

# En kvantecomputer baseret på lys

Carlos Faurby og Peter Lodahl, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Lys er elektromagnetiske bølger og spiller en afgørende rolle i fysik og teknologi: lys er fundamentet for liv på Jorden, og fotonik har givet os teknologiske landvindinger som lasere eller et globalt internet. Den kvantemekaniske beskrivelse af lys rummer et dybere lag: lys er opbygget af fotoner – udelelige kvanter af lys, som har både partikel- og bølgeegenskaber (partikel-bølge dualitet) – og netop fotonerne kan være en del af løsningen på en af de helt store teknologiske udfordringer i dag: hvordan bygger man en tilstrækkelig stor kvantecomputer, så man kan udnytte den til at løse vigtige problemer.

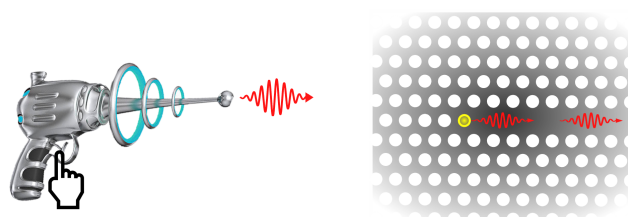
Ideen om en kvantecomputer, der udnytter kvantekompleksitet til at løse problemer umulige for almindelige computere, har skabt meget store forventninger og i disse år investeres der massivt i forskning og udvikling af teknologien bag. Kvantecomputere findes allerede i dag, men den store udfordring er, om man kan bygge dem tilstrækkeligt store og komplekse til, at de kan løse problemer, som nuværende computere aldrig vil kunne tackle. Opskaleringen af kvantecomputerteknologi er en stor og kompleks udfordring, og det er endnu ikke oplagt hvilken basal kvanteteknologi, som vil vise sig mest velegnet. Dette har ført til en meget stor interesse for forskellige kvanteteknologiplatforme, da de hver især har deres fordele og ulemper, og da en “vinder teknologi” endnu ikke er identificeret. På Niels Bohr Institutet arbejder vi intenst med kvantecomputere baseret på lys, hvor fotoner anvendes som kvantebits. I denne artikel vil vi forklare, hvordan sådan en fotonisk kvantecomputer fungerer, og hvorfor de kan vise sig at være løsningen på den store udfordring om, hvordan man opskalerer kvantecomputere.

## Det svageste glimt i universet som byggeklods

I science fiction-genren elsker man at spekulere over, hvor kraftige lysstråler man kan skabe, og hvad det kunne bruges til. Alt fra en gigantisk laserstråle, der bruges til at ødelægge en meteor og redde planeten, til lyset fra en hel stjerne samlet igennem en Dysonkugle. Der er nok færre, der har tænkt over hvad, man kunne bruge de svageste lysstråler til, men det er faktisk her, at nøglen til kvanteteknologiens store udfordringer måske ligger gemt. For over 100 år siden forudsagde Max Planck og Albert Einstein, at energien for en lysstråle har en mindste størrelse. Denne størrelse kalder vi for et lyskvant eller en foton. Det betyder, at for en given bølgelængde findes der en minimum-energi, som lyset udgør ifølge fysikkens love. Den svageste lysstråle vil derfor bestå af en stråle af lyskvanter, som kommer en ad gangen. Tænk på det som en “fotonpistol” – når man trykker på aftrækkeren, udsendes én og kun én foton, se figur 1. Og nu, 100 år efter at tanken opstod, har vi faktisk formået at bygge en sådan lyskilde.

Ifølge Niels Bohrs atommodel bliver en foton udsendt, når en elektron i et atom henfalder fra en højere-liggende orbital til en lavere-liggende. Vores fotonkilde er baseret på netop dette princip, men i stedet for et atom, bruger vi et såkaldt kvantepunkt, som er et “designatom”

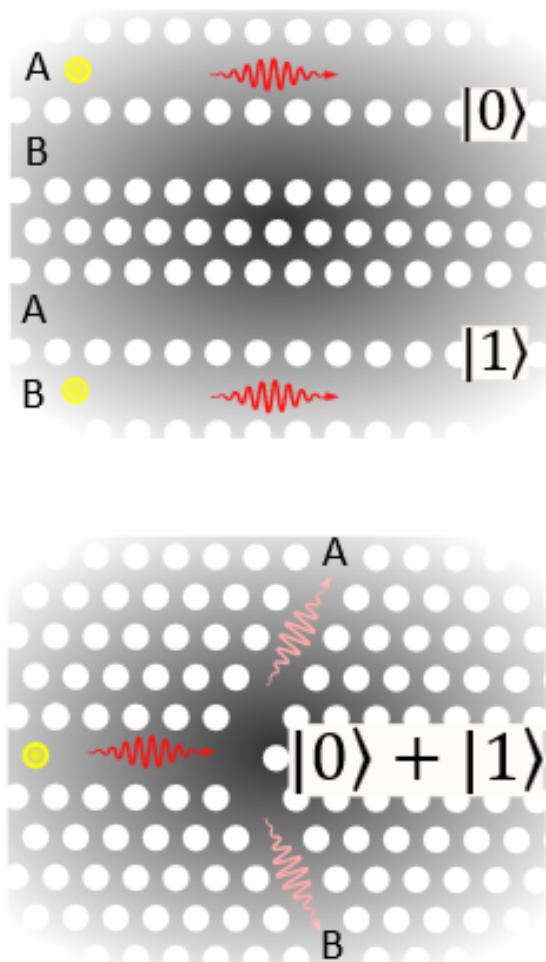
indlejret i et halvledermateriale. Fotonerne kan vi opfange med en fotonisk “chip”, en såkaldt fotonisk krystalbølgeleder, se figur 1. Baseret på denne metode har vi bygget verdens bedste en-fotonlyskilde – eller en “foton pistol”, som udsender én og kun én foton hver gang vi trykker på aftrækkeren. I vores eksperimenter gøres dette ved at anslå kvantepunktet med en meget kort laserpuls. En-fotonlyskilden er efter mange års intens forskning faktisk blevet så god, at den er blevet til et kommercielt produkt. Du kan læse mere om kvantepunkter og fotoniske krystaller i artiklen fra det danske startup Sparrow Quantum side 29.



**Figur 1.** Venstre: Det svageste “lysvåben” i universet er en pistol, som når man trykker på aftrækkeren udsender én og kun én foton. Højre: Et kvantepunkt (gul prik) udsender én foton ad gangen, når det anslås. Disse fotoner opfanges med stor effektivitet i en såkaldt fotonisk krystalbølgeleder, hvorved fotonen udsendes i kun en retning.

Det faktum, at vi kan generere én og kun én foton, åbner op for muligheden for at skabe en lysbaseret kvantecomputer. Der er to fundamentale egenskaber i kvanteverdenen, som giver kvantecomputere en stærk fordel overfor deres klassiske modpart: superposition og entanglement. En partikel siges at være i en superposition, hvis den er i flere tilstande på én gang. En tilstand kunne for eksempel være positionen, så hvis en partikel kan være i punkt *A* eller punkt *B*, så kan den også være i en superposition, hvor den er begge steder samtidigt. Dette er en af særhederne i kvantemekanikken. Superpositionstilstande findes kun så længe, kvanteobjektet ikke bliver observeret. Efter en måling vil superpositionen kollapse, og partiklens tilstand vil ændre sig til kun at være ét sted. Det kan sammenlignes med en tryllekunstner, der altid har en kugle i den hånd, vi peger på, men når først den er åbnet, ligger den kun ét sted. Tryllekunstneren benytter sig formentlig af forskellige illusionstrick, men næppe af kvantesuperpositions tilstande – disse er nemlig meget

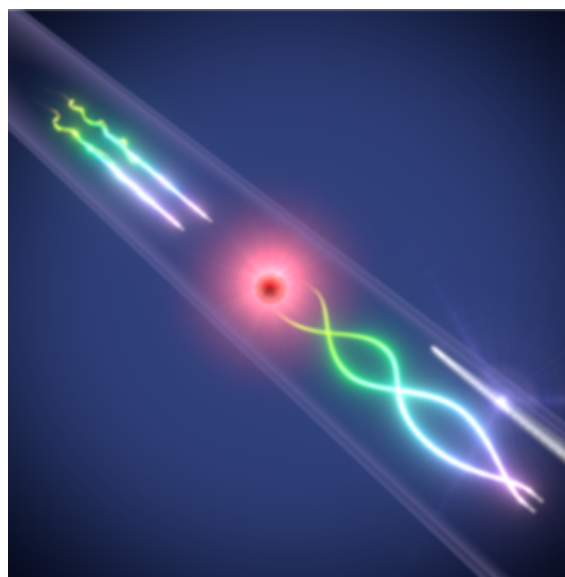
skrøbelige, og jo større objekterne bliver, desto skrøbeligere bliver de. Den næste egenskab er entanglement, som er et flerpartikel-fænomen. To partikler siges at være entangled (eller på dansk, sammenfiltrede), hvis deres kvantetilstande er afhængige af hinanden. Hvis to partikler er entangled, vil en måling på den ene partikel øjeblikkeligt kollapsere ikke alene egen, men også entanglement-partnerens tilstand. En kvantecomputer udnytter superposition og entanglement til at lave beregninger, som vil være umulige med selv verdens største klassiske computer. I det følgende vil vi forklare, hvordan begge egenskaber kan opnås, hvis man har adgang til én foton ad gangen. Dette er princippet bag en lysbaseret kvantecomputer.



**Figur 2.** Øverst: En foton, som rejser i bane A, udgør en qubit i tilstand 0, hvorimod én, der rejser i bane B, udgør tilstand 1. Nederst: Når en foton møder et vejkryds, så tager den ikke enten A eller B men BÅDE A og B. Dette udgør en qubit i en superposition af 0 og 1.

En klassisk computers mindste regneenhed er en bit, som fremkommer af et fysisk system, der kan have to forskellige tilstande. Moderne computere bruger transistorer til at processere bits. Transistorer er små elektroniske enheder, som enten ikke gør noget (tilstand 0) eller lader en strøm køre igennem sig (tilstand 1). En kvantecomputer har ligeledes en mindste bestanddel, som hedder en qubit, og den minder meget om en bit, bortset fra at den også kan være i en superposition mellem dens to tilstande 0 og 1. En fotonisk qubit tager udgangspunkt i den bane, som fotonen følger.

Hvis fotonen bevæger sig i bane A, er tilstanden 0, og tager den bane B, er den 1. Da fotonen er den mindste bestanddel af lys, kan den ikke deles, så hvis vi forsøger at skille den ad på en “forgrening”, kan det forstås således, at fotonen kommer i en superpositionstilstand, hvor den går op og ned samtidigt, som illustreret i figur 2. Sådant en forgrening kalder vi for en beamsplitter, og den sætter en fotonisk qubit i en superposition mellem 0 og 1. Her er det vigtigt, at der kun er én foton: normalt lys med mange fotoner vil ikke komme i en superpositionstilstand, men blot deles i to efter passagen af en beamsplitter.



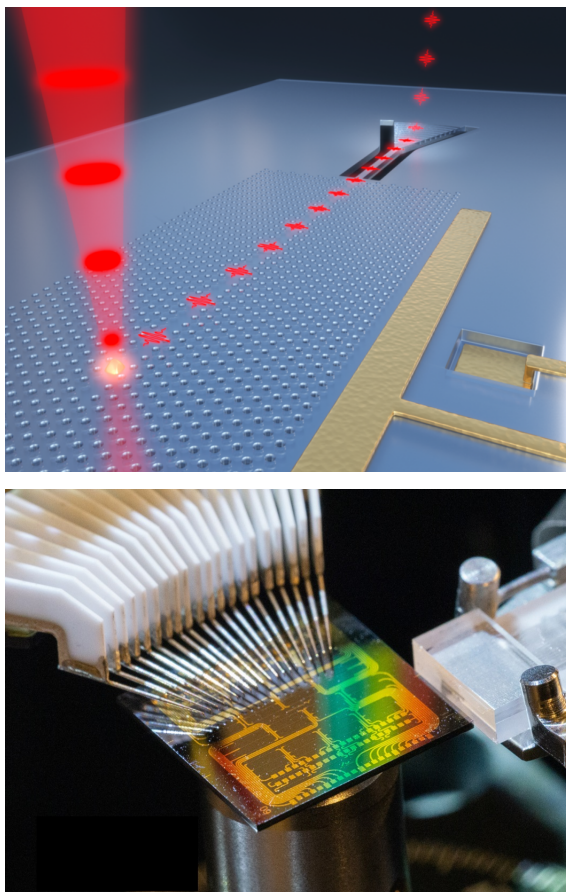
**Figur 3.** To fotoner møder hinanden og vekselvirker med et kvantepunkt. Vekselvirkningen betyder, at de to fotoners kvantetilstande sammenfiltres.

Hvis man har mere end én qubit, kan man begynde at skabe entanglement imellem dem. Dette gøres ved at få partiklerne til at vekselvirke, således at deres kvantetilstande bliver afhængige af hinanden. Desværre er det et velkendt fysisk fænomen, at to fotoner, der møder hinanden, også hurtigt “glemmer” hinanden igen – foton-foton-vekselvirkninger er meget svage. Det er dog muligt at få fotoner til påvirke hinanden, hvis der er en tredje part som facilitator. Dette kunne for eksempel være en elektron eller et atom, som begge fotoner vekselvirker med. Det har dog været rigtig svært for fysikere at finde sådan en facilitator i praksis, og det har været en af de fundamentale begrænsninger i kvantefotonik. Heldigvis har vi for nyligt opdaget, at de selv samme kvantepunkter, som bruges til at skabe fotonerne, også kan bruges til at opnå foton-fotonvekselvirkning [1]. Som en mor eller far, der er dygtig til at få sine børn til at være gode venner, kan et kvantepunkt skabe samhørighed (entanglement) mellem de fotoner, den selv har skabt.

### Fordele ved lys

Det ser ud til, at det er muligt at lave en lysbaseret kvantecomputer, men er det en god idé? Her vil vi prøve at forklare fordelene ved en lysbaseret kvantecomputer, samt nogle af de udfordringer, som skal løses i fremtiden. Der er to vigtige fysiske egenskaber, som vi vil tage

udgangspunkt i: At lys rejser med lysets hastighed, og at fotoner er svagt vekselvirkende partikler.



**Figur 4.** Øverst: Et kvantepunkt aktiveres med en laserpuls og udsender derefter én foton ad gangen, der opfanges af en fotonisk krystalbølgeleder. Selve udsendelsen af fotonen fra kvantepunktet foregår ved meget lav temperatur for at undgå dekohærens, men så snart fotonerne er udsendt, kan de processeres ved stuetemperatur. Nederst: Eksempel på en fotonisk mikrochip – baseret på lys – der fungerer ved stuetemperatur og som kan udføre kvantecomputeroperationer.

Ud fra vores hverdags erfaring med lyset er det muligt at observere, at fotoner er svagt vekselvirkende partikler. Når vi lyser med en laser på en væg, ser vi, at laserstrålen stopper på væggen, mens vi overser, at laserstrålen rejste uberørt igennem billioner af luftmolekyler uden at kollidere. Faktisk er det langt over 99.99% af fotonerne, der når hen til væggen (hvis den er et par meter væk). Havde vi i stedet skudt elektroner afsted med samme energi, ville succesraten være markant lavere. En af de største udfordringer ved at bygge en kvantecomputer baseret på elektroner ligger i dekohærens, der opstår, når elektronerne vekselvirker med omgivelserne, og derigennem mister kvanteinformation. Problemet bliver ofte imødegået ved at køle elektronen ned til temperaturer, der er meget tæt på det absolutte nulpunkt, og selv dér er dekohærens en udfordring. Nedkølingen kræver en kæmpestor og højteknologisk fryser, som er en af grundene til at nutidens kvantecomputere er ekstremt dyre og endnu ret primitive maskiner. Hvis man brugte fotoner i stedet for, ville man slet ikke have brug for at køle ned, da fotonerne ikke påvirkes af dekohærens selv ved stuetemperatur. Dette giver mulighed for at forarbejde lyset i mikrochips, som den vist i figur 4, der er

udviklet af telekomindustrien og kan masseproduceres [2].



**Figur 5.** Fotoniske qubits kan bruges til at forbinde kvantecomputere på meget lange afstande, hvilket åbner op for muligheden for kvanteinternettet.

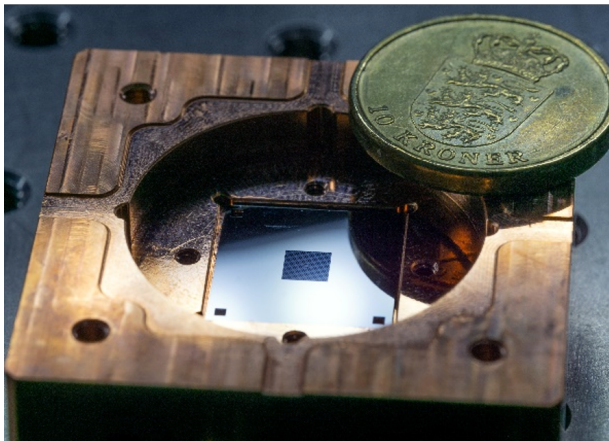
At lys bevæger sig med lysets hastighed, viser sig at være både den største fordel og den største ulempe ved lysbaserede kvantecomputere. Man kunne tro, at den ultimative hastighed vil gøre en kvantecomputer baseret på lys ekstremt hurtig, men faktisk er dette ikke direkte relateret til beregningshastigheden. Grunden til, at hastigheden er en fordel, er, at fotoner kan rejse lange afstande på meget kort tid, så en kvantebit fra en fotonisk kvantecomputer nemt og hurtigt kan sendes til en anden kvantecomputer. Det betyder at fotoner kan bruges til at koble kvantecomputere igennem det, vi kalder for kvanteinternettet [3].

At fotoner bevæger sig hurtigt kommer dog med en pris, da de netop altid er i bevægelse. Det skaber den udfordring, at hvis man prøver at lave en lang udregning, vil fotonerne løbe væk, før udregningen er færdig. En elektronisk kvantecomputer kan derimod, så længe den befinder sig i en meget kold fryser, holde på kvanteinformation længe nok til at gennemføre lange udregninger. Problemet kan dog omgås på snedig vis i en optisk kvantecomputer, da man blot deler de lange udregninger op i mange små udregninger. Små udregninger kan gennemføres med fotoner på meget kort tid, og nye fotoner kan derefter anvendes til nye udregninger. Så længe man har masser af fotoner til rådighed, kan en lysbaseret kvantecomputer stadig bruges til at løse komplekse problemer. Bemærk, at kravet om rigtig mange fotoner ikke er i modstrid med kravet om én foton ad gangen, man skal blot sørge for at generere lyskilder med tilstrækkelig høj en-fotonflux – én-foton-maskingeværer i stedet for én-foton-pistoler. Dette er forskning, vi i øjeblikket arbejder intenst på!

### Hvad fremtiden bringer

Som vi har set, har lysbaserede kvantecomputere den fordel, at de kan fungere ved stuetemperatur og at de nemt kan forbindes til hinanden ved hjælp af kvanteinternettet. Elektroniske kvantecomputere kommer også med fordele og ulemper, men det behøver dog ikke at være et enten-eller, hybride kvantecomputere er også en mulighed. Ny forskning i mekaniske mikromembraner, som dem vist i figur 6, viser, at det er muligt at omdanne informationen fra en elektronisk qubit til en fotonisk qu-





**Figur 6.** Venstre: En mikrochip med en membran, der kan bruges til at koble elektroniske qubits til fotoniske qubits Højre: Nærbillede af membranen, hvor der yderligere kan ses en kapacitor, der kobler til et elektronisk kredsløb (firkant) og en kavitet, der kan oscillere og koble til lys (cirkel).

bit, igennem det man kalder for en kvante-transducer [4]. Det vil åbne muligheden for at forbinde elektroniske kvantecomputere til kvanteinternettet ved hjælp af fotoner, og omvendt at forbinde fotoniske kvantecomputere til et andet system, der kan lagre deres kvanteinformation over længere tid.

## Litteratur

- [1] H. Le Jeannic, A. Tiranov, J. Carolan, T. Ramos, Y. Wang, M. H. Appel, S. Scholz, A. D. Wieck, A. Ludwig, N. Rotenberg, L. Midolo, J. J. García-Ripoll, A. S. Sørensen og P. Lodahl (2022) "Dynamical photon-photon interaction mediated by a quantum emitter," *Nature Physics*, bind **18**, side 1191–1195.
- [2] Y. Wang, C. F. Faurby, F. Ruf, P. I. Sund, K. Nielsen, N. Volet, M. J. Heck, N. Bart, A. D. Wieck, A. Ludwig, L. Midolo, S. Paesani og P. Lodahl (2023) "Deterministic photon source interfaced with a programmable silicon-nitride integrated circuit," *npj Quantum Information*, bind **9**, side 94.
- [3] Th. J. Kimble (2008) "The quantum internet," *Nature*, bind **453**, side 1023–1030.
- [4] P. Seidler, E. Verhagen, A. Schliesser og A. Xue-reb (2021) "Shining a hot light on optomechanics," *IEEE Spectrum*, [spectrum.ieee.org/shining-a-hot-light-on-optomechanics](https://spectrum.ieee.org/shining-a-hot-light-on-optomechanics).



Peter Lodahl er professor i kvantefysik på Niels Bohr Institutet og leder af Grundforskningsfondens center "Hybrid Quantum Networks" (Hy-Q). Han er også grundlægger af virksomheden Sparrow Quantum, som kommerialiserer en-fotonlyskilder.



Carlos Faurby er ph.d.-studerende i fysik på Niels Bohr Institutet. Hans arbejde går ud på at lave praktiske eksperimenter med forskellige teknologier, der kunne muliggøre lysbaserede kvantecomputere. Et af hans eksperimenter involverer den mikrochip, der kan ses på figur 4.

**PFEIFFER VACUUM**

**Nyhed**

**Oliefri vacuumpumpe - HiScroll (6-20 m<sup>3</sup>/t)**  
**Ekstrem lyd- og vibrationssvag**  
**pumpe med kompakt design**



Tlf. 3166 8708  
 Lars.Scholte@pfeiffer-vacuum.dk  
 www.pfeiffer-vacuum.com