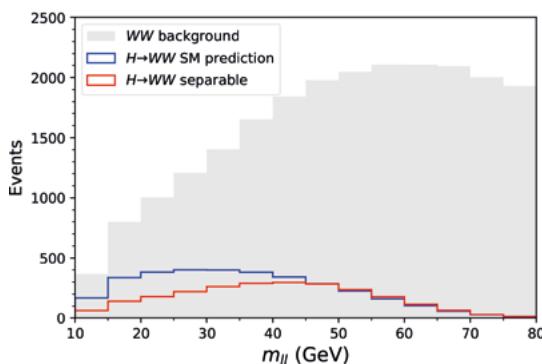


# Puntos de interés

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

## VERIFICANDO LA MECÁNICA CUÁNTICA EN LA FRONTERA DE LA ENERGÍA

**L**a mecánica cuántica es uno de los pilares básicos de la física moderna. Por este motivo, es del mayor interés continuar comprobando su validez a escalas de energía cada vez más altas. Una de las predicciones más características de la mecánica cuántica es el entrelazamiento, fenómeno que se da cuando dos o más partículas pierden su independencia y solo pueden ser descritas como un “todo” interdependiente, de forma que una medida realizada en una de ellas afecta instantáneamente a la otra. En el caso contrario en que no existe entrelazamiento entre las partículas, se dice que el estado es separable.



El entrelazamiento cuántico ha sido medido experimentalmente entre electrones y fotones, además de en sistemas de varias partículas. Los electrones son partículas de espín 1/2, mientras que los fotones, aunque tienen espín 1, sólo tienen dos estados posibles de polarización. Por ello, en ambos casos el entrelazamiento de espín medido corresponde a **cúbits**, sistemas con dos estados posibles. **Hasta ahora no se ha realizado**

ninguna medida experimental de entrelazamiento entre partículas elementales con tres estados de espín posibles, llamados **cútrits** en terminología de información cuántica. Tales partículas son los bosones W y Z, con una masa 80 (90) veces mayor que la del protón.

Uno de los principales canales de desintegración de los bosones de Higgs producidos en el gran colisionador de hadrones (LHC) del CERN tiene lugar a parejas de bosones W, producidas en un estado de espín altamente entrelazado. Este entrelazado es experimentalmente medible, pese a que el tiempo de vida media de estas partículas es de unos  $10^{-25}$  s. Para ello, se puede utilizar la desintegración leptónica de la pareja WW, en la que se producen dos leptones cargados (electrones o muones) de carga opuesta, más dos neutrinos que escapan de los detectores.

Mediante simulaciones Montecarlo, el profesor J. A. Aguilar-Saavedra (CSIC) y miembro de la RSEF concluye que es posible anticipar la sensibilidad de los experimentos ATLAS y CMS para determinar el entrelazamiento (*Physical Review D*, DOI: 10.1103/PhysRevD.107.076016), usando un método denominado “CAR” (por sus siglas en inglés) (*Physical Review D*, 10.1103/PhysRevD.106.115021) desarrollado *ad hoc* para simular teóricamente

la hipótesis de que la pareja WW fuera producida en un estado de espín separable. Una excelente discriminación entre las hipótesis (a) entrelazamiento y (b) no entrelazamiento (separabilidad) se obtiene considerando la distribución diferencial de masa invariante de los dos leptones cargados ( $m_{ll}$ ), que es fácil de medir experimentalmente y muy robusta frente a incertidumbres teóricas. Con los datos ya adquiridos por las colaboraciones ATLAS y CMS en la fase 2 del LHC (2016-2018), se estima que la significancia estadística para discriminar entre ambas hipótesis superaría las 5 desviaciones estándar.

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



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

Por tanto, los datos existentes del LHC permitirían ya establecer experimentalmente el entrelazamiento entre **cútrits** elementales.

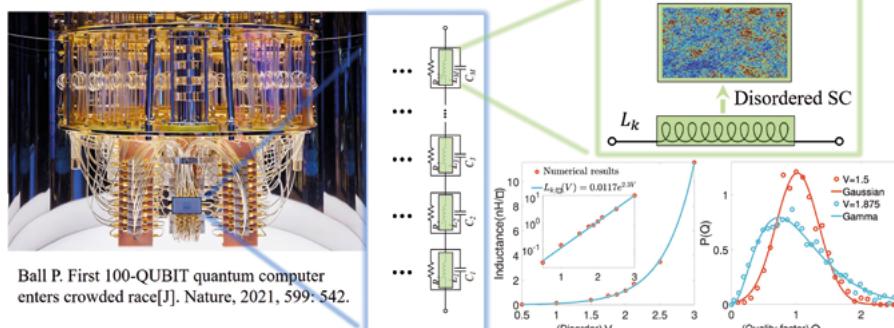
## INTERFERENCIA CUÁNTICA PARA AUMENTAR LA CAPACIDAD DE PROCESO DE ORDENADORES CUÁNTICOS

**L**a coherencia cuántica, la capacidad de mantener la superposición y la interferencia cuántica en un sistema, es un aspecto fundamental en el desarrollo de ordenadores cuánticos. Un mayor tiempo de coherencia implica que los cúbits, o unidades de información cuántica, pueden mantener su estado cuántico por un período de tiempo más largo, lo que permite una mayor escalabilidad y capacidad de procesamiento que resulta en cálculos más complejos y realizados más rápidamente. Además, una mayor coherencia cuántica también reduce la probabilidad de errores en los cálculos, lo que incrementa la precisión de los resultados.

Por lo tanto, un aumento del tiempo de coherencia cuántica es crucial para el avance de la computación cuántica y su adopción en una amplia gama de aplicaciones industriales y científicas.

El inductor es un elemento importante en dispositivos de computación cuántica, pues suprime fluctuaciones causantes de

la destrucción de la coherencia cuántica. En muchos casos, es un circuito basado en películas delgadas superconductoras con impurezas en la región de las microondas, que tienen una alta inductancia cinética. Estos circuitos a menudo se denominan “superinductores”.



Resultados experimentales recientes han encontrado que **esta inductancia cinética ( $L_k$ ) aumenta sustancialmente al aumentar las impurezas**, sin que aumenten las pérdidas sustancialmente.

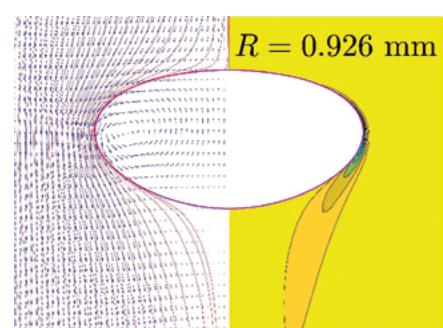
En un reciente trabajo publicado en la revista *Physical Review Letters* (DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.130.047001>), los investigadores Bo Fan y Antonio Miguel García García, del Instituto de Física de la Materia Condensada de la Universidad Jiao Tong de Shanghai, China, y Abhisek Samanta, del departamento Física del Technion, Israel, **proponen que este aumento de la inductancia es debido a efectos de interferencia cuántica inducidos por las impurezas en el material**. Además, plantean que la inductancia y, por tanto, **el tiempo de coherencia en ordenadores cuánticos basados en cíbits superconductores, puede ser aumentado hasta dos órdenes de magnitud** en una cierta región de parámetros accesible experimentalmente, sin una acusada supresión del factor de calidad del circuito.

Estos resultados han sido obtenidos dentro del marco de la teoría de Bogoliubov-de Gennes de superconductividad, incluyendo correcciones dentro de la aproximación de fase aleatoria que es invariante gauge y, por tanto, permite describir excitaciones colectivas y otras fluctuaciones que suprinen el factor de calidad ( $Q$ ) del circuito. Más interesante aún, en el lado metálico de la transición superconductor-aislante, **han identificado un rango de frecuencias y temperaturas donde los efectos**

**de coherencia cuántica inducen una amplia distribución estadística del factor de calidad del circuito con un valor medio que aumenta con la densidad de impurezas**. Los investigadores consideran que estos hallazgos tienen el potencial **de reducir el tamaño y au-**

Para superar estas dificultades, los investigadores han desarrollado una técnica de discretización numérica que caracteriza con precisión la interfaz aire-agua de la burbuja, bautizada como “**Método de Generación de Jacobianos Analíticos**” (AJGM, *Analytical Jacobian Generator Method*). La ventaja del método sobre otros similares para el tratamiento de flujos multifásicos es que **permite no solo calcular el movimiento de la burbuja, sino que también consigue analizar su estabilidad**. Los autores muestran que las simulaciones concuerdan bien con mediciones de alta precisión del movimiento inestable de las burbujas e indican que éstas se desvían de la trayectoria recta en el agua si su radio esférico supera los 0,926 milímetros, **un resultado dentro del 2 % de los valores experimentales obtenidos con agua ultrapura en los años noventa del siglo pasado**.

Los investigadores proponen **un mecanismo para la inestabilidad de la trayectoria de la burbuja**, merced al cual **una inclinación periódica de la burbuja cambia la curvatura**, lo que afecta a la velocidad de ascenso y provoca un bamboleo en la trayectoria de la burbuja, inclinando hacia arriba el lado de la burbuja cuya curvatura ha crecido. A continuación, a medida que el fluido se mueve más deprisa y la presión del fluido desciende alrededor de la superficie de alta curvatura, el desequilibrio de presión devuelve la burbuja a su posición original, reiniciando el ciclo periódico.



Flujo alrededor de la burbuja para el radio crítico. A la derecha, líneas de corriente que muestran que no se forma estela detrás de la burbuja. A la izquierda, contornos de vorticidad que muestran que el máximo de vorticidad coincide con la máxima curvatura.

Estos resultados pueden ser útiles para comprender el movimiento de partículas **cuyo comportamiento es intermedio entre el de un sólido y un**

gas. En particular, como línea futura de investigación, los responsables del estudio pretenden modificar el método numérico para estudiar el efecto de la adición de una pequeña cantidad de surfactante, lo que permite simular la **contaminación natural del agua**, a fin de determinar el cambio en la velocidad de ascenso de las burbujas y los efectos sobre la estabilidad.

## NUEVO MÉTODO DE EXFOLIACIÓN DE MoS<sub>2</sub> ASISTIDO POR MICROONDAS PRODUCE COPOS DE GRANDES DIMENSIONES CON UN ALTO RENDIMIENTO

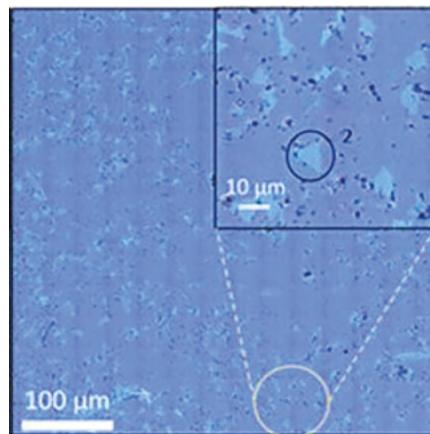
**E**l disulfuro de molibdeno MoS<sub>2</sub> es un dicalcogenuro de metal de transición, un material muy interesante en el campo de la electrónica por su amplio espectro de propiedades físicas, llegando a ser desde semimetalico hasta semiconductor, superconductor o aislante, dependiendo de sus dimensiones. El número de capas apiladas es crucial para determinar estas propiedades. Por ejemplo, el MoS<sub>2</sub> monocapa exhibe un *bandgap* directo de 1.90 eV, mientras que el grueso de 2H-MoS<sub>2</sub> presenta un *bandgap* indirecto de 1.23 eV. Estas propiedades personalizables convierten a los dicalcogenuros en candidatos ideales para aplicaciones. Sin embargo, la obtención de copos MoS<sub>2</sub> grandes y de alta calidad ha demostrado ser todo un desafío.

Los métodos de exfoliación en fase líquida existentes presentan bajos rendimientos y, a menudo, dan como resultado amplias distribuciones de espesor de los copos de MoS<sub>2</sub>. En un intento por mejorar el rendimiento, se han explorado otras técnicas, como la exfoliación por medios mecánicos, la electroquímica o la que utilizan fuerzas hidrodinámicas. Sin embargo, estos métodos tienen problemas de escalabilidad o producen 1T-MoS<sub>2</sub> metálico, que tiene diferentes propiedades y aplicaciones.

El equipo, liderado por los profesores Víctor Sebastián y Jesús Santamaría (miembro de las RSEF), del Instituto de Nanociencia y Materiales de Zaragoza (INMA CSIC-UNIZAR), y

el profesor Emilio M. Pérez, del Instituto Madrileño de Estudios Avanzados en Nanociencia (IMDEA Nano), han probado un **nuevo método asistido por microondas para exfoliar copos de MoS<sub>2</sub>**. Encontraron que el método producía material bien exfoliado con tamaños laterales grandes, **con una calidad de material comparable a la obtenida por exfoliación mecánica**. Y el **rendimiento del proceso es muy alto**, aproximadamente 50 veces mayor que los métodos de exfoliación por ultrasonidos. El **proceso es rápido**, toma solo unos minutos y requiere un **procesamiento mínimo**. El estudio ha sido publicado en la revista *ACS Nano* (DOI: 10.1021/acsnano.3c00280).

Para los autores, lo más emocionante de los resultados es “el tamaño lateral de los copos. Obtener copos grandes y delgados al mismo tiempo, así como con un alto rendimiento, no



En la imagen, la dimensión lateral del copo de MoS<sub>2</sub> destacado es de más de 5 micras.

es fácil, ya que todos los métodos de exfoliación se reducen a agregar algún tipo de energía al material a granel, para superar las interacciones de Van der Waals entre las capas. Y es difícil evitar que esa misma energía cause daño lateral al mismo tiempo. Nuestro método logra utilizar microondas para evaporar moléculas de disolvente entre capas, creando una alta presión entre ellas muy rápidamente, de modo que puedan separarse, pero no se dañen”.

En este caso, este rápido método se ha aplicado a MoS<sub>2</sub>, pero podría usarse para exfoliar cualquier material con altas capacidades de absorción de microondas, siendo un enfoque versátil en el área emergente de materiales 2-dimensionales (2D). Emilio Pérez y

Víctor Sebastián señalan que “los materiales 2D son prometedores para muchas tecnologías (sensores, electrónica, etc.), pero obviamente todo comienza con la fabricación de estos materiales con una buena calidad, idealmente en grandes cantidades y a bajo costo. Aquí es donde nuestro trabajo puede contribuir. No es un paso hacia una nueva tecnología específica, sino más bien una herramienta para ayudar a que toda la esperanza depositada en los materiales 2D se convierta en realidad”.

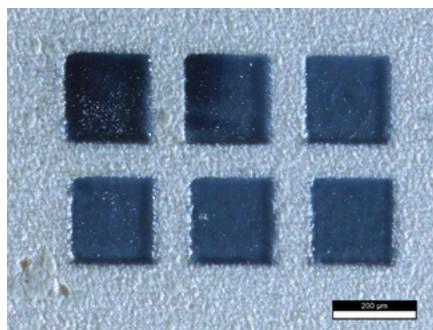
## LÁSERES, ÓXIDOS DE NIOBIO Y BATERÍAS DEL FUTURO

**L**a energía y su almacenamiento en baterías es un tema de rabiosa actualidad. Necesitamos su energía para mover nuestros coches, para hacer que nuestros ordenadores funcionen, para que nuestros móviles estén encendidos durante todo el día, etc. También queremos que las baterías duren el mayor tiempo posible, sean seguras y se carguen muy rápido. Para fabricar dispositivos de almacenamiento de energía necesitamos materiales con diferentes propiedades, en función del elemento de la batería del que vayan a formar parte (electrodos o electrolito) y de la tecnología de almacenamiento que se incorpore.

El óxido de niobio es un material que, utilizado como electrodo, podría revolucionar el mundo de las baterías, gracias a sus propiedades físicas y químicas. No solo permitiría aumentar los ritmos de carga y descarga de la batería de forma segura, sino que además podría aumentar su tiempo de vida. Por otra parte, gracias a su estructura cristalina, permite la inserción de iones más grandes que el litio, como el sodio y el potasio, sin que se produzca un aumento crítico del volumen del material. Podríamos entonces sustituir el litio por elementos más abundantes en la corteza terrestre.

El problema principal del pentóxido de niobio (Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) es su baja conductividad eléctrica. Por tanto, *a priori*, no parece ser el mejor material para usarlo en los electrodos de una batería, donde necesitamos poder mover fácilmente una

corriente de electrones. Sin embargo, en un trabajo realizado gracias a la colaboración entre un grupo de la UCM y un grupo del IO-CSIC y publicado recientemente en la revista *Materials & Design* (DOI: 10.1016/j.matdes.2022.111346), se ha demostrado que es posible **incrementar la conductividad de este óxido en hasta ocho órdenes de magnitud al irradiarlo con un láser de pulsos ultracortos con alta frecuencia de repetición**. Los autores del artículo, las doctoras Belén Sotillo y Rocío Ariza y los



profesores Paloma Fernández (miembro de la RSEF) y Javier Solís, muestran que el incremento de la conductividad se asocia a la deficiencia en oxígeno que genera el láser en el material. Los láseres de pulsos ultracortos logran concentrar una gran cantidad de energía sobre la superficie en un tiempo muy corto, incrementando su temperatura rápidamente hasta valores por encima de los 1000 °C. Las velocidades de enfriamiento son también muy elevadas, lo que permite conseguir un material estable con deficiencia en oxígeno. Visualmente, esta deficiencia en oxígeno se puede detectar rápidamente, ya que el color del material cambia de blanco a azul grisáceo, como se puede ver en la imagen.

Este proceso es rápido y económico, sobre todo si se compara con la energía que consumiría un horno que tuviéramos que mantener a temperaturas por encima de los 1500 °C durante horas. Además, esta estrategia de procesado es versátil y flexible, lo que permitiría extenderla a otros óxidos de metales de transición, reduciendo sensiblemente los costes de producción al disminuir el coste energético. Aunque aún queda mucho trabajo por hacer, tanto el óxido de niobio como otros compuestos de este elemento (niobatos y óxidos mixtos) están adquiriendo cada vez mayor relevancia en el futuro de la industria de baterías.

## LA MATERIA BLANDA EN ESPAÑA Y SU AGLUTINAMIENTO EN LA DIVISIÓN DE FÍSICA DE LA MATERIA CONDENSADA DE LA RSEF

**E**l pasado febrero tuvo lugar en Salamanca la XII Reunión de la División de Física de la Materia Condensada (DFMC-GEFES) de la RSEF, y, por primera vez, el evento contó con una sesión de *soft matter*. Esto refleja el **deseo de la División de que la comunidad española trabajando en este lado de la materia condensada se integre, participe y contribuya a su desarrollo, potenciando la materia condensada en sus múltiples facetas**. Como cualquier otro sistema en este ámbito, la materia blanda está constituida por muchos cuerpos; es la mecánica estadística la que nos permite obtener las propiedades macroscópicas a partir de los estados microscópicos accesibles del sistema. Sin embargo, a diferencia de la más tradicional “materia dura”, epitomizada por el estado sólido, los materiales blandos tienen escalas energéticas comparables con la energía térmica a temperatura ambiente, escalas espaciales mayores a las atómicas o moleculares, y una dinámica con tiempos de relajación mucho más largos que aquellos que caracterizan la dinámica de átomos o moléculas. Esto permite, en muchos casos, utilizando técnicas de microscopía óptica o dispersión de luz, acceder a los estados microscópicos del sistema, difícilmente accesibles en los sistemas atómicos tradicionales. Usando coloides, por ejemplo, se pueden estudiar fenómenos de equilibrio, como la cristalización, o de no equilibrio, como la transición vítrea, aportando conocimiento complementario al obtenido con sistemas atómicos. También hay fases sólidas sin análogo atómico o molecular; el gel coloidal, donde las partículas se agregan irreversiblemente formando estructuras que eventualmente percolan a través del sistema, es un ejemplo. Su crecimiento y estructura se racionalizan utilizando teorías que necesariamente son del no equilibrio. Otro ejemplo es el gel polimérico, o elastómero, o *rubber*, que es un sólido desordenado en equilibrio; esto lo distingue del sólido cristalino, que es ordenado, y del vidrio, que está fuera del

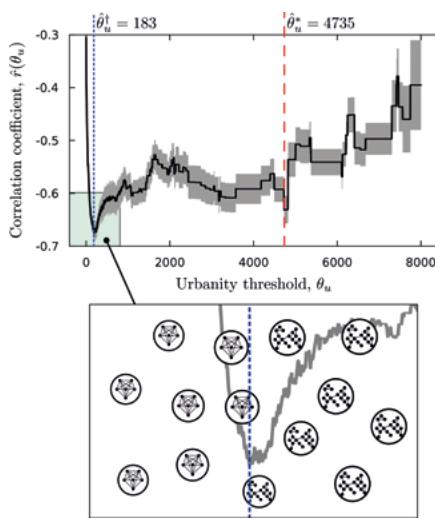
equilibrio. Su estudio se basa en técnicas de equilibrio, pero que incluyen el desorden como ingrediente fundamental. Hoy en día, estos sistemas siguen siendo fascinantes. No en vano, y como en cualquier polímero o sistema polimérico, la entropía juega un papel esencial, dando lugar, por ejemplo, a estructuras de equilibrio no convencionales, como el *gyroid*, y todo dentro del ámbito no dominado por la mecánica cuántica. La emergencia que tan asociada tenemos a sistemas cuánticos, no sin razón, también se da en materiales blandos, pero dentro del ámbito de la mecánica clásica. Además, precisamente por ser blando, es fácil comportarse no-linealmente y necesitar de la física no-lineal para entender el comportamiento del sistema. Es fácil que las propiedades topológicas y geométricas del espacio que confina el material, un cristal líquido, por ejemplo, juegue un papel relevante y dé lugar a defectos topológicos, con analogías a defectos similares en sistemas magnéticos. Es fácil que la estructura y dinámica esté dominada por la física del no equilibrio, como en los sistemas activos, que pueden verse como una versión simple de algunos sistemas biológicos. Más en general, la **materia blanda constituye una vibrante faceta de la materia condensada** que esperamos pueda crecer, desarrollarse y establecer sinergias con la parte más tradicional y mayoritaria que hoy en día constituye la DFMC-GEFES de la RSEF.

Alberto Fernández-Nieves  
Vocal de la Junta de Gobierno  
de la División de Física  
de la Materia Condensada

## DETERMINADO EL TAMAÑO EN EL QUE LA COMPLEJIDAD SOCIAL DE LOS GRUPOS HUMANOS DA UN SALTO CUALITATIVO

**Q**ué es un pueblo? ¿Y una ciudad? Sabemos que se diferencian en el número de habitantes, pero intuimos que, a medida que los humanos nos organizamos en grupos de tamaños más grandes, nuestro comportamiento colectivo cambia de modo cualitativo.

Un equipo de la Universidad de Santiago de Compostela, formado por Martín Saavedra, Jorge Mira (miembro de la RSEF) y Alberto P. Muñoz, junto con el Centro Nacional de Biotecnología-CSIC (Luís F. Seoane) ha publicado un artículo en la revista *Chaos, Solitons & Fractals* (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960077923002904>) donde han desarrollado **un método para medir cómo cambia la complejidad de un grupo de personas en función de su número**. Al aplicar este análisis en Galicia han descubierto que **se producen saltos bruscos en este aumento de la complejidad para ciertos números de miembros**.



Los autores midieron la velocidad a la que varía el número de hablantes de gallego y de castellano en grupos sociales de diferente tamaño. Los grupos más pequeños cambian más rápido porque su estructura social sencilla permite alcanzar consensos con más facilidad. Con esto, se elaboró un “espectro de complejidad” con el que se descubrieron escalas singulares alrededor de 180 y 5000 habitantes, en las que la complejidad de la red social sufre un acelerón. Ambos números son significativos en el estudio de la complejidad de grupos humanos, siendo 180 es el más destacado, por su proximidad al llamado número de Dunbar, que marca un límite cognitivo a la cantidad de “amigas” que una persona puede tener. Por encima de este número resultaría más complicado prestar la atención suficiente a nuestras relaciones, que acabarían colapsando. Investigaciones previas han mostrado cómo animales

con diferentes capacidades cognitivas tienen un número de Dunbar acorde, lo cual condiciona el tamaño de los grupos que pueden establecer. Esta investigación muestra que **los humanos desarrollamos grupos por encima de ese límite cognitivo a costa de que nuestras redes sociales se vuelvan mucho más complejas**.

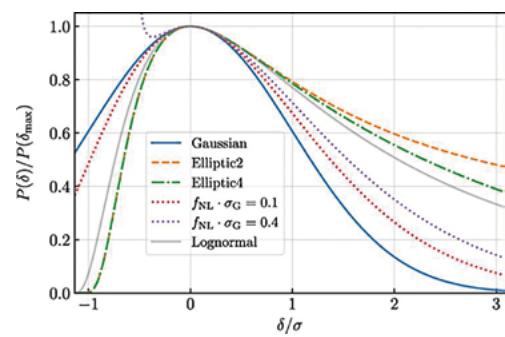
Como curiosidad, la otra escala singular detectada es cercana a 5040, el número que Platón identificó como el tamaño ideal de su polis utópica.

## EL ORIGEN DE LAS GALAXIAS DETECTADAS POR EL JWST Y LOS CÚMULOS MASIVOS COMO EL GORDO

**L**a cuestión de cómo se formaron las grandes estructuras del universo —galaxias, cúmulos, agujeros negros, etc.— es una de las más antiguas en cosmología. Sin embargo, a partir de la década de 1980, los cosmólogos se dieron cuenta de un elemento clave en este proceso: las fluctuaciones cuánticas. Estas fluctuaciones son cambios de energía localizadas en el espacio-tiempo que, de acuerdo con el modelo de inflación, fueron determinantes para formar lo que más tarde se convertiría en los grumos de materia de nuestro universo. Sin ellas, el universo sería una sopa uniforme de materia y energía. La inflación cósmica es una propuesta muy popular para explicar la rápida expansión del universo en sus instantes iniciales de vida, que, entre otras virtudes, sirve para estirar estas fluctuaciones cuánticas desde escalas subatómicas a distancias cosmológicas.

**Hasta hace poco se creía que las grandes estructuras que hoy observamos en nuestro universo, como cúmulos masivos, con decenas de miles de galaxias, necesariamente tendrían que haberse formado cuando el universo era ya maduro.** Esto es debido a que partiendo de una distribución inicial de fluctuaciones cuánticas que siguiera la famosa campana de Gauss, la atracción gravitatoria no sería lo suficientemente fuerte para formar tan rápido estructuras tan grandes.

Sin embargo, un nuevo resultado publicado en *Physical Review Letters* (<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.130.121003>), obtenido por José María Ezquiaga, del Instituto Niels Bohr, y Juan García-Bellido, del Instituto de Física Teórica UAM/CSIC (ambos miembros de la RSEF), junto con Vincent Vennin, de la Universidad de París, arroja una explicación de la **existencia de grandes estructuras muy tempranas, que datan de cuando el universo tenía tan solo 200 a 400 millones de años y que “no deberían estar ahí”** según nuestro modelo estándar de la cosmología. Esta propuesta serviría para explicar, entre otras observaciones, “El Gordo”, que es el cúmulo de galaxias distantes más grande jamás observado con los telescopios existentes.



Distribuciones gaussianas, elípticas, fNL-local y lognormales, como función del contraste normalizado  $\delta/\sigma$ , donde  $\sigma$  es la desviación estándar de la distribución correspondiente.

Para esta propuesta, de nuevo, **las fluctuaciones cuánticas están en el centro de la cuestión**. Los investigadores se dieron cuenta de que, aplicando ecuaciones de tipo Fokker-Planck, que permiten seguir la dinámica de inflación un poco más allá, incluyendo la difusión cuántica, lo que se obtiene en realidad es una distribución no-gausiana, que presenta una región “de cola” alta. Lo interesante de esta propuesta es que, gracias a estas colas no-gaussianas exponenciales, se puede dar explicación, por ejemplo, de galaxias muy tempranas detectadas recientemente por el Telescopio Espacial James Webb. Del mismo modo, la difusión cuántica también hace la interesante predicción de una supresión de la estructura a pequeña escala, por debajo del tamaño de una galaxia. Curiosamente, este efecto podría aliviar las tensiones entre el “modelo estándar” de cosmología y el número observado de subestructuras.