



## Primera demostración de estados de borde topológicos de sublongitud de onda profunda

El ICFO lidera la primera demostración experimental de un estado de borde topológico de sublongitud de onda profunda dentro de un sistema nanofónico, un hito en el campo de la nanofónica topológica.

September 03, 2024

Los sistemas topológicos son una clase fundamental y versátil de sistemas físicos, omnipresentes en muchos campos de la física y con implicaciones de gran alcance tanto para la investigación fundamental como para los avances tecnológicos aplicados. Estos sistemas se caracterizan por propiedades que los hacen resistentes a las perturbaciones. En términos más simples, poseen ciertas cualidades que no se ven fácilmente afectadas por factores externos, como el desorden o cambios en otras condiciones físicas.

Esta resistencia a las perturbaciones es lo que hace que los sistemas topológicos sean tan importantes en física, ya que significa que su comportamiento puede ser muy predecible y

confiable en una amplia gama de condiciones. De particular interés son los estados de borde topológicos: estados que existen en el límite de un material y que no pueden suprimirse sin romper la simetría de este.

### **Nanofotónica topológica: desafíos y oportunidades**

La comunidad científica, típicamente atraída por aquellos desafíos que son complejos a la par que prometedores, ha visto en la tarea de llevar las propiedades topológicas a la nanoescala un desafío de lo más atractivo. Complejo debido a los extremos límites espaciales requeridos para manipular el campo electromagnético; y prometedor por las consecuencias esperadas, siendo a la vez fundamentales y aplicadas.

Para empezar, miniaturizar las propiedades topológicas a escalas físicas tan pequeñas (en la jerga, el **regimen de sublongitud de onda profunda**) permitiría a la comunidad científica explorar fenómenos físicos exóticos (no linealidades, no localidad, interacciones multimodales...) que se espera que surjan bajo estas circunstancias. Desde un punto de vista más práctico, la robustez y protección inherentes en los sistemas topológicos se pueden aprovechar para desarrollar componentes ópticos de sublongitud de onda profunda más resistentes, como [nanocavidades](#) o guías de ondas tolerantes a las irregularidades de fabricación.

A pesar del progreso experimental dirigido a lograr estados de borde topológicos en el régimen de sublongitud de onda profunda, cada plataforma propuesta presenta algunos beneficios así como algunos inconvenientes importantes, manteniendo el estatus de "tema candente" en la búsqueda de la solución definitiva.

Un equipo internacional compuesto por investigadores del ICFO **Lorenzo Orsini**, **Dr. Hanan Herzog Sheinfux**, **Matteo Ceccanti**, **Karuppasamy Soundarapandian**, dirigidos por el **Prof. ICREA del ICFO Dr. Frank H. L. Koppens**, y en colaboración con la Universidad de Cornell, el CNRS, la Universidad de Cambridge y la Universidad Estatal de Kansas, ha informado ahora en un artículo de Nature Nanotechnology sobre un avance sustancial en este sentido. **Por primera vez, han demostrado un estado de borde topológico de sublongitud de onda profunda dentro de un sistema nanofotónico**, donde la plataforma elegida -normalmente no considerada por la comunidad de nanofotónica topológica- se basó en los llamados fonones-[polaritones](#) hiperbólicos (abreviado HPhP por las siglas en inglés). No solo consiguieron limitar la luz a escalas de tamaño tan pequeñas, sino que **también mantuvieron factores de alta calidad** durante todo el proceso.

### **¿Por qué fonones-polaritones hiperbólicos?**

Los fonones-polaritones hiperbólicos son un tipo de excitación electromagnética colectiva que se produce en materiales hiperbólicos, donde las ondas electromagnéticas (fotones) se acoplan con los cuantos de vibraciones dentro de la red atómica de un material (fonones ópticos). Estos HPhP permiten confinar y guiar la luz en volúmenes muy pequeños o a lo

largo de superficies.?

Gracias a sus características especiales, los HPhP superan los desafíos que enfrentaban los métodos anteriores para estudiar propiedades topológicas a nanoescala. Estas limitaciones incluyen, por ejemplo, una alta absorción óptica -que es perjudicial para alcanzar el régimen de sublongitud de onda profunda en el caso de los polaritones plasmónicos-, dificultades de fabricación y la necesidad de temperaturas criogénicas -que dificultan la realización de estados topológicos en el caso del [grafeno](#).

Con los **fonones-polaritones hiperbólicos**, estos problemas se minimizan, ya que **exhiben una baja absorción incluso a temperatura ambiente y pueden ser relativamente fáciles de fabricar**. Estas características, junto con el hecho de que **permiten un alto confinamiento en volumen**, otorgan a los HPhP excelentes características de rendimiento. Pero por muy atractivos que parezcan, los HPhP han permanecido en gran medida inexplorados para aplicaciones topológicas debido a su naturaleza profundamente compleja, lo que ha obstaculizado el desarrollo teórico en esta área.

Sin embargo, el equipo vio en los fonones-polaritones hiperbólicos un gran potencial, y su ambicioso objetivo los impulsó a actuar. ¿Al inicio del proyecto, no estaba claro cómo e manifestarían estos estados de borde y qué propiedades específicas exhibirían?, comparte Lorenzo Orsini, primer autor del artículo. ¿Aunque anticipábamos su formación, observarlos finalmente en nuestros experimentos fue una confirmación fascinante de nuestras expectativas y un desarrollo apasionante en el campo

### **El experimento que condujo al éxito**

Para permitir la aparición de estados de borde topológicos, el equipo construyó una plataforma de red polaritónica unidimensional.

Primero, definieron claramente agujeros rectangulares perforados periódicamente a través de una película de oro de 10 nanómetros. Por encima de eso, colocaron escamas de nitruro de boro hexagonales (hBN) de decenas de nanómetros de espesor. Allí se alojarían los fonones-polaritones hiperbólicos. La estructura de la capa de oro se diseñó de manera que hubiera dos distribuciones diferentes de agujeros rectangulares, definiendo dos regiones distintas, una al lado de la otra. Los investigadores esperaban que, debido a la presencia de dos disposiciones diferentes, se formasen estados de borde topológicos justo en el límite donde ambas se encontraban.

Finalizado el proceso de fabricación, se procedió a la caracterización y análisis del sistema. Utilizaron la técnica de espectroscopia s-SNOM (microscopía óptica de campo cercano de barrido de tipo dispersión) para confirmar la existencia de un estado de borde localizado y que, efectivamente, se encontraba en el régimen de sublongitud de onda profunda.

Debido a la escasez de modelos teóricos, tuvieron que confiar ampliamente en sus propios resultados experimentales, lo que hizo que la necesidad de probar y verificar meticulosamente cada paso fuera aún más crucial de lo habitual. Este enfoque riguroso, paso

a paso, les permitio refinar el diseno experimental y lograr resultados claros y confiables, **demostrando finalmente estados de borde topologicos de sublongitud de onda profunda dentro de una plataforma HPhP.**

### **El poderoso potencial de las plataformas HPhP**

Ademas de la relevancia intrinseca en este hito por si mismo, el presente estudio tambien constituye un gran paso adelante hacia el control preciso de la luz a nanoescala, ofreciendo una plataforma alternativa para la realizacion e investigacion de la fisica topologica en sistemas nanofonicos. Asimismo, los autores afirman que sus resultados pueden extrapolarse a otros materiales hiperbolicos, algo que facilitaria el poder acceder a una cobertura mas amplia del espectro electromagnetico.

Como concluye Orsini: ¡½Al final, arriesgarse con los polaritones de fonones hiperbolic s dio sus frutos, y ahora hemos abierto nuevas posibilidades para obtener un control robusto y preciso de la luz a nanoescala. Una exploracion y un desarrollo continuos en esta direcci n podrian, a su vez, conducir a avances en areas tan diversas como las telecomunicaciones, l s tecnologias de deteccion o el procesamiento de informacion cuantica!

### **Referencia:**

Orsini, L., Herzig Sheinfux, H., Li, Y. et al. Deep subwavelength topological edge state in a hyperbolic medium. Nat. Nanotechnol. (2024). <https://doi.org/10.1038/s41565-024-01737-8>

### **Acknowledgements**

We thank D. B. Ruiz, S. Castilla, D. De Fazio, M. Amir Ali, G. Li, A. Berdyugin, M. Polini, V. Mkhitarian, G. Kumar, and I. Torre for technical discussions. We further thank M. Ceccanti for making the illustration presented in Fig. 1a. H.A., K.N. and R.B. acknowledge funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under Marie Skłodowska-Curie grant agreement no. 665884, 713729 and 847517, respectively. S.B.-P. acknowledges funding from the Presidencia de la Agencia Estatal de Investigacion within the PRE2020-094404 predoctoral fellowship. G.S. and A.F. gratefully acknowledge funding from the ERC grant CHIC (no. 724344), and J. Faist for discussions. A.P. acknowledges support from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under Marie Skłodowska-Curie grant agreement no. 873028 and from the Leverhulme Trust under grant agreement RPG-2019-363. K.W. and T.T. acknowledge support from the Elemental Strategy Initiative conducted by MEXT Japan with grant no. JPMXP0112101001, JSPS KAKENHI (JP19H05790, JP20H00354 and JP21H05233) and CREST (JPMJCR15F3), JST. R.K.K. acknowledges the EU Horizon 2020 programme under MarieSkłodowska-Curie grants 754510 and 893030 and the FLAG-ERA grant (PhotoTBG, PCI2021-122020-2A), by ICFO, RWTH Aachen and ETHZ/Department of Physics. A.B. acknowledges support from ERC

advanced grant no. 692876, MICINN grant no. RTI2018-097953-B-I00 and PID2021-122813OB-I00, AGAUR (grant no. 2017SGR1664), the Fondo Europeo de Desarrollo, the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness through Quantum CCAA, EUR2022-134050, and CEX2019-000910-S [MCIN/AEI/10.13039/501100011033], MCIN with funding from European Union NextGenerationEU (PRTR-C17.I1), Fundacio Cellex, Fundacio Mir-Puig, Generalitat de Catalunya through CERCA. F.H.L.K. acknowledges support from the ERC TOPONANOP (726001), Fundacio Cellex, Fundacio Mir-Puig, Generalitat de Catalunya (CERCA, AGAUR, SGR 1656, program TWIST), the Government of Spain [PID2019-106875GB-I00; PCI2021-122020-2A; PDC2022-133844-I00 (Teracomm); Severo Ochoa CEX2019-000910-S] funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033 and by the European Union NextGenerationEU/PRTR. Furthermore, the research leading to these results has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement no. 881603 (Graphene flagship Core3), 820378 (Quantum flagship) and 101034929 (Fastera). This material is based upon work supported by the Air Force Office of Scientific Research under award number FA8655-23-1-7047. Any opinions, findings, and conclusions or recommendations expressed in this material are those of the author(s) and do not necessarily reflect the views of the United States Air Force.