

Teoretisk fysik kan vise vejen til at styre lys i fremtidens teknologi

Nutidens elektronik er ved at nå loftet for, hvor hurtig og strømbesparende den kan blive. En mulig vej videre frem er at lade lys overtage noget af arbejdet fra den elektriske strøm. Men først skal forskere lære at styre lyset lige så præcist, som man i dag kan styre elektricitet.

■ Af Kristian Sjøgren, videnskabsjournalist. ksjoegren@gmail.com



**DANMARKS FRIE
FORSKNINGSFOND**
INDEPENDENT RESEARCH
FUND DENMARK

Udviklingen indenfor computere har nået en korsvej, hvor vi skal beslutte, hvilken retning den skal bevæge sig i. Problemet er flerfoldigt. For det første bruger alle de mange datacentre, som bliver bygget i disse år, enorme mængder strøm. En meget stor del af den strøm går alene til at køle de store datacentre ned, fordi computere altid vil have et varmetab. Det varmetab kan du for eksempel mærke, når du sidder med din laptop i skødet. Varmen er et tegn på, at der hele tiden går energi tabt, når de elektriske signaler farer frem og tilbage inde i maskinen og møder modstand undervejs. Lige nu frygter mange, at verden slet ikke kan producere den mængde strøm, som de store datacentre skal bruge.

Det andet problem er, at den udvikling, der i årtier har gjort vores elektronik hurtigere og hurtigere, er begyndt at gå i stå. Der fandtes engang en tommelfingerregel om, at computerens regnekraft omtrent fordobles hvert andet år, men den vækst er langsomt fladet ud. Vi rammer nu nogle helt grundlæggende grænser for, hvor små og hurtige de elektroniske komponenter kan blive.

Helt centralt i begge problemstillinger finder man konverteringen af information fra lys til elektriske signaler. Wifi, mobilsignaler og de fiberkabler, der ligger på bunden af verdenshavene, flytter data af sted med lysets hastighed og bruger meget lidt energi undervejs. Problemet opstår, når signalet når frem. For så skal det oversættes tilbage til elektriske signaler, før computeren kan arbejde med det. Og hver eneste oversættelse koster både tid og strøm.

En gruppe fysikere drømmer derfor om at slippe helt for det oversættelsestrin ved at lade lyset selv overtage regnearbejdet inde i computeren. En af disse forskere er professor og teoretisk fysiker Joel Cox fra POLIMA, Center for Polariton-driven Light-Matter Interactions, ved Syddansk Universitet.

»Lys er fantastisk til at transportere information hurtigt og næsten uden at bruge energi. Den store hovedpine er, at vi ikke rigtig kan styre lyset. Vi kan ikke tænde og slukke for det lige så let, som vi kan tænde og slukke for en elektrisk strøm. Kunne vi det, ville vi kunne erstatte en stor del af elektronikken med noget, der i stedet kører på lys,« fortæller han.

Lys er for "stort" til en mikrochip

Når Joel Cox taler om at styre lys, mener han noget mere vidtgående end at tænde

og slukke en lampe. Han vil kunne fokusere lyset ned på så små områder, at det kan bruges inde i en mikrochip på linje med de elektriske komponenter, vi kender i dag. Målet er at forstå, hvordan lys kan koncentreres på de allermindste længdeskalaer, hvilket på sigt kan bane vejen for nye optiske komponenter.

Det lyder måske simpelt, men man støder hurtigt ind i et fysisk problem, der indtil videre er uløst. En moderne computerchip rummer milliarder af bittesmå elektriske kontakter, transistorer, der er pakket så tæt sammen, at de mindste af dem kun måler nogle få nanometer. Så tæt kan man i dag ikke pakke lys. Synligt lys er nemlig en bølge, der måler flere hundrede nanometer fra den ene bølgetop til den næste. Vil man arbejde med lyset på en skala på ti nanometer, altså mange gange mindre, er selve bølgen simpelthen for stor til at være der. Fysikerne kalder den grænse for diffraktionsgrænsen.

»Det er lidt som at forsøge at presse en stor havbølge ned i et syltetøjsglas. Vi kan ikke bare skrumpke optikken ned på samme måde, som vi gennem årene har skrumpet elektronikken,« forklarer Joel Cox.

Særlig partikel opstår i kontakten mellem lys og materiale

Her kommer en særlig slags partikel ind i billedet. Partiklen hedder en polariton og er på samme tid både lys og stof. Når lys rammer det rigtige materiale, kan det nemlig smelte sammen med de elektriske ladninger i stoffet til en helt ny partikel, der arver egenskaber fra både lyset og stoffet. Lyset holder så at sige fast i overfladen af materialet i stedet for at brede sig frit, og netop det gør noget bemærkelsesværdigt. Når lyset og stoffet er koblet sammen på den måde, kan lyset presses ned på områder, der er langt mindre, end diffraktionsgrænsen ellers tillader. Derfor kan man alligevel forestille sig, at man kan klemme lys sammen i noget, der nærmer sig størrelsen på en transistor.

Joel Cox og hans kolleger arbejder især med polaritoner i de såkaldte todimensionelle materialer. Det mest kendte af dem er grafen, som er et lag af rent kulstof, der kun er ét atom tykt. Netop fordi materialet i sig selv er så tyndt, er det oplagt at bruge, hvis man vil bygge noget, der fylder så lidt som muligt. Derudover har det tynde lag grafen også en anden interessant egenskab: Jo tyndere man gør materialet, desto bedre bliver polaritonerne til at fokusere lyset.

»Når materialet bliver tyndt nok, kan det ikke



JOEL COX

Joel Cox er professor i teoretisk kvantenanooptik ved Syddansk Universitet, hvor hans forskningsgruppe er tilknyttet grundforskningscenteret POLIMA støttet af Danmarks Grundforskningsfond. Han er desuden professor ved Danish Institute for Advanced Study på SDU. Joel Cox er uddannet i Canada, hvor han i 2013 tog sin ph.d.-grad i fysik. Herefter fulgte år som postdoc ved fotonikinstituttet ICFO i Barcelona, hvor han specialiserede sig i ikke-lineær optik og i polaritoner i grafen. I 2019 kom han til Odense og etablerede senere sin egen forskningsgruppe *Kvante- og ikke-lineær Nanooptik* ved POLIMA. Hans forskning kredser om polaritoner og om de todimensionelle materialer. Målet er at forstå, hvordan man kan koncentrere lys på de allermindste længdeskalaer, og på sigt bane vejen for en ny slags optiske komponenter til fremtidens computere.

cox@mci.sdu.dk

■ ■ ■ ■ ■

Artiklen er sponsoreret af
Danmarks Frie Forskningsfond
| Natur og Univers.
Se mere på www.dff.dk

NANOFOTONIK

Almindelig optik som brilleglas eller kikkertlinser, kaldes også lineær optik. Her gælder den simple regel, at materialets reaktion på lyset er proportional med lysstyrken. Ved ekstreme lysintensiteter som en laser er materialets reaktion ikke længere proportional med lyset – det betyder for eksempel, at lyset kan skifte farve eller vekselvirke med sig selv.

Ikke-lineær optik er traditionelt blevet realiseret i systemer med meget intenst lys (dvs. mange fotoner) og en masse materiale, så der er en stor vekselvirkning mellem lys og materiale. Men Joel Cox og hans forskerkolleger arbejder på at nå hen i et regime af kvante-ikke-lineær optik, hvor der er den mindst mulige vekselvirkning mellem lys og stof – dvs. hvor kun få fotoner vekselvirker med et enkelt atom.

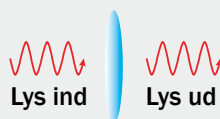
I kvanteoptiske laboratorier har man kunnet demonstrere, at dette faktisk kan lade sig gøre. Men det kræver i dag komplicerede opstillinger, som vanskeligt kan skaleres ned til de nanostørrelser, som for eksempel mikrochips i dag fremstilles i. For at komme videre er der derfor brug for at udvikle nanofotoniske teknikker, der fokuserer lys ned på nano-længder i designede nanostrukturer og 2-dimensionelle materialer.

Nutiden:

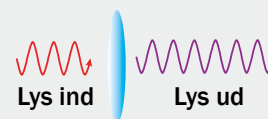
Komplicerede laboratorieopstillinger



Lineær optik

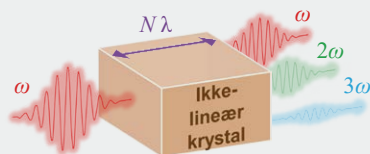


Ikke-lineær optik



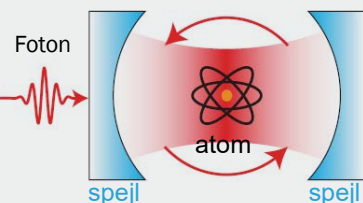
Lysstyrke:	Svagt/almindeligt lys	Ekstrem intenst (typisk laser)
Frekvens (farve):	Uforandret	Kan ændres fordobles eller opdeles
Fotoner:	Passerer uforstyrret	Kan vekselvirke med hinanden og materialet
Skalering af optisk respons i forhold til lysstyrke:	Proportional	Ikke-proportional

Traditionel ikke-lineær optik



- Frekvenskonvertering
- Ultrahurtige optiske kontakter

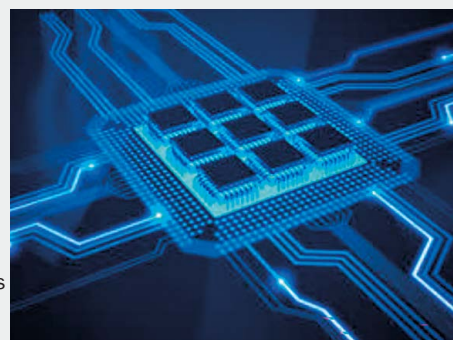
Kvante-ikke-lineær optik

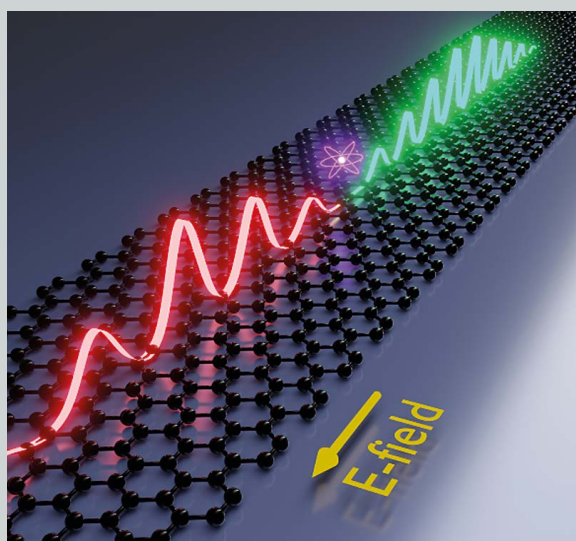
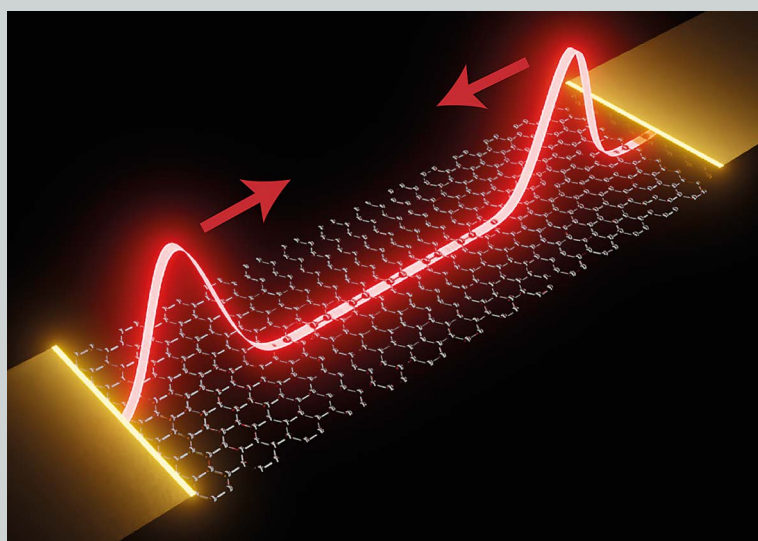


- Fotonfrekvens opkonvertering
- Enkeltfoton-kontakter

Fremtiden:

Nanofotonik
Optiske kvantechips med integrerede fotoniske kredsløb





De to illustrationer viser en kunstnerisk fortolkning af to forskellige situationer, hvor man teoretisk kan frembringe to polaritoner, der udbreder sig i stik modsat retning af hinanden, i en strimmel grafen. På figuren til venstre dannes polaritonerne af en kvante-lyskilde såsom et atom eller molekyle, og de udbreder sig forskelligt afhængig af deres retning i forhold til et påtrykt elektrisk felt. Til højre "kolliderer" to polaritoner udsendt af metalkontakter og reflekteres i modsat retning af hinanden ved deres ikke-lineære optiske vekselvirkning. Illustrationer Joel Cox.

HVAD ER EN POLARITON?

En polariton er en hybrid-partikel, der opstår, når lys og stof kobler så tæt, at de smelter sammen til én partikel. Lyset fanges lige ved overfladen af et materiale, hvor det låser sig fast til de elektriske ladninger inde i stoffet, og resultatet er en partikel, der på samme tid bærer træk fra lyset og materialet.

Der findes flere slags polaritoner, alt efter hvilke ladninger lyset kobler sig til. Kobler det sig til frit bevægelige elektroner som i et metal, taler man om plasmonpolaritoner. Kobler det sig til atomer, der vibrerer og skiftevis er lidt positive og negative, kaldes de fononpolaritoner. Løsriv lyset en elektron, så der bliver et positivt hul tilbage i atomet, opstår en excitonpolariton.

Fælles for alle polaritonerne er, at de kan holde lyset fanget på et langt mindre område, end lysets bølgelængde ellers tillader, og dermed bryde den diffraktionsgrænse, der normalt sætter en nedre grænse for, hvor småt man kan arbejde med lys. Jo mere lyset koncentrerer, jo kraftigere bliver dets samspil med det materiale, det befinder sig i.

På ovenstående baggrund er polaritoner blevet et af de mest lovent værktøjer, hvis man vil bygge optik i samme lille målestok som nutidens elektronik. Polaritoner lever dog kun ganske kort, og en stor del af forskningen går ud på at få dem til at leve længe nok til at kunne bruges til noget.

længere flytte rundt på sine elektroner hurtigt nok til at udligne lysets elektriske felt. Derfor bliver det faktisk bedre og bedre til at koncentrere lyset, jo tyndere det er. Og et lag, der kun er ét atom tykt, kan man jo ikke gøre mindre. Vi er nået helt ned til den absolutte grænse for, hvor småt det kan blive,« forklarer Joel Cox.

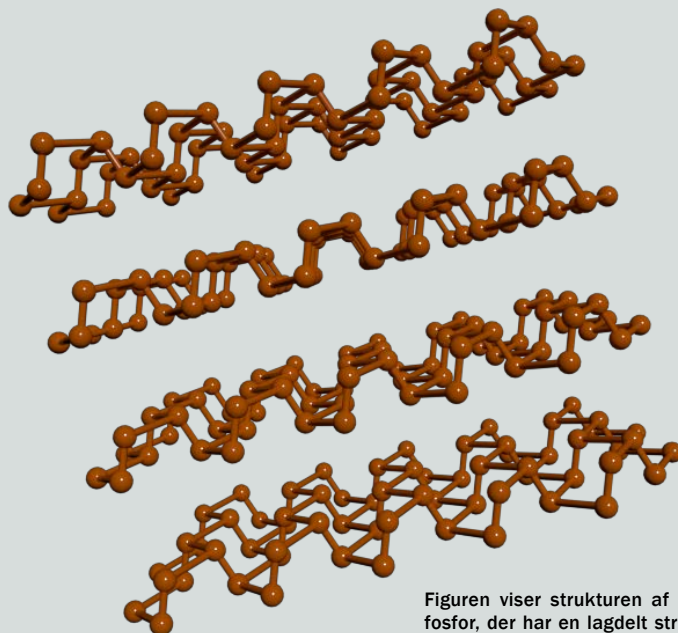
Vil styre lys med lys

Selve kernen i Joel Cox' forskning handler om det, fysikerne kalder ikke-lineær optik, hvilket blandt andet involverer muligheden for at styre lys med lys. Til daglig går lysstråler nemlig lige gennem hinanden, uden at den ene overhovedet mærker den anden. To lygtekegler, der krydser hinanden på en mørk vej, forstyrrer for eksempel ikke hinanden det mindste.

Vil man bruge lys som en kontakt, der kan tænde og slukke ligesom en transistor, er man nødt til at bryde den regel og få lyset til at reagere på lys. Det kan faktisk godt lade sig gøre, men normalt kræver det, at man skruer voldsomt op for styrken af lyset og sender millioner eller milliarder af lyspartikler af sted med en kraftig laser, så man kan få nogle af dem til at støde ind i hinanden. Et kendt eksempel på det er, at to lyspartikler med lav energi kan smelte sammen til én partikel med den dobbelte energi. Det er den slags proces, der ligger bag de grønne laserpointere, hvor usynligt infrarødt lys bliver lavet om til grønt lys. Det sker dog kun, når lyset er meget kraftigt, og derfor er det ikke en effekt, man uden videre kan bruge til at styre nogle få lyspartikler ad gangen.

Ideen med Joel Cox' forskning er, at polaritonerne energimæssigt kan gøre den slags langt billigere. Fordi de klemmer lyset sammen på så lille en plads, bliver det så koncentreret, at lyspartiklerne meget lettere mærker hinanden. Dermed skal der langt mindre effekt til, før den ikke-lineære effekt sætter ind, og man behøver ikke længere de allerkraftigste lasere.

For at afprøve ideen har Joel Cox og hans hold af forskere udviklet en helt ny type computersimulering, hvor de kan regne på hvert enkelt atom i et materiale og på, hvordan elektronerne bevæger sig, når lyset rammer.



Figuren viser strukturen af såkaldt sort fosfor, der har en lagdelt struktur. Et enkelt atomlag kaldes fosforen.

TODIMENSIONELLE MATERIALER

De todimensionelle materialer er en familie af stoffer, der kun er nogle få atomlag tykke. Startskuddet lød i 2004, da to forskere i England for første gang fik pillet et enkelt lag kulstof af en klump grafit ved hjælp af helt almindelig tape. Laget fik navnet grafen, og opdagelsen udløste seks år senere en nobelpris i fysik.

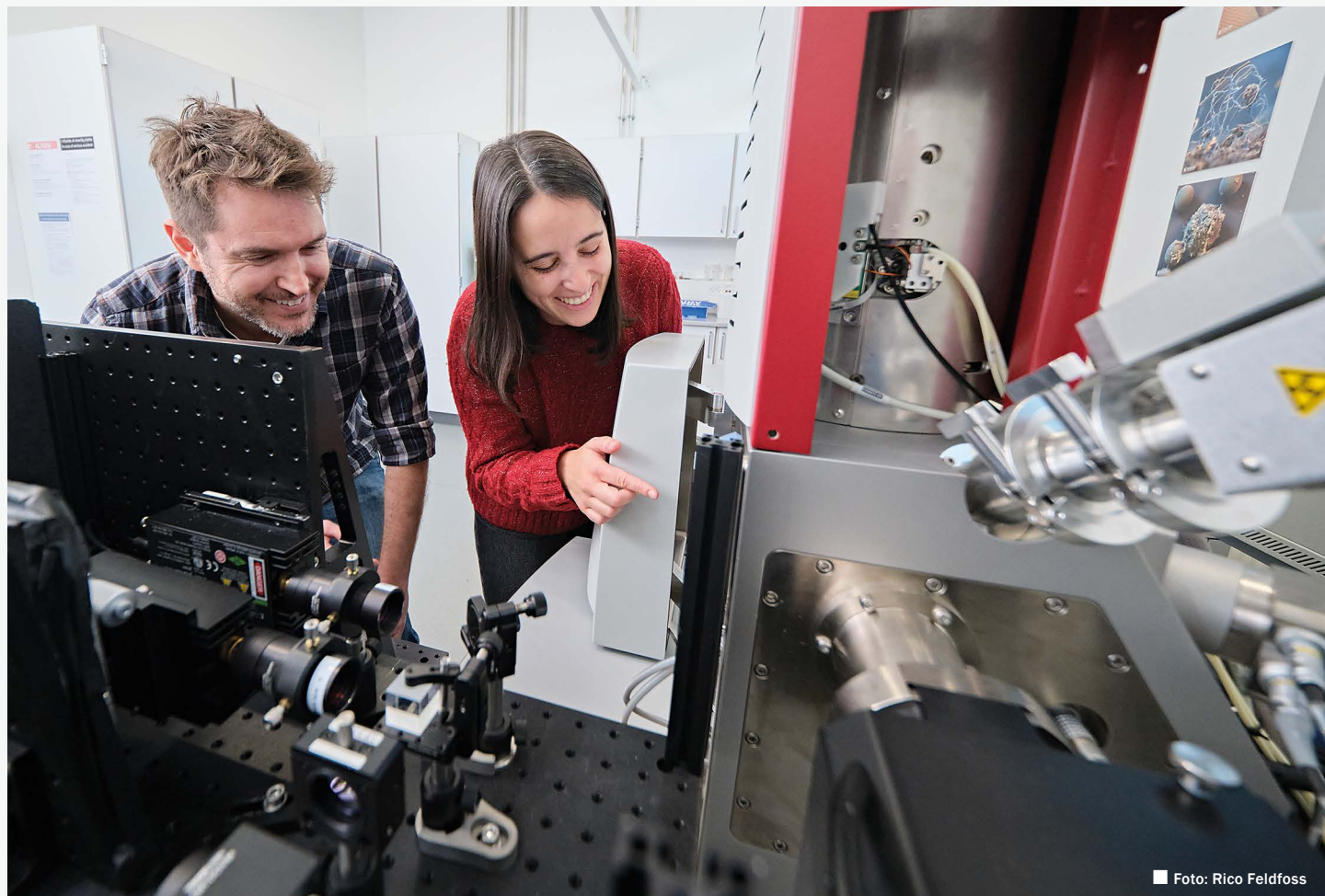
Siden 2004 har forskere fundet en lang række andre stoffer, der kan skilles ad i tilsvarende tynde lag. Et af dem er fosforen, som er et enkelt lag af grundstoffet fosfor. Tilsammen udgør de todimensionelle materialer en hurtigt voksende familie med vidt forskellige egenskaber, hvor nogle leder strøm som metaller, mens andre opfører sig som halvledere.

Det, der gør materialerne så specielle, er, at fysikken skifter karakter, når man kommer helt ned til nogle få atomlag.

Elektronerne er tvunget til at bevæge sig i et fladt landskab, og det giver stofferne egenskaber, som de samme grundstoffer slet ikke har i tykkere form.

En anden styrke er, at materialerne kan styres udefra. Lægger man en elektrisk spænding over et lag grafen, kan man tilføje eller fjerne elektroner og dermed ændre, hvordan det svarer på lys, nærmest som med en knap. Man kan også stable flere forskellige lag oven på hinanden og skabe helt nye materialer med egenskaber, som ingen af lagene har hver for sig.

Fordi et enkelt atomlag ikke kan gøres tyndere, repræsenterer materialerne en yderste grænse for, hvor lille man kan bygge en komponent. Til gengæld gør den ekstreme tyndhed dem sarte og meget følsomme over for urenheder og over for det underlag, de ligger på.



■ Foto: Rico Feldfoss

Joel Cox står med sin forskningskollega ved forskningscenteret POLIMA, postdoc Catarina Ferreira, ved centerets katodeluminescens-mikroskop. Det er et state-of-the-art instrument til at studere fundamentale vekselvirkninger mellem lys og stof i komplekse nanostrukturer og 2D-materialer.

~45 nm

Foto: IBM

Transistorer

400 nm

Synligt lys (violet)

En moderne mikrochip indeholder milliarder af transistorer. Hvis man vil lave mikrochips baseret på optiske komponenter, støder man på det problem, at bølgelængden af synligt lys er alt for stor til at kunne pakke et tilsvarende antal transistorer på en chip. Det er den udfordring, Joel Cox og kolleger, prøver at løse.

Chip fra IBM med cirka 100 milliarder transistorer.
Foto: IBM

Metoden kan holde styr på tusindvis af atomer på én gang.

»Vores beregninger bekræfter den grundlæggende idé i projektet. Polaritonerne sænker den tærskel, der skal til, før lys kan påvirke lys,« siger han.

Drømmen er to lyspartikler, der reagerer på hinanden

Den helt store drøm i feltet ligger endnu et stykke længere ude i fremtiden og handler om at nå derhen, hvor man kan sende bare to lyspartikler af sted og vide med sikkerhed, at de vil reagere på hinanden, i stedet for at skulle sende milliarder af sted og håbe på et enkelt sammenstød. Fysikerne taler ligefrem om den hellige gral, hvis det lykkes. I så fald vil man for alvor kunne bruge lys, som vi i dag bruger elektronik. Den ene lyspartikel vil kunne afbryde eller styre den anden, ligesom en elektrisk strøm i dag tænder og slukker en transistor.

Joel Cox har sammen med kolleger i Barcelona og Wien vist, hvordan man i teorien kan lade to polaritoner tørne direkte sammen inde i en tynd strimmel af grafen. Når polaritonerne mødes på præcis den rigtige måde, kaster den ene den anden tilbage, og det kontrollerede sammenstød kan fungere som en logisk byggesten i en fremtidig kvantecomputer. Der kan dog gå lang tid, før den teoretiske fysik bliver oversat til virkelig teknologi. Beregningerne viser, at det er fysisk muligt, men også at det stiller meget store krav til materialernes kvalitet, hvis det skal fungere ude i virkeligheden.

»Vi løser ikke problemet i det her projekt, men vi tager nogle vigtige skridt på vejen og finder frem til metoder, der ser lovende ud. Det er stadig langt fra en færdig teknologi, og det vil jeg gerne være helt ærlig omkring. Da forskningen samtidig foregår i computersimuleringer på atomniveau, er der langt fra at regne på et materiale i en computer til at bygge en færdig teknologi i laboratoriet,« siger Joel Cox.

Lyspartikler som bud på fremtidens kvantecomputere

Forskningsarbejdet kan også være relevant i forhold til udvikling af kvantecomputere. Lysets fotoner regnes nemlig for at være

blandt de allerbedste bærere af kvanteinformation, altså den type information, som en kvantecomputer skal regne med. De kan bevæge sig hurtigt og over lange afstande uden at blive forstyrret synderligt.

Hvor en almindelig computer arbejder med bits, der enten er nul eller et, arbejder en kvantecomputer med kvantebits, der kan være i en slags superposition af begge tilstande på én gang. En foton kan bære sådan en kvantebit, for eksempel i den måde, den svinger på, og derfor forestiller forskere sig, at lys en dag kan blive selve ryggraden i et net, der sender kvanteinformation rundt mellem fremtidens kvantecomputere.

Skal den drøm gå i opfyldelse, kræver det, at man kan skabe og styre lyset helt nede på niveauet af de enkelte lyspartikler, og at man kan sende dem af sted uden at miste dem undervejs. Det er præcis den slags kontrol, de todimensionelle materialer og deres polaritoner måske en dag kan levere, og derfor er de to grene af forskningen tæt knyttet til hinanden.

Materialer er aldrig helt perfekte

Trods de mange resultater er Joel Cox meget bevidst om, at der stadig står en stor forhindring i vejen, før teori kan blive til virkelighed. Virkelighedens materialer er nemlig aldrig helt perfekte, og det er noget ganske andet at regne på et materiale i en computer end at fremstille det i laboratoriet.

I den virkelige verden vil der i materialer altid være små fejl, hvor et atom sidder forkert, og det atomtynde materiale er samtidig meget følsomt over for sine omgivelser. Netop den følsomhed er både en velsignelse og en forbandelse. På den ene side kan man finjustere materialets egenskaber udefra. På den anden side taber lyset let energi til alt det, der ikke er, som det skal være, og det svækker effekten.

»Det handler i bund og grund om støj. Polaritonerne mærker de defekter, de mærker urenhederne i omgivelserne, og de mister energi til alt muligt undervejs. Den udfordring med tab og materialefejl vil altid være der,« forklarer Joel Cox.

De teknikker, man har til at fremstille materialerne, bliver dog hele tiden bedre, og eksperimenterne haler langsomt ind på teorien. Joel Cox nævner selv, at der for nylig er kommet nye metoder til at lave sølvfilm, der kun er få atomer tykke, og som tegner lovende for optikken.

»Feltet rykker sig hele tiden, og der kommer nye ting næsten hver dag. Jeg vil rigtig gerne opleve, at vi en dag når helt derved, hvor lys kan styres partikel for partikel. Vi er der ikke endnu, men vi har fundet nogle veje, der ser lovende ud, og jeg glæder mig oprigtigt til at se, hvor det bærer hen,« siger han. ■

VIDERE LÆSNING

L. Jelver and J. D. Cox*, Nonlinear thermoplasmonics in graphene nanostructures, *Nano Lett.* **24**, 13775 (2024).

L. Jelver and J. D. Cox*, Electron-induced nonlinear dynamics in atomic chains, *Phys. Rev. Research* **5**, L022015 (2023).

M. H. Eriksen, J. E. Olsen, C. Wolff, and J. D. Cox*, Optoelectronic control of atomic bistability with graphene, *Phys. Rev. Lett.* **129**, 253602 (2022).

T. P. Rasmussen, P. A. D. Gonçalves, S. Xiao, S. Hofferberth, N. A. Mortensen, and J. D. Cox*, Polaritons in two-dimensional parabolic waveguides, *ACS Photonics* **8**, 1860 (2021).