

Puntos de interés

Descripción breve y sencilla de iniciativas docentes en nuestros colegios e institutos que han de ser resaltadas, de investigaciones relevantes de autores españoles o de extranjeros en instituciones españolas, y de otros hechos interesantes sobre ciencia y enseñanza, políticas educativa y científica y sus actores¹

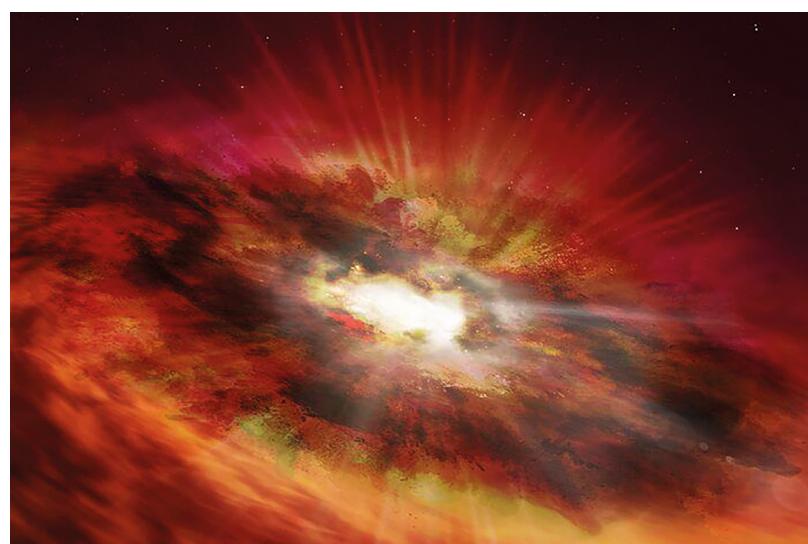
DESCUBIERTO UN PRECURSOR DE AGUJERO NEGRO SUPERMASIVO EN LOS CONFINES DEL UNIVERSO

Desde que se descubriera la presencia de agujeros negros supermasivos en el universo primitivo (tan sólo 700 millones de años después del Big Bang), con masas equivalentes

Ahora, un equipo internacional de astrónomos, en el que ha participado Luis Colina Robledo, investigador del CAB (CSIC-INTA), ha informado, en un reciente artículo publicado en *Nature* (DOI:10.1038/s41586-022-04454-1), del descubrimiento de GNz7q* (ver nota acerca del nombre), que es el primer agujero negro de rápido crecimiento detectado en el universo primitivo. Los datos de archivo de la Cámara Avanzada para Sondeos del Telescopio Espacial Hubble han ayudado a deter-



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



Reproducción artística de GNz7q que ilustra la presencia de un cuásar en el núcleo de una galaxia en formación, rodeado por nubes de gas y polvo que son expulsadas por efecto de la presión de radiación del cuásar. (Imagen: ESA/Hubble, N. Bartmann.)

a cientos de millones de soles, la comunidad astronómica ha intentado comprender cuál es el proceso que hace que aparezcan. Aunque tanto la teoría como las simulaciones por ordenador predicen la existencia de agujeros negros de rápido crecimiento, galaxias tempranas con gran contenido de polvo y gas, y con una gran actividad de formación de estrellas (conocidas como galaxias *starburst*, con estallido estelar), nunca antes se habían observado en sus etapas iniciales.

minar que GNz7q existió solo 750 millones de años después del Big Bang.

Las teorías actuales predicen que los agujeros negros supermasivos comienzan sus vidas en los núcleos polvorrientos de galaxias con estallido estelar antes de expulsar el gas y el polvo circundantes yemerger como cuásares extremadamente luminosos.

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

* El nombre GNz7q corresponde a la abreviatura (GN) del campo cosmológico en el que se encuentra, GOODS-North, seguido del símbolo del desplazamiento al rojo (*redshift, z*) más el primer dígito del *redshift* medido (7.1899), y acabando con la letra que identifica su clasificación como cuásar (*q*).

Aunque son extremadamente raros, tanto estas galaxias como los cuásares luminosos se han detectado en el universo temprano. El equipo cree que **GNz7q podría ser el primer ejemplo del «eslabón perdido» entre estas dos clases de objetos, el precursor de los agujeros negros supermasivos que observamos en épocas posteriores.** La galaxia anfitriona de GNz7q está formando estrellas que equivalen a una masa de 1.600 masas solares por año, y GNz7q brilla en longitudes de onda ultravioleta, pero se observa de forma muy débil en longitudes de onda de rayos X. Estas medidas, al igual que el brillo de la galaxia anfitriona en longitudes de onda infrarrojas, son interpretadas como que GNz7q es un agujero negro de rápido crecimiento aún oscurecido por las grandes cantidades de gas y polvo que albergan las regiones de formación estelar en el núcleo de la galaxia. “Las propiedades de GNz7q a lo largo del espectro electromagnético concuerdan de una forma excelente con las predicciones de las simulaciones teóricas”, comenta Seiji Fujimoto, astrónomo en el Instituto Niels Bohr de la Universidad de Copenhague y autor principal del descubrimiento.

Además de la importancia de este objeto para comprender los orígenes de los agujeros negros supermasivos, este descubrimiento es importante por su ubicación en el campo GOODS Norte del Hubble. Pese a ser una de las áreas más escrutadas del cielo nocturno, GNz7q ha permanecido inadverti-

do hasta ahora. Detectar su presencia fue posible gracias a los conjuntos de datos de múltiples longitudes de onda y excepcionalmente detallados ofrecidos por GOODS-Norte, un sondeo astronómico que combina observaciones profundas de varios telescopios espaciales y terrestres.

Sin esta riqueza de datos, habría sido fácil pasar por alto a GNz7q, ya que carece de las características distintivas que generalmente se usan para identificar cuásares en el universo temprano. Ahora, el equipo espera buscar objetos similares de manera sistemática llevando a cabo sondeos con las cámaras de alta resolución angular del Telescopio Espacial James Webb (JWST) de NASA/ESA/CSA, lanzado el pasado 25 de diciembre y en el proceso final de puesta en marcha en órbita antes de iniciar observaciones (<https://go.nasa.gov/3syqr3V>).

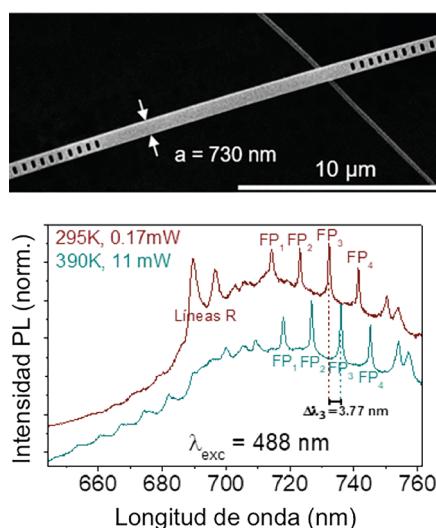
“La sensibilidad, nitidez y el rangopectral infrarrojo del JWST serán esenciales para detectar objetos similares a GNz7q y poder esclarecer las fases iniciales de la formación de agujeros negros supermasivos en el universo temprano, cuando tenía una edad del 5 % de la actual” comenta Luis Colina Robledo, miembro del equipo descubridor de GNz7q, y miembro del equipo del instrumento de infrarrojo medio (MIRI) del JWST.

UN TERMÓMETRO DE AMPLIO RANGO HECHO CON NANOHILOS DE ÓXIDO DE GALIO

Los sensores de temperatura a escalas micro- y nanométricas en modo remoto, es decir, en los que no hacen falta conexiones al elemento sensible a la temperatura, son clave en campos de investigación y tecnología como la fotónica, electrónica, energía o biomedicina. La dependencia con la temperatura de las propiedades ópticas de ciertos materiales es uno de los mecanismos más utilizados para obtener este tipo de sensores.

Una investigación publicada en la revista *Small* (DOI: 10.1002/smll.202105355) y liderada por los investigadores Manuel Alonso Orts, Daniel Carrasco, Emilio Nogales y Bianchi Méndez, del grupo de Física de Nano-

materiales Electrónicos (FINE) de la UCM, en colaboración con los investigadores José M. San Juan y María Luisa Nóbrega de la UPV/EHU y Alicia de Andrés del ICMM-CSIC, ha demostrado una novedosa aproximación para crear un termómetro basado en nanohilos de óxido de galio dopados con cromo. Esta aproximación permite ampliar sensiblemente uno de los parámetros más importantes en esta nueva generación de termómetros: el rango de temperaturas en el que puede funcionar.



La idea en la que se basa el sistema de detección propuesto es la combinación de dos fenómenos ópticos. El primero de ellos es la luz característica emitida por iones cromo, Cr^{3+} , incluidos como dopantes ópticamente activos en el Ga_2O_3 . Estos iones son los responsables de unas líneas de emisión de luz muy estrechas, con una longitud de onda muy bien definida: las denominadas líneas R, en las que se basa por ejemplo el primer láser de la historia, el de rubí. La longitud de onda de las líneas R del cromo en este y otros óxidos se desplaza al variar la temperatura, lo cual se había estudiado previamente. Sin embargo, mediante este mecanismo, el rango de temperaturas abarcable en el óxido de galio se limita a temperaturas similares o inferiores a la temperatura ambiente.

En el óxido de galio, los iones de cromo emiten tanto las anteriormente mencionadas líneas R como una banda ancha que abarca el rojo y parte del infrarrojo. El segundo mecanismo de nanotermometría utilizado en este trabajo se basa en el confinamiento de

la luz de dicha banda ancha y permite ampliar el rango medible de temperaturas en gran medida.

Para ello, en los extremos del nanohilo se han diseñado, simulado y fabricado unos patrones periódicos de agujeros que dan lugar a dos reflectores de Bragg (*distributed Bragg reflectors*, DBR) mediante un haz de iones focalizado (*focused ion beam*, FIB). Al excitar la emisión del nanohilo con un láser, ésta se refleja en los dos reflectores, quedando confinada en el espacio entre ambos, lo que da lugar a resonancias ópticas en la banda ancha de emisión del Ga_2O_3 : Cr.

La posición exacta de las resonancias depende de la longitud de la cavidad y del índice de refracción del material. Como estos dos parámetros se ven afectados por la temperatura, las longitudes de onda de estas resonancias se desplazan al variar la temperatura, lo cual se ha estudiado y medido desde 150 K hasta unos 550 K, máxima temperatura alcanzable con el sistema experimental utilizado. Es esperable que se pueda seguir utilizando a temperaturas muy superiores.

Por tanto, la combinación de los dos mecanismos da la posibilidad de abarcar un rango muy amplio de temperaturas con un sistema que tiene dimensiones de unas pocas micras, lo que permite una alta resolución espacial. La resolución en temperaturas es alrededor de 1 K, comparable al de otros sistemas que se basan en principios de medida diferentes.

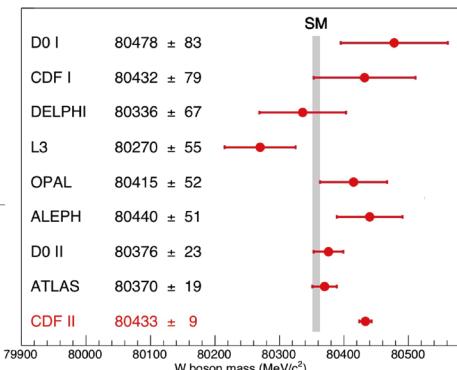
LA TENSIÓN CON EL MODELO ESTÁNDAR DEBIDA A LA MEDIDA PRECISA DE LA MASA DEL BOSÓN W

El modelo teórico que rige el comportamiento del Universo a escalas subnucleares es el denominado Modelo Estándar de la Física de Partículas, teoría de las componentes elementales y las fuerzas fundamentales de la materia conocida.

El modelo, que culminó con el descubrimiento del bosón de Higgs, es muy robusto, y sus predicciones han sido verificadas con altísima precisión. Sin embargo, solo puede explicar el 4 % de la materia-energía del Universo y plantea muchas preguntas fundamentales. Es

una teoría efectiva muy potente, pero que requiere extenderse para poder explicar el Universo de forma completa.

En el modelo, los mediadores de la fuerza nuclear débil son los bosones Z , W^+ y W^- . La masa del W se puede obtener a partir de la constante de es-



tructura fina, la constante de Fermi y la masa del Z . La masa del quark top y la masa del bosón de Higgs se incluyen en correcciones teóricas de mayor orden, **prediciendo $M_W = 80357 \text{ MeV}/c^2$, con precisión del 0,01 %, 6 MeV/c^2** , por lo que los experimentos deben enfrentarse a una precisión del mismo orden.

Recientemente se ha publicado en la revista *Science* (DOI: 10.1126/science.abk1781), por la colaboración CDF del laboratorio Fermilab en Chicago (EE. UU.), la medida de mayor precisión de la masa del bosón W . En este estudio han participado los investigadores A. Ruiz, B. Casal, G. Gómez, J. Vizán, L. Scodellaro, R. Vilar (IFCA, CSIC-Universidad de Cantabria), E. Palencia, J. Cuevas (Universidad de Oviedo), I. Redondo, J. P. Fernández, O. González, (CIEMAT), L. Ortolán, S. Camarda (IFAE, UAB).

El detector CDF es muy hermético y está constituido por cientos de miles de elementos de detección. La cámara central de trazas, rodeada de un gran solenoide, mide el momento lineal de las partículas de las colisiones protón-antiproton. Los calorímetros electromagnéticos, seguidos de los hadrónicos, miden la energía de electrones, fotones y hadrones. Finalmente, las cámaras de muones miden las trayectorias de los mismos. Otros elementos completan el conjunto del sistema experimental.

Se seleccionaron más de cuatro millones de bosones W , con sólo un 0,5 % de sucesos mal identificados y aproxi-

madamente 300.000 bosones Z , decayendo leptónicamente en ambos casos.

La **calibración y alineamiento**, del orden de micras, de la cámara de trazas, consistente en más de treinta mil elementos, se realizó con 450.000 muones cósmicos. Las ligeras **deformaciones o falta de uniformidad del campo magnético** se corrigieron con medidas de la masa de partículas J/ψ y Υ , y se **validó utilizando los bosones Z** . Los calorímetros se calibraron comparando las medidas de energía y de momento lineal y validando con bosones Z .

Se generaron sucesos **simulados de acuerdo al modelo estándar**, para extraer la masa del W de las comparaciones de diversas distribuciones cinemáticas. La propia cinemática de los bosones W depende de las **distribuciones de momento de los quarks y antiquarks componentes**, obtenidas de datos de otros experimentos previos. Esta componente del análisis es la que más contribuye al error sistemático final.

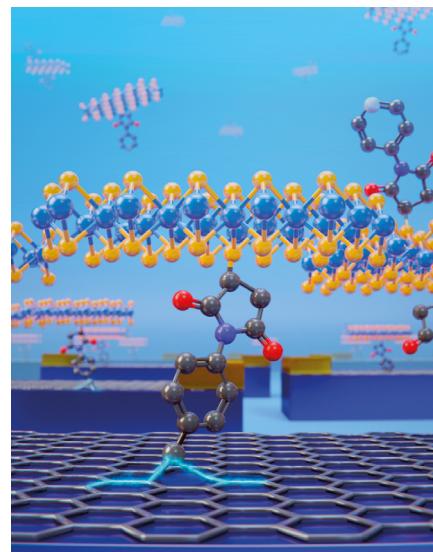
Tras todas las correcciones se obtuvo un **resultado final de $M_W = 8433 \text{ MeV}/c^2$ con una precisión de 9 MeV/c^2** . Este valor se desvía del valor esperado por el modelo estándar por 7 **sigmas**. Además, cuando se compara el resultado con los de otros experimentos previos, realizados con menor precisión, se observa una cierta tensión, aunque no son totalmente incompatibles.

Por ello es necesario verificar los resultados de CDF con los de otros experimentos del acelerador LHC, lo cual se está realizando actualmente. El modelo estándar se encuentra a la espera de poder confirmar, o no, si las medidas de CDF son válidas y, en consecuencia, se abre el campo a **discusiones sobre modelos teóricos de nueva física**, o correcciones en las predicciones teóricas presentes del modelo estándar, que ajusten mejor los resultados obtenidos.

MÁS ALLÁ DE “VAN DER WAALS”: PRÓXIMA GENERACIÓN DE HETEROESTRUCTURAS 2D-2D COVALENTES

El método más extendido para la síntesis de heteroestructuras 2D-2D es el crecimiento directo de

materiales, uno encima del otro. Las estructuras 2D son materiales en capas atómicamente delgadas, de unos pocos átomos de espesor, que se pueden apilar para construir heteroestructuras funcionales. En tales estructuras construidas por deposición atómica, las capas 2D están débilmente unidas por las interacciones de “van der Waals” y se pueden desmontar al someterse a algunos disolventes o procesos térmicos. La **falta de control sobre la interfaz de los dos materiales**, en términos de comunicación electrónica, naturaleza química o distancia entre capas, **impide la construcción de dispositivos robustos**.



Las estructuras 2D de MoS_2 están conectadas al grafeno mediante un enlace covalente. (Imagen: Patricia Bondía.)

Un equipo de investigadores liderado por Emilio M. Pérez y Enrique Burzurí en IMDEA Nanociencia y la Universidad Autónoma de Madrid, respectivamente, han **conectado covalentemente por primera vez capas de materiales 2D: MoS_2 y grafeno**. El equipo ha utilizado las herramientas de la química sintética para “coser” varios copos de MoS_2 a dispositivos de grafeno de una sola capa, utilizando un “velcro molecular”: una **molécula bifuncional con dos puntos de anclaje covalente**. Los resultados, publicados ahora en *Nature Chemistry* (DOI: 10.1038/s41557-022-00924-1) muestran que las propiedades electrónicas finales de la heteroestructura están dominadas por la interfaz molecular.

La combinación de las propiedades semiconductoras del dicalcogenuro de metales de transición MoS_2 con la alta movilidad portadora del grafeno es particularmente atractiva para las aplicacio-

nes. El grupo construyó transistores de efecto de campo (FET) para probar las propiedades eléctricas de la estructura. Encontraron una modificación en la característica de voltaje de puerta, con un cambio del cono de Dirac hacia voltajes positivos y una reducción de la corriente en el mínimo. Esta supresión de corriente en el grafeno se asocia inequívocamente a la transformación de la hibridación sp^2 en sp^3 debido a la formación de enlaces covalentes. Un experimento de control con MoS_2 prístino suspendido sobre grafeno no mostró cambios significativos en la intensidad de la banda D. Curiosamente, **la movilidad del portador de carga se conserva después de la funcionalización** y la formación de enlaces covalentes entre MoS_2 y el grafeno, **siendo el grado de dopaje de grafeno controlable a través del grado de funcionalización**.

Los resultados muestran el poder del enfoque químico para construir heteroestructuras de grafeno MoS_2 más allá de van der Waals, preservando la movilidad portadora del grafeno con miras hacia dispositivos FET de alto rendimiento. La conexión covalente vertical aporta un impulso adicional a las propiedades finales de los nanodispositivos más allá de las propiedades intrínsecas de los materiales, y tiene el potencial de una fácil homologación de alto rendimiento.

IMDEA Nanociencia Outreach Office
divulgacion.nanociencia@imdea.org

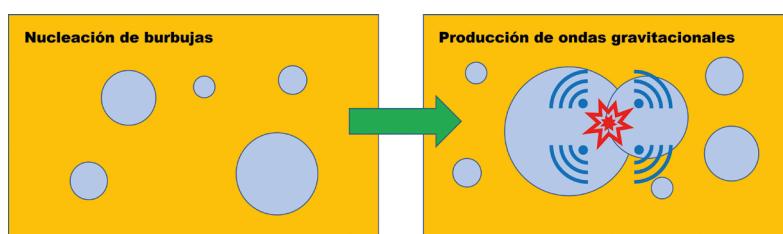
PRODUCCIÓN DE ONDAS GRAVITACIONALES EN EL BIG BANG A PARTIR DE DUALES HOLOGRÁFICOS

Un observatorio de ondas gravitacionales de 2.5 millones de kilómetros de longitud podría arrojar luz sobre la física a escalas inferiores a la milésima parte del radio del protón. La Agencia Espacial Europea continúa con sus planes de lanzar la misión LISA, un interferómetro láser diseñado para detectar ondas gravitacionales en el espacio. Gracias a la enorme separación entre los satélites que componen LISA, será posible detectar ondas gravitacionales de frecuencias mucho menores que las detectadas en interferómetros terrestres, como LIGO, Virgo o KAGRA. En particular, LISA podría de-

tectar ondas gravitacionales producidas durante los primeros instantes del Big Bang, cuando la materia en el Universo se encontraba comprimida a distancias similares a las exploradas por el acelerador de partículas LHC del CERN.

La detección de ondas gravitacionales asociadas a una transición de fase durante el Big Bang sería una indicación de física más allá del Modelo Estándar de Partículas. El Modelo Estándar predice una evolución suave de la materia durante el enfriamiento

Helsinki Institute for Physics (HIP) de la Universidad de Helsinki y el Instituto de Ciencias y Tecnologías Espaciales de Asturias (ICTEA) de la Universidad de Oviedo, cuyos integrantes son los Drs. F. R. Ares (HIP & U. Sussex), O. Henriksson (HIP), M. Hindmarsh (HIP & U. Sussex), C. Hoyos (ICTEA) y N. Jokela (HIP). Los resultados sugieren que el sector fuertemente acoplado tendría que alcanzar un grado muy elevado de superenfriamiento antes de producirse la nucleación de burbujas, pero la producción de una señal



inducido por la expansión cosmológica en el Big Bang, lo cual no daría lugar a una señal de ondas gravitacionales detectable. Sin embargo, extensiones del modelo estándar permiten una transición de fase a escalas de energía similares a las alcanzadas en el LHC. En este escenario se produciría la nucleación de burbujas de la fase de baja temperatura, que al expandirse y colisionar sus superficies, generarían una cantidad suficiente de ondas gravitacionales como para ser detectadas por LISA.

Para identificar correctamente la señal de ondas gravitacionales producidas por una transición de fase en el Big Bang es necesario estudiar sus posibles características mediante modelos teóricos. **Una posible dificultad es que el sector responsable de la transición esté fuertemente acoplado, invalidando gran parte de las herramientas teóricas de que disponemos para tratar este tipo de teorías.** En este aspecto es especialmente útil la conocida como dualidad holográfica, que establece un mapa entre la teoría fuertemente acoplada y una teoría débilmente acoplada en un número mayor de dimensiones, de tal forma que el problema se vuelve tratable.

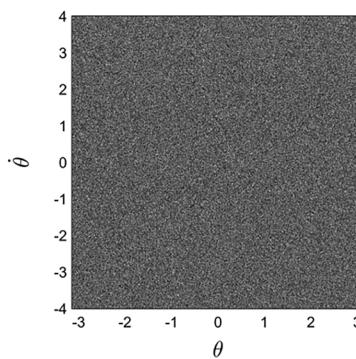
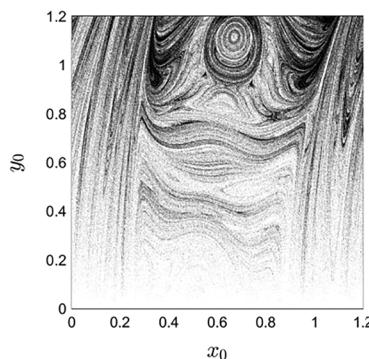
En un reciente trabajo publicado en *Physical Review Letters* (DOI: 10.1103/PhysRevLett.128.131101), la **dualidad holográfica se ha utilizado para describir por primera vez la nucleación de burbujas por un sector fuertemente acoplado durante el Big Bang.** El trabajo es fruto de una colaboración entre el

observable aún sería posible.

LA ENTROPIA DE LA CUENCA NOS AYUDA A CLASIFICAR LAS CUENCIAS DE ATRACCIÓN

Desde sistemas de agujeros negros binarios a un simple péndulo forzado, muchos sistemas de interés en física son multiestables. Así, dependiendo de las condiciones iniciales, la dinámica puede llevar al sistema a comportarse de diferentes maneras. **Las denominadas cuencas de atracción representan gráficamente esta relación entre condiciones iniciales y estados asintóticos del sistema.** Existen muchos tipos de cuencas de atracción con diferentes características geométricas y topológicas. Por ejemplo, los sistemas caóticos suelen presentar cuencas fractales, lo que dificulta la predicción del sistema a largo plazo. A su vez, dentro de las cuencas fractales, han aparecido diferentes cuencas paradigmáticas en los últimos años: agujereadas, con la propiedad de Wada, entremezcladas...

En un reciente artículo publicado en la revista *Chaos Solitons and Fractals* (DOI: 10.1016/j.chaos.2022.112112), físicos del Grupo de Dinámica No Lineal y Sistemas Complejos de la Universidad Rey Juan Carlos han propuesto un **sistema de clasificación de las cuencas de**



atracción basado en la llamada **entropía de las cuencas**. Este concepto surgió en el año 2016 con la idea de cuantificar la imprevisibilidad asociada a las cuencas de atracción. La entropía se calcula sobre una partición de las cuencas de atracción, y su valor da una medida cuantitativa de lo difícil que resulta predecir el estado final del sistema dada una cierta incertidumbre en la determinación de las condiciones iniciales.

Existen tres ingredientes principales que contribuyen a la entropía de las cuencas y por tanto a su imprevisibilidad: el número de atractores, la dimensión fractal de las fronteras entre las cuencas y la conectividad de las cuencas. Usando este marco teórico, se puede ver que los **principales tipos de cuencas de atracción son casos en los que uno o varios de los ingredientes que contribuyen a la entropía de las cuencas toman valores extremos** (máximos o mínimos). Por ejemplo, las cuencas que tienen la propiedad de Wada maximizan el número de atractores que separan sus fronteras, las cuencas agujereadas poseen fronteras cuya dimensión fractal es máxima y las cuencas entremezcladas poseen las dos características anteriores. Además, la entropía de las cuencas permite distinguir entre diferentes casos dentro de cada categoría. Por ejemplo, en la figura que acompaña este artículo pueden observarse dos cuencas agujereadas, lo que significa que la dimensión de la frontera que separa las cuencas es exactamente igual a dos en ambos casos. No obstante, podemos diferenciar ambas figuras claramente y, de hecho, su entropía es diferente (mayor en el caso más aleatorio).

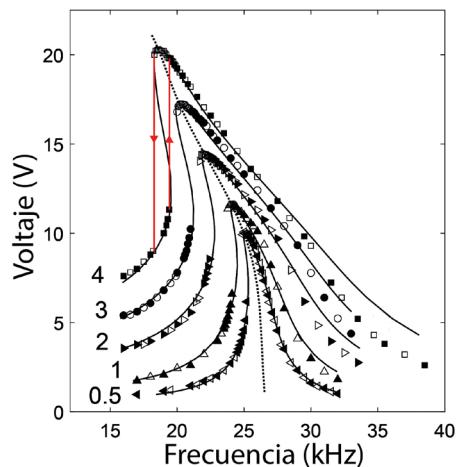
Este trabajo sirve para reforzar la idea de que la entropía de las cuencas es una herramienta fundamental en el estudio de los sistemas dinámicos multiestables, y proporciona una mejor comprensión de la naturaleza de la imprevisibilidad asociada a cada tipo de cuenca.

OSCILADOR NO LINEAL: UN EXPERIMENTO SENCILLO PARA VISLUMBRAR LA COMPLEJIDAD

La modelización de muchos problemas de interés en Física está directamente ligada o involucra conceptos relacionados con el análisis de osciladores mecánicos o electromagnéticos no lineales. La mayoría de osciladores reales sólo son lineales en el rango de bajas amplitudes y, lo que es más relevante, la **nolinealidad introduce nuevos fenómenos físicos**, como histéresis, saltos de amplitud, oscilaciones forzadas sub o ultraharmónicas, transiciones al caos, etc. Algunas aplicaciones recientes relacionadas con osciladores no lineales incluyen el aumento del ancho de banda en la transmisión inalámbrica de potencia, el estudio de las vibraciones que aparecen en puentes de ferrocarril o la descripción de nano resonadores mecánicos de grafeno. A pesar de su importancia, el estudio de las oscilaciones no lineales está infrarrepresentado en los planes de estudio, tanto por las dificultades matemáticas inherentes a su descripción como por la complejidad de los sistemas experimentales. Sin embargo, hay modelos sencillos que permiten introducir el estudio teórico y experimental de osciladores no lineales en cursos universitarios de grado.

Los resonadores basados en un circuito serie RLC son particularmente convenientes desde el punto de vista experimental porque sus parámetros se pueden variar con facilidad y tanto la amplitud como la fase de la corriente, o el potencial, se pueden medir cómodamente y con precisión. En un trabajo recientemente publicado en la revista de enseñanza *European Journal of Physics* (DOI: 10.1088/1361-6404/ac56b3) por Julio Pellicer-Porres y Miguel Vicente Andrés, del Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Valencia, se describe un **experimento basado en un circuito RLC no lineal**, adecuado para un laboratorio del Grado en Física. La no linealidad se introduce substituyendo el condensador por un diodo polarizado inversamente, que se comporta como un condensador variable no lineal dependiente de la amplitud del voltaje (varactor). Se propone usar un fotodiodo en oscuridad para que el área de la unión sea grande, la capacidad de algún nanofaradio, y que de ese modo el circuito resuene en el rango conveniente de las decenas de kHz. La descripción matemática se simplifica utilizando los conceptos de **potencial ligeramente anarmónico** y **curva esqueleto**, que relaciona la frecuencia de resonancia con la amplitud de las oscilaciones.

sics (DOI: 10.1088/1361-6404/ac56b3) por Julio Pellicer-Porres y Miguel Vicente Andrés, del Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Valencia, se describe un **experimento basado en un circuito RLC no lineal**, adecuado para un laboratorio del Grado en Física. La no linealidad se introduce substituyendo el condensador por un diodo polarizado inversamente, que se comporta como un condensador variable no lineal dependiente de la amplitud del voltaje (varactor). Se propone usar un fotodiodo en oscuridad para que el área de la unión sea grande, la capacidad de algún nanofaradio, y que de ese modo el circuito resuene en el rango conveniente de las decenas de kHz. La descripción matemática se simplifica utilizando los conceptos de **potencial ligeramente anarmónico** y **curva esqueleto**, que relaciona la frecuencia de resonancia con la amplitud de las oscilaciones.



A modo de ejemplo, la figura muestra las curvas de resonancia obtenidas para amplitudes del generador entre 0.5 y 4 V. El voltaje representado en la ordenada es la amplitud medida en el condensador. El máximo de la resonancia sigue la curva esqueleto representada por la línea punteada. La pseudo lorenziana se deforma al aumentar la amplitud del generador, mostrando la no linealidad. La histéresis se evidencia con las líneas verticales rojas. Si se parte de frecuencias bajas y se aumenta la frecuencia (símbolos rellenos) se produce un salto de amplitud antes de llegar al máximo de la resonancia. Al disminuir la frecuencia desde valores altos (símbolos huecos), se observa una caída brusca del voltaje al poco de pasar por la resonancia. Las líneas continuas se corresponden con ajustes a un modelo sencillo.