajes/pablo-rodriguez-fernandez-genio-cientifico-energia-infinita-inagotable-fusion-nuclear.html>

**Artículo original escrito por Óliver Aragón Martínez (3º ESO, grupo D).**

Artículo corregido y editado mínimamente por Juan F. González.

## **Noticiero vol. 4.**

**Artículo 1. ¡Hola, mundo! ¡Hola ronna (R), quetta (Q), ronto (r) y quecto (q)!**

**Artículo 2. Pralines y estrellas de neutrones.**

**Artículo 3. Agujeros de gusano ¿ocultos a simple vista?**

**Artículo 4. El agujero negro más cercano confirmado (hasta ahora)**

**Artículo 5. Los fondos cósmicos del Universo**

**Artículo 6. ¿Hemos detectado una estrella de quarks extraños?**

**Artículo 7. Novedoso compuesto fotocalizador interfacial de banda ancha**

**Artículo 8. Los orígenes de los agujeros negros en sistemas binarios**

**Artículo 9. Las galaxias más lejanas (por ahora)**

**Artículo 10. Decid "¡Hola!" al material más resistente y duro (por ahora): la aleación CrCoNi**

**Artículo 11. 55 Cancri e: el exoplaneta del infierno**

**Artículo 12. Dos nuevas supertierras "cercanas"**

**Artículo 13. Algunos exoplanetas "favoritos" de los astrónomos**

**Artículo 14. JWST y la atmósfera de WASP 39-b**

**Artículo 15. ¿Existen las leyes de la Física?**

**Artículo 16. Nuevo método de producción de agujeros negros primordiales**

**Artículo 17. Si la materia oscura son axiones, ésta es una (buena) forma de encontrarlos**

**Artículo 18. Buscando materia oscura con cables superconductores**

**Artículo 19. La NASA prepara las velas de su "Solar Cruiser" (Crucero Solar)**

**Artículo 20. Unimon: el nuevo qubit que no es un pokemon o digimon.**

**Artículo 21. Nuevas dimensiones en computación cuántica**

**Artículo 22. LHCb libera datos en abierto para Ciencia ciudadana**

**Artículo 23. Visualización de agujeros negros**

**Artículo 24. ¿Agujeros de gusano en procesadores cuánticos?**

**Artículo 25. ¿Más cerca de la fusión? Es posible, pero no a corto plazo.**

**Artículo 26. El primer DEEP FIELD del James Webb ST: 9 días y es impresionante**

**Artículo 27. Búsqueda de axiones en el Centro Galáctico**

**Artículo 28. ¿Por qué están de moda los agujeros de gusano (wormholes)?**

**Artículo 29. Buscando señales de motores de curvatura ('warp drive') extraterrestres**

**Artículo 30. ¿Qué es el motor de curvatura de Alcubierre, o 'Alcubierre warp drive'?**

**Artículo 31. IXPE y la polarización de los magnetares**

**Artículo 32. ¿Es nuestra galaxia, la Vía Láctea, normal?**

**Artículo 33. Resumen de 2022 en la Ciencia de las Matemáticas**

**Artículo 34. Resumen de 2022 en la Ciencia de la Física**

**Artículo 35. Un ordenador cuántico de IBM alcanzará más de 1000 qubits en 2023**

**Artículo 36. MOG vs. MOND vs. DM**

**Artículo 37. Los teoremas maravillosos de Emmy Noether(I)**

**Artículo 38. Los maravillosos teoremas de Emmy Noether(II)**

**Artículo 39. Los maravillosos teoremas de Emmy Noether(III)**

**Artículo 40. El Aragoscopio.**

**Artículo 41. Hexaquarks (¿O sexaquarks?).**

**Artículo 42. Compuestos no estequiométricos.**

**Artículo 43. ¡Feliz 2023! 2023: curiosidades matemáticas**

**Artículo 44. Azafullerenos.**

**Artículo 45. Grafullerita y grafullereno.**

**Artículo 46. Baterías de ión de sodio: un nuevo reto para la sostenibilidad**

**Artículo 47. Electroquímica: transformando el dióxido de carbono en algo útil.**

**Artículo 48. El James Webb halla galaxias espirales en el Universo primitivo.**

**Artículo 49. Nueva arquitectura para computación cuántica.**

**Artículo 50. La fusión nuclear.**

## **Apéndice. Teoremas de Noether en un plis plas.**

### **Preludio**

Sean  $n$  campos  $\phi^i(x)$ ,  $i=1,\dots,n$ , que dependen de  $D$  variables o coordenadas  $x = x^\mu = (x^1, x^2, \dots, x^D)$ . Las ecuaciones de Euler-Lagrange de primer orden (se puede extender la discusión a cualquier orden de derivadas mediante el uso de fibrados jet) se escriben

$$E_i(\varphi) = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \phi^i} - \partial_\mu \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial (\partial_\mu \phi^i)} = 0$$

Para la integral de acción

$$S = \int_M \mathcal{L}(x; \phi^i, \partial_\mu \phi^i) d^D x$$

se definen las transformaciones de coordenadas y campos:

$$x^\mu \rightarrow x'^\mu = x^\mu + \delta x^\mu$$

$$\phi^i(x) \rightarrow \phi'^i(x') = \phi^i(x) + \delta\phi^i = \phi^i(x) + \bar{\delta}\phi^i + \partial_\mu \phi^i \delta x^\mu$$

que son transformaciones infinitesimales de las cantidades  $x^\mu, \phi^i$ . Al más bajo orden, la acción cambia

$$\delta S = \int_M \mathcal{L}(x', \phi'(x'), \partial \phi'(x')) d^D x' - \int_M \mathcal{L}(x, \phi(x), \partial \phi) d^D x$$

para dar

$$\delta S = \int_M [E_i(\phi) \bar{\delta}\phi^i + \partial_\mu B^\mu(x, \phi, \partial \phi, \delta x, \delta \phi)]$$

y donde  $B^\mu, \mu = 1, 2, \dots, D$  son funciones lineales en  $\delta x^\mu, \delta \phi^i$ . Con estas expresiones, Noether enunció sus dos teoremas.

**Teorema 1 (Noether, grupos r-paramétricos). Leyes de conservación implica invariancia y viceversa.**

Si la integral de acción es invariante para un grupo r-paramétrico de Lie (Lie-Backlund hoy día):

$$x^\mu \rightarrow x'^\mu = f^\mu(x, \varphi; \epsilon^1, \dots, \epsilon^r)$$

$$\phi^i(x) \rightarrow \phi'^i(x') = F^i(x, \varphi; \epsilon^1, \dots, \epsilon^r)$$

donde los valores  $\epsilon = \epsilon^\rho = 0 = (0, \dots, 0) = (\epsilon^1, \dots, \epsilon^r)$ , con  $\rho = 1, \dots, r$  dan la transformación identidad. Entonces, para la parametrización

$$\delta x^\mu = X^\mu_\rho(x, \phi) \epsilon^\rho, \quad |\epsilon| < 1$$

$$\delta \phi^i = Z^i_\rho(x, \phi) \epsilon^\rho$$

se demuestra, como hizo Noether, que existen  $r$  corrientes conservadas

$$J^\mu_\rho = T^\mu_\nu X^\nu_\rho - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial(\partial_\mu \phi^i)} Z^i_\rho, \quad \rho = 1, 2, \dots, r$$

con el tensor energía-momento-impulso dado por

$$T^\mu_\nu = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial(\partial_\mu \phi^i)} \partial_\nu \phi^i - \delta^\mu_\nu \mathcal{L}$$

para las soluciones  $\phi^i(x)$  de las ecuaciones de movimiento  $E_i(\phi) = 0$  de un lagrangiano de primer orden.

*Ejemplo 1. Traslaciones espacio-tiempo.*

Las transformaciones de coordenadas

$$x^\mu \rightarrow x^\mu + \epsilon^\mu$$

$$\delta\phi^i = 0$$

proporcionan las corrientes

$$J^\mu_\nu = T^\mu_\nu, \mu, \nu = 1, 2, 3, \dots, D.$$

*Ejemplo 2. Simetrías internas.*

Sean las transformaciones internas

$$\delta x^\mu = 0$$

$$\phi'^i(x) = Y^i_\rho(\epsilon^1, \epsilon^2, \dots, \epsilon^r) \phi^\rho(x)$$

Entonces las siguientes corrientes son conservadas supuestas válidas las ecuaciones de movimiento  $E_i(\phi) = 0$

$$J^\mu_\rho = - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial(\partial_\mu(\phi^i))} Z^i_\rho, \rho = 1, 2, \dots, r.$$

También se cumple el recíproco: si hay  $P$  cantidades conservadas, entonces hay grupos de transformaciones que dejan la acción invariante.

**Teorema 2 (Noether, grupos  $\infty$ -paramétricos o transformaciones gauge).** La invariancia bajo un grupo infinitodimensional de transformaciones "gauge" implican dependencias funcionales (redundancias, identidades diferenciales) entre las ecuaciones de movimiento y **viceversa**.

Si la integral de acción es invariante bajo un grupo gauge (infinito-dimensional), los elementos del grupo dependen de  $s$ -funciones suaves o regulares  $\xi^\rho(x)$ ,  $\rho = 1, \dots, s$  y sus derivadas hasta orden  $r_\rho$ , de forma que las variaciones son

$$\bar{\delta}\phi^j = \sum_{\rho=1}^s \sum_{\sigma_1, \dots, \sigma_D=0}^{\sigma_1, \dots, \sigma_D=r_\rho} (\epsilon^j(x, \phi; \partial\phi)_{\rho, \sigma_1, \dots, \sigma_D}) \frac{\partial^{\sigma_1 + \dots + \sigma_D}}{\partial(x^1)^{\sigma_1} \dots \partial(x^D)^{\sigma_D}} \xi^\rho(x)$$

y existen  $s$ -identidades llamadas identidades de Noether (o identidades de Bianchi) dadas por las expresiones

$$\sum_{\sigma_1, \dots, \sigma_D=0}^{\sigma_1 + \dots + \sigma_D=r_\rho} (-1)^{\sigma_1 + \dots + \sigma_D} \frac{\partial^{\sigma_1 + \dots + \sigma_D}}{\partial(x^1)^{\sigma_1} \dots \partial(x^D)^{\sigma_D}} (\epsilon^j(x, \phi, \partial\phi)_{\rho, \sigma_1, \dots, \sigma_D} E_i(\phi)) = 0$$

$\rho = 1, \dots, 5$ , y que dan relaciones o dependencias entre las  $D$ -ecuaciones de Euler-Lagrange. La prueba usa integración y el hecho de que uno puede elegir  $\xi^\rho = 0$  y también que podemos escribir

$$\frac{\partial^{\sigma_1 + \dots + \sigma_D}}{\partial(x^1)^{\sigma_1} \dots \partial(x^D)^{\sigma_D}} \xi^\rho = 0$$

en la frontera o borde de  $M$ , topológicamente denotado por  $\partial M$ .

*Ejemplo 1. Electrodinámica clásica.*

En Electrodinámica Clásica se tiene que

$$E_\mu(A) = \partial^\nu F_{\nu\mu}$$

y

$$F_{\nu\mu} = \partial_\nu A_\mu - \partial_\mu A_\nu. \text{ La acción invariante es}$$

$$S(A, F) = -\frac{1}{4} \int d^4x F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

Bajo las transformaciones gauge

$$\delta A^\mu = \partial^\mu \xi(x)$$

se deduce que

$$\partial^\mu E_\mu(A) = 0$$

que es obvio resultado por la antisimetría de  $F$ ,  $F_{\mu\nu} = -F_{\nu\mu}$ .

*Ejemplo 2. Relatividad general.*

En Relatividad General (RG), se tienen las ecuaciones no lineales de campo

$$E_{\mu\nu}(g) = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = G_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

y donde  $R_{\mu\nu}$  es el tensor de Ricci,  $R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}$  es el escalar de curvatura. La invariancia de la acción integral de Einstein-Hilbert

$$S_{EH} = \int d^4x \sqrt{-g} R$$

bajo difeomorfismos o transformaciones generales de coordenadas parametrizadas en la forma

$$\delta x^\mu = \Xi^\mu(x)$$

$$\delta g_{\mu\nu} = D_\mu \Xi_\nu + D_\nu \Xi_\mu$$

donde  $D_\mu$  es la derivada covariante, proporciona 4 identidades de Bianchi (identidades de Noether, dependencias)

dadas por

$$D^\mu E_{\mu\nu}(g) = 0$$

que es obvio por la simetría de  $G_{\mu\nu}$  y esperable por la conservación del tensor energía-momento-impulso  $T_{\mu\nu}$ . Estas relaciones fueron descubiertas por Hilbert y discutidas por él en su primer artículo sobre relatividad general en 1915.

### Teoría de invariantes y álgebra

Emmy Noether(1882-1935) logró su doctorado (Ph.D) en Matemáticas en 1907 en la Universidad de Erlangen. Otra de las facetas de Noether era la teoría de invariantes algebraicos. La teoría de invariantes algebraicos estudia formas multilineales con la expresión formal

$$F^{D,p}(y_1, \dots, y_n; \epsilon) = \sum_{i_1, \dots, i_D=1}^n a_{i_1 i_2 \dots i_D} (y_{i_1})^{\alpha_{i_1}} \dots (y_{i_D})^{\alpha_{i_D}} \quad \text{con } \alpha_{i_1} + \dots + \alpha_{i_D} = p$$

Si uno pasa de variables  $y_j$  a las variables  $x_i$  por transformaciones lineales  $x_i = C_{ij} y_j$ ,  $|C_{ij}| \neq 0$ , e insertamos estas relaciones en la fórmula precedente, esperamos encontrar una nueva forma del mismo tipo

$$G^{D,p}(x; b) = F^{D,p}[y(x; c); a]$$

donde los coeficientes  $b^{j_1 \dots j_D}$  son funciones de los coeficientes  $a^{j_1 \dots j_D}$  a través de la matrix de elementos  $C_{ij}$ . La principal cuestión de la teoría de invariantes algebraicos es: ¿qué funciones algebraicas  $f(a)$  de los coeficientes  $a^{j_1 \dots j_D}$  son invariantes bajo transformaciones lineales, tales que se verifica la relación

$$f(b) = |C_{ij}|^g f(a)$$

donde  $g$  es un número racional? Resulta que hay una conexión profunda entre invariantes algebraicos e invariantes diferenciales, que se descubrió ya en el siglo XIX. La propia geometría de Riemann, esencial en la Teoría de la Relatividad General, usa invariantes diferenciales del tipo

$$f(x, dx) = g_{ij}(x) dx^i dx^j$$

aunque se podría también estudiar en principio invariantes más complicados (otras geometrías), del tipo

$$f(x, dx) = g_{i_1 i_2 \dots i_p} dx^{i_1} \dots dx^{i_p}$$

Los teoremas de Noether son relevantes en el estudio del movimiento de fuerzas centrales del tipo inverso del cuadrado (problema de Kepler, con simetría oculta no trivial), el estudio de trompos asimétricos en más dimensiones. Por ejemplo, se puede generalizar al denominado grupo  $SO(n)$  el grupo  $SO(3)$  usual de un cuerpo o trompo rígido con ecuaciones de Euler (no confundir estas ecuaciones con las ecuaciones de Euler-Lagrangre):

$$\frac{dJ_i^B}{dt} + \sum_{j,k=1}^n C_{ijk} \omega^j J^{kB} = M_i^B$$

con  $i = 1, 2, \dots, n$ . Además, también tiene aplicación en teorías de (super)cuerdas, Mecánica Cuántica, Teorías Cuánticas de Campos (QFT), teorías del estado sólido, incluso en la teoría de agujeros negros (el agujero negro de Kerr con masa y momento angular tiene una constante de movimiento no trivial llamada constante de Carter asociada a una simetría no trivial del agujero negro, llamada simetría de Killing), Cosmología, o en la más humana Ciencia de la atmósfera en fluidos (donde cantidades como vorticidad y enstrofia juegan un papel importante en la dinámica no lineal asociada a los mismos).

Los teoremas de Noether son tan bellos debido a su generalidad y a la relevancia de la simetría en el mundo y en el Universo. A pesar de que se pueden formular hoy día con una elegancia, generalización, abstracción y nivel de sofisticación mayor (quizás escriba una tercera parte sobre este aspecto), la esencia sigue siendo la misma:

- 1) Simetrías continuas implican leyes de conservación, y viceversa. Matemáticamente, se expresa como ecuaciones de continuidad (campos) o cantidades cuya derivada temporal es cero (en el caso de sistemas de partículas).
- 2) Simetrías gauge implican dependencias o relaciones funcionales entre ecuaciones de movimiento de campos (partículas), y viceversa. Matemáticamente, se expresa como identidades entre ciertos operadores diferenciales en ecuaciones de tipo ordinario (sistemas de partículas) o en derivadas parciales (teorías de campos).

## Referencias

[1] Hans a. Kastrup, *The contributions of Emmy Noether, Felix Klein and Sophus Lie to the Modern Concept of Symmetries in Physical Sciences*, 1983. Symmetries in Physics (1600-1980), Proceedings of the 1st international Meeting on the History of Scientific Ideas held at Sant Feliu de Guíxols, Spain. UAB.

[2] Olver, Peter (1993). *Applications of Lie groups to differential equations*. Graduate Texts in Mathematics. Vol. 107 (2nd ed.). Springer-Verlag. ISBN 0-387-95000-1.

[3] *Noether's theorem*. Wikipedia, La enciclopedia libre. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Noether%27s\\_theorem](https://en.wikipedia.org/wiki/Noether%27s_theorem)

*Artículo editado, traducido y completado por Juan F. González*