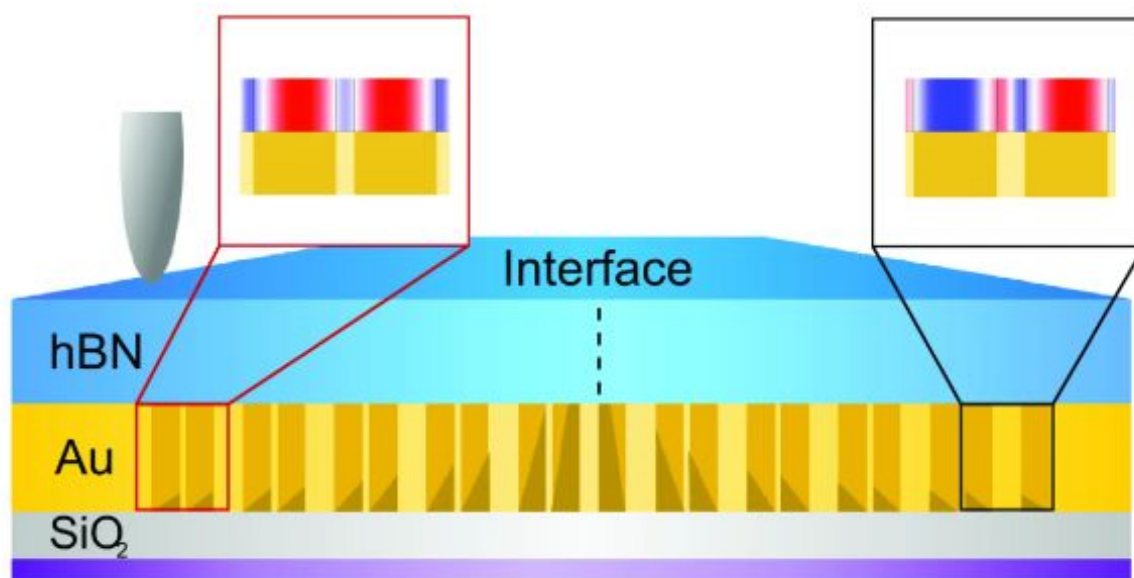




Primera demostració d'estats de vora topològics de sublongitud d'ona profunda

L'ICFO lidera la primera demostració experimental d'un estat de vora topològic de sublongitud d'ona profunda dins un sistema nanofòtonic, una fita en el camp de la nanofòtonica topològica.

September 03, 2024

Els sistemes topològics són una classe fonamental i versàtil de sistemes físics, omnipresents en molts camps de la física i amb implicacions de gran abast tant per a la investigació fonamental com per als avenços tecnològics aplicats. Aquests sistemes es caracteritzen per propietats que els fan resistents a les pertorbacions. En termes més simples, tenen certes qualitats que no es veuen fàcilment afectades per factors externs, com el desordre o canvis en altres condicions físiques.

Aquesta resistència a les pertorbacions és el que fa que els sistemes topològics siguin tan importants en física, ja que significa que el seu comportament pot ser molt previsible i fiable en una àmplia gamma de condicions. De particular interès són els estats de vora

topologics: estats que existeixen al limit d'un material i que no es poden suprimir sense trencar la simetria d'aquest.

Nanofotonica topologica: reptes i oportunitats

La comunitat científica, típicament atreta per aquells reptes que són tan complexos com prometedors, ha vist en la tasca de portar les propietats topològiques a la nanoescala un desafiament d'allo més atractiu. Complex degut als extrems límits espacials requerits per a manipular el camp electromagnètic; i prometedor per les conseqüències esperades, essent alhora fonamentals i aplicades

Per començar, miniaturitzar les propietats topològiques a escales físiques tan petites (e l'argot, el **regim de sublongitud d'ona profunda**) permetria a la comunitat científica explorar fenòmens físics exòtics (no linealitats, no localitat, interaccions multimodals...) que s'espera que sorgeixin sota aquestes circumstàncies. Des d'un punt de vista més pràctic, la robustesa i protecció inherents als sistemes topològics es poden aprofitar per desenvolupar components òptics de sublongitud d'ona profunda més resistents, com ara [nanocavitats](#) o guies d'ones tolerants a les irregularitats de fabricació.

Tot i el progrés experimental dirigit a assolir estats de vora topològics en el regim de sublongitud d'ona profunda, cada plataforma proposada presenta alguns beneficis així com alguns inconvenients importants, mantenint l'estatus de *¿tema candent¿* en la recerca de la solució definitiva.

Un equip internacional format pels investigadors de l'ICFO, **Enzo Orsini, Dr. Hanan Herzig Sheinfux, Matteo Ceccanti, Karuppasamy Soundarapandian**, dirigit pel **Prof. ICREA de l'ICFO Dr. Frank H. L. Koppens**, i en col·laboració amb la Universitat de Cornell, el CNRS, l'Universitat de Cambridge i la Universitat Estatal de Kansas, ha informat ara en un article de Nature Nanotechnology sobre un avenç substancial en aquest sentit. **Per primera vegada, han demostrat un estat de vora topològic de sublongitud d'ona profunda dins d'un sistema nanofònic**, on la plataforma triada -normalment no considerada per la comunitat de nanofotonica topologica- es va basar en els anomenats fonons-[polaritons](#) hiperbòlics (abreujat HPhP, per les sigles en anglès). No només van aconseguir limitar la llum a escales dimensionals tan petites, sinó que **també van mantenir factors d'alta qualitat** durant tot el procés.

Per què fonons-polaritons hiperbòlics?

Els fonons-polaritons hiperbòlics són un tipus d'excitació electromagnètica col·lectiva que es produeix en materials hiperbòlics, on les ones electromagnètiques (fotons) s'acoblen amb els quants de vibracions dins la xarxa atòmica d'un material (fonons òptics). Aquests HPhP permeten confinar i guiar la llum a volums molt petits o al llarg de superfícies.

Gràcies a les seves característiques especials, els HPhP superen els desafiaments que enfrontaven els mètodes anteriors a l'hora d'estudiar propietats topològiques a

a nanoescala. Aquestes limitacions inclouen, per exemple, una alta absorció òptica -que és perjudicial per a assolir el règim de sublongitud d'ona profunda en el cas dels polaritons plasmonics-, dificultats de fabricació i la necessitat de temperatures criogèniques -que dificulten la realització d'estats topològics en el cas del graf.

• **Amb els fonons-polaritons hiperbòlics**, aquests problemes es minimitzen, ja que **exhibeixen una baixa absorció fins i tot a temperatura ambient i poden ser relativament fàcils de fabricar**.

Aquestes característiques, juntament amb el fet que **permeten un alt confinament en volum**, atorguen als HPhP excel·lents característiques de rendiment. Però per molt atractius que semblin, els HPhP han restat en gran mesura inexplorats per a aplicacions topològiques causa de la seva naturalesa profundament complexa, cosa que ha obstaculitzat el desenvolupament teòric en aquesta àrea.

Tot i això, l'equip va veure en els polaritons de fonons hiperbòlics un gran potencial, i el seu ambiciós objectiu els va impulsar a actuar. El 2016, a l'inici del projecte, no teníem clar com es manifestarien aquests estats de vora ni quines propietats específiques exhibirien. El 2017, comparteix Lorenzo Orsini, primer autor de l'article. El 2018, encara que anticipàvem la seva formació, observar-los finalment en els nostres experiments va ser una confirmació fascinant de les nostres expectatives i un desenvolupament apassionant en el camp.

L'experiment que va conduir a l'èxit

Per tal de permetre l'aparició d'estats topològics de vora, l'equip va construir una plataforma de xarxa polaritònica unidimensional.

Primer, van definir clarament forats rectangulars perforats periòdicament a través d'una pel·lícula d'or de 10 nanòmetres. Per sobre, van col·locar-hi escates de nitrur de bor hexagonals (hBN) de dissenys de nanòmetres de gruix. Allí s'allotjarien els fonons-polaritons hiperbòlics. L'estructura de la capa d'or es va dissenyar de manera que hi hagués dues distribucions diferents de forats rectangulars, definint dues regions desiguals, una al costat de l'altra. Els investigadors esperaven que, a causa de la presència de dues disposicions diferents, es formessin estats topològics de vora just al límit on ambdues es trobaven.

Un cop finalitzat el procés de fabricació, es va procedir a la caracterització i anàlisi del sistema. Van utilitzar la tècnica d'espectroscòpia s-SNOM (microscòpia òptica de cap proper d'escombrada de tipus dispersió) per a confirmar l'existència d'un estat de vora localitzat i que, efectivament, aquest es trobava en el règim de sublongitud d'ona profunda. A causa de l'escassetat de models teòrics, van haver de confiar en gran mesura en els seus propis resultats experimentals, per la qual cosa la necessitat de provar i verificar meticulosament cada pas va esdevenir fins i tot més crucial del que ja és habitual. Aquest enfocament rigorós, pas a pas, els va permetre refinar el disseny experimental i assolir resultats clars i fiables **demostrant finalment estats de vora topològics de sublongitud d'ona profunda dins una plataforma HPhP**.

El poderos potencial de les plataformes HPhP

A banda de la rellevancia intrinseca d'aquesta fita te per si mateixa, aquest estudi tambe constitueix un gran pas endavant cap al control precis de la llum a nanoescala, oferint una plataforma alternativa per a la realitzacio i investigacio de la fisica topologica en sistemes nanofotonics. A mes, els autors afirmen que els resultats es poden extrapolar a altres materials hiperbolics, cosa que facilitaria el poder accedir a una cobertura mes amplia de l'espectre electromagnetic.

Com conclou Orsini: $i\frac{1}{2}$ Al final, arriscar-se amb els polaritons de fonons hiperbolics va donar els seus fruits, i ara hem obert noves possibilitats per obtenir un control robust i precis de la llum a la nanoescala. Una exploracio i un desenvolupament continu en aquesta direccio podrien, al seu torn, conduir a avencos en arees tan diverses com les telecomunicacions, les tecnologies de deteccio o el processament d'informacio quantica?

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. Mkhitaryan, 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 Marie Skłodowska-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.