



## Trencant fronteres en fotonica quantica: unes nanocavitats noves amplien les fronteres en el confinament de la llum

En un important avenc per a la nanofotonica quantica, un equip de fisics europeus i israelians ha introduit un nou tipus de cavitats polaritoniques i ha redefinit els limits del confinament de la llum. Aquest treball pioner, publicat a Nature Materials, proposa un metode no convencional per confinar fotons, superant les limitacions tradicionals de la nanofotonica i aconseguint simultaniament cavitats de petit volum i llarga durabilitat.

February 12, 2024

Els fisics porten molt de temps buscant maneres de forçar els fotons a ocupar volums cada vegada mes petits. L'escala de longitud natural del foto es la longitud d'ona i quan un foto es forcat a entrar en una cavitat molt mes petita que la seva longitud d'ona, a la practica es torna mes i  $\frac{1}{2}$  concentrati  $\frac{1}{2}$ . Aquesta concentracio millora les interaccions amb els electr

ns, amplificant els processos quantics dins de la cavi  
at. Tot i l'immens exit experimental de les darreres decades, l'efecte de la dissipacio (abso  
cio optica) continua sent un obstacle important a l'hora de confinar la llum a vo  
lums extremadament petits. Els fotons a les nanocavitats s'absorbeixen molt rapidament, so  
int fins i tot abans que el foto arribi des d'una banda de la cavitat a l'altra. Aquesta dissip  
cio limita l'aplicabilitat de les nanocavitats a algunes de les arees mes interessant  
de l'electrodinamica quant  
ca. El grup de recerca del **PIGREA Frank Koppens** de l'ICFO ha publicat un estudi a Nature  
Materials on superen aquest desafiament creant cavitats potenciades multimodals (en angles  
multimodal-enhanced cavities o MEC) amb una combinacio incomparable de volum per sota  
de la longitud d'ona i vida util ampliada. Aquestes nanocavitats, que fan menys de 100x100  
nm<sup>2</sup> d'area i només 3 nm de gruix, confinen la llum durant periodes significativament me  
llargs. La clau radica en l'us de polaritons de fonons hiperbolics, excitacion  
electromagnetiques uniques natives dels materials 2D utilitzats per formar la cavitat. Aquest  
polaritons hiperbolics son similars a la llum ordinaria en la majoria dels aspectes, pero e  
poden confinar a volums extremadament petits (molt mes petits que la longitud d'on  
elevada al cub) de maneres que desafien la intuicio comuna en optica

### **Quan els experiments van superar les expectatives teoriques**

Aquest descobriment va començar amb una observacio casual realitzada durant un projecte  
completament diferent. Mentre feien servir un microscopi optic de camp proper per  
caracteritzar l'estructura d'un material 2D, els investigadors van notar una reflexio  
inusualment forta quan els polaritons excitats dins seu colpejaven la vora d'un substrat  
metal·lic. Aquesta observacio inesperada, a primer cop d'ull anecdotica, va resultar ser e  
principi subjacent d'un dispositiu innovador

Els investigadors es van adonar que podrien utilitzar aquesta propietat acabada de descobri  
per crear nanocavitats d'alta qualitat i volum petit simultaniament, un exit que fins ara eludi  
a la comunitat de la nanofotonica. Ells esperaven obtenir una lleugera millora respecte a le  
nanocavitats anteriors, pero en analitzar les mesures experimentals l'equip es va emporta  
una gran sorpresa. El rendiment de les cavitats va duplicar les expectatives i va superar e  
maxim previst pel model teorico inicial. Encara millor, les nanocavitats van mostrar aq  
vides relativament llargues malgrat la mida reduida (de l'ordre d'uns quants nanometres)

"Les mesures experimentals solen ser pitjors del que suggeriria la teoria, pero en aquest ca  
vam descobrir que els experiments superaven les optimistes prediccions de la nostra teori  
simplificada", va dir el primer autor, el Dr. Hanan Herzig Sheinfux, del Departament de Fisic  
de la Universitat Bar-Ilan. "Aquest exit inesperat aplanava el camí cap a noves aplicacions  
avencos en la fotonica quantica, ampliant els limits del que pensavem que era possible"

De fet, les seves cavitats MEC eren ordres de magnitud mes petites que les de qualsevol altr  
ressonador optic de vida comparable. No obstant això, el seu enorme exit es va convertir

també en el seu desafiament més gran, ja que encara mancava una explicació teòrica. Després de mesos d'estudi, van descobrir que "una física realment bonica i sorprenentment profunda relacionada amb la formació de nanoraigs i la interacció multimodal era la responsable de tot", explica el Dr. Herzig.

### **Cavitat potenciada multimodal de polaritons hiperbòlics?**

L'èxit de les seves nanocavitats es basava en un mecanisme de confinament únic, així com en la construcció del dispositiu. Les nanocavitats es van crear perforant forats a nanoescala en un substrat d'or amb la precisió extrema (2-3 nanòmetres) d'un microscopi enfocat de feix d'ions d'He. Després de fer els forats, es va transferir a sobre nitrur de bor hexagonal (hBN) un material 2D que pot admetre els polaritons de fonons hiperbòlics. La llum havia de quedar confinada dins de l'hBN, a la regió situada damunt dels forats.

En el model original utilitzat per analitzar els experiments, el confinament a la cavitat es pot comparar amb l'augment del trànsit d'automòbils que es produeix quan una autopista de doble carril es redueix a un de sol. La incompatibilitat entre el trànsit d'un i dos carrils està obligant els automòbils a congestionar-se, cosa que és vagament similar a com es reflecteix en la llum quan el tipus de substrat canvia a la vora del forat donant pas al substrat d'or. La incompatibilitat entre l'hBN suspès i l'hBN sobre or actua com un coll d'ampolla per als polaritons, de manera que la llum dins de la cavitat té més dificultats per filtrar-se. Tanmateix, tal com s'ha esmentat anteriorment, aquest model simple no va poder explicar completament els resultats experimentals. Per fer-ho, cal tenir en compte que els polaritons d'hBN es manifesten en forma d'ones de llum i que, a diferència de les partícules clàssiques (com els cotxes en una carretera), poden combinar-se i interferir de formes complicades. En concret, els polaritons d'hBN es poden combinar en excitacions similars a raigs multimodals. Les excitacions multimodals que es formen per sobre dels nano-forats del metall són fins i tot més incompatibles amb els polaritons fora del forat, cosa que comporta un grau de confinament encara més gran del que seria possible d'una altra manera. Fonamentalment, aquest mètode evita donar forma directa a l'hBN i preserva la seva qualitat pròpia, cosa que permet tenir fotons altament confinats i de llarga vida a la cavitat. El Prof. Koppens i el Dr. Herzig tenen la intenció d'utilitzar aquestes cavitats com una plataforma innovadora per a experiments quàntics d'interacció llum-materia per a efectes quàntics que abans es consideraven impossibles, així com per estudiar més a fons la física intrigant i contraintuïtiva del comportament en polaritons de fonons hiperbòlics.

### **Referència bibliogràfica:?**

Hanan Herzig Sheinfux et al, High-quality nanocavities through multimodal confinement of hyperbolic polaritons in hexagonal boron nitride, *Nature Materials* (2024).

[www.nature.com/articles/s41563-023-01785-w](https://www.nature.com/articles/s41563-023-01785-w)