

Sparrow Quantum sætter fotonerne fri

Sofie Lindskov Hansen og Maria Genckel, Sparrow Quantum

Baseret på mere end 20 års erfaring fra forskning på Niels Bohr Institutet har Sparrow Quantum kommercialiseret verdens bedste enkelt-fotonkilde, som kan vise sig at blive en afgørende byggesten i udviklingen af ny kvanteteknologi. Denne artikel beskriver hvordan Sparrow teamet kontrollerer udsendelsen af lys ved hjælp af fotoniske krystaller, samt belyser de mange anvendelsesmuligheder af deres teknologi. For at få realiseret de mange potentialer af teknologien er det vigtigt at få den ud til så mange mennesker som muligt – universitetsforskere såvel som større firmaer.

Fra underlig teori til vidunderlig teknologi

Kvantemekanik er den gren af fysikken, der beskæftiger sig med verden på atomar skala. Teorien blev udviklet i det 20. århundrede, og den har revolutioneret vores forståelse af den mikroskopiske verden. I kvantemekanik opfører partikler sig anderledes end det, vi er vant til i vores hverdag. De kan være flere steder på én gang, og deres tilstande beskrives ofte ved sandsynligheder i stedet for bestemte positioner og hastigheder. Vi siger at kvantepartikler kan være i en *superpositionstilstand*, og vi beskriver denne tilstand ved en bølgefunktion, hvor amplituden på bølgen er proportionel med sandsynligheden for at finde partiklen et givent sted. Derudover kan kvantepartikler være forbundet med hinanden på en måde der gør, at hvis jeg måler på den ene, så vil den anden partikel mærke det med det samme - også selvom de er rummeligt adskilt. Det kalder vi for *sammenfiltrering*.

Den danske fysiker Niels Bohr havde mange diskussioner med Albert Einstein angående fortolkningen af den dengang nye teori om den atomare og subatomare verden. Deres diskussioner og tankeeksperimenter tilbage i 1920'erne og 1930'erne har haft en enorm indflydelse på vores forståelse af naturen. Og så har kvantemekanikken og de teknologiske muligheder den har givet os revolutioneret hele vores samfund. Lasere og transistorer er eksempler på teknologier der bygger på kvantemekanik, og uden disse ville vi ikke have hverken computere eller smartphones. Men kvantemekanikken er ikke færdig med at revolutionere vores samfund med teknologiske landvindinger. Vi står på tærsklen til det man kan kalde *den anden kvanterevolution* [1]. Den teknologi der muliggøres, når vi kan manipulere de allermindste byggesten i naturen, har potentiale til at løse nogle af de allerstørste udfordringer vores samfund står overfor i dag. Hvis vi kan bygge en *kvantecomputer* der bruger kvantemekaniske to-niveausystemer som bits, så kan vi udføre beregninger, man end ikke kan drømme om at udføre på selv de mest kraftfulde supercomputere, og det vil have stor betydning indenfor optimeringsopgaver, udvikling af personlig medicin og meget andet. Der er dog lang vej til at udfolde det enorme potentiale, som teknologien rummer. Det er nemlig ikke nemt at mani-

pulere og kontrollere kvantesystemer. De er ekstremt følsomme. Hvis de vekslevirker med omgivelserne så kollapser bølgefunktionen, og systemet mister sine kvantemekaniske egenskaber. Så udfordringen ligger i at kontrollere og manipulere et system på en sådan måde, at systemet på intet tidspunkt føler, at det vekslevirker med sine omgivelser.



Figur 1. En Sparrow Quantum chip placeret ovenpå hullet i en 2-krone. På denne chip er der 400 små strukturer, der kan udsende og guide enkelte fotoner.

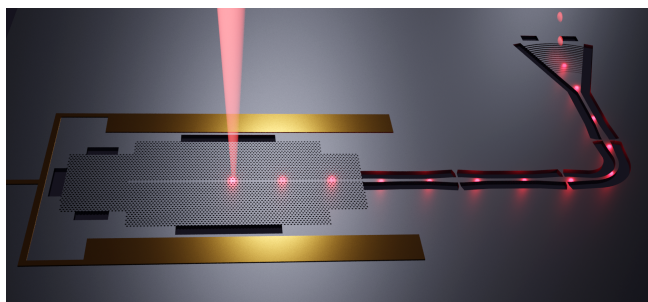
Sparrows enkelt-fotonkilde

Hos Sparrow Quantum arbejder vi med at kontrollere udsendelsen af enkelte fotoner. En foton er slags udelelig lys-partikel, som indeholder den mindst mulige energi for en given bølgelængde. For at forstå hvor lille en energimængde vi snakker om, så tænk på at hvert sekund rammes dine øjne af omkring 1 milliard fotoner¹. Så det at kunne kontrollere naturen ned på enkelt-fotonniveau er slet ikke så lige til, og der er blevet forsket i netop dette i professor Peter Lodahls kvantefotonik gruppe på Niels Bohr Institutet i mange år. Netop denne forskning er hjørnestenen i Sparrow Quantums teknologi. Tanken bag at kommercialisere en enkelt-fotonkilde er, at tage det vi er rigtig gode til, og stille det til rådighed for andre forskere og virksomheder, så de kan koncentrere sig om alle de vidunderlige ting, man kan bruge de enkelte fotoner til. På denne måde er vi med til at accelerere udviklingen af lysbaseret kvanteteknologi og sørge for, at forskere og virksomheder har de bedst

¹Dette er et groft estimat baseret på mange antagelser. Følg dette link for udregningen: <https://medium.com/cortically-magnified/estimating-the-number-of-photons-that-hit-the-eye-c0208e7e0b64>

mulige forudsætninger for at gøre en forskel. Det vi sælger i Sparrow Quantum er en lille chip der udsender en strøm af enkelte fotoner når man skinner på den med en laser.

I selve chippen er der indlejret kunstige atomer, eller såkaldte kvantepunkter i et materiale som er specielt designet til at guide lyset. Kvantepunkterne har den egenskab at når de exciteres, så vil de henfalde tilbage til deres grundtilstand og i den proces udsendes der én og kun én foton. På figur 2 kan man se en fotonisk krystal hvori der sidder et lillebitte kvantepunkt. Kvantepunktet exciteres ved hjælp af laseren, og udsender derefter en strøm af enkelte fotoner som guides hen til en særligt gitter som sender fotonerne opad.



Figur 2. En fotonisk krystal med indlejrede kvantepunkter. En laserstråle fra toppen exciterer et kvantepunkt, hvorefter det udsender fotoner én ad gangen. De enkelte fotoner rejser langs en bølgeleder, indtil de bliver sendt opad af et specielt fremstillet gitter.

Herefter kan man koble fotonerne ind i en fiber, og herfra er der mange forskellige muligheder for, hvad man kan gøre med dem. Hos Sparrow Quantum er vi eksperter i at fremstille netop denne lille chip, der udsender enkelte fotoner, og vi sælger den til forskningsgrupper på universiteter og til andre virksomheder, der udvikler kvanteteknologi. På denne måde er vi med til at accelerere udviklingen af kvanteteknologi med lys ved at give forskere og virksomheder den bedste mulige teknologi, som de så kan anvende som delkomponent i deres forskning eller produktudvikling.

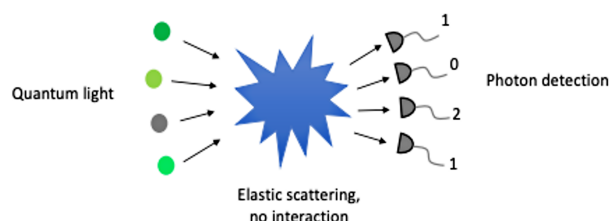
Anvendelsesmuligheder

Enkelt-fotoner finder anvendelse i en række forskellige teknologier. Herunder vil vi nævne nogle af dem vi finder mest relevante og lovende.

Som vi nævnte i indledningen vil en computer baseret på kvantemekaniske bits eller såkaldte kvantebits have enorm stor betydning for vores samfund. Der forskes for fuld kraft verden over på mange forskellige måder for at udvikle kvantecomputere. Nogle vil bruge neutrale atomer; nogle forsker i at bruge superledende kredsløb, mens andre vil bruge ioner fanget i fælder. Men man kan også bruge fotoner som informationsbærere i en kvantecomputer. Du kan læse meget mere om lysbaserede kvantecomputere, og hvorfor det er så vigtigt at have en god, deterministisk enkelt-fotonkilde i artiklen “En lysbaseret kvantecomputer” af Carlos Faurby og Peter Lodahl i dette nummer af Kvant.

En undergruppe af kvantecomputere, der kaldes “Boson Samplere”, bruger også enkelt-fotoner. Boson

Samplere er mindre krævende at fremstille end universelle kvantecomputere, men deres anvendelser er også begrænset til nogle få typer af opgaver, og der forskes stadig i hvilke opgaver man med fordel kan løse med dem. Grundlæggende er Boson Sampling en metode til at forudsige resultatet af en måling med mange lyspartikler i mange mulige tilstande. Man fremstiller en Boson Sampler som vist på figur 3 ved at tage en masse enkelte fotoner og sende dem ind i et optisk netværk. På grund af fotonernes kvanteegenskaber vil det være ekstremt svært for selv de mest kraftfulde klassiske computere at forudsige hvor fotonerne kommer ud.

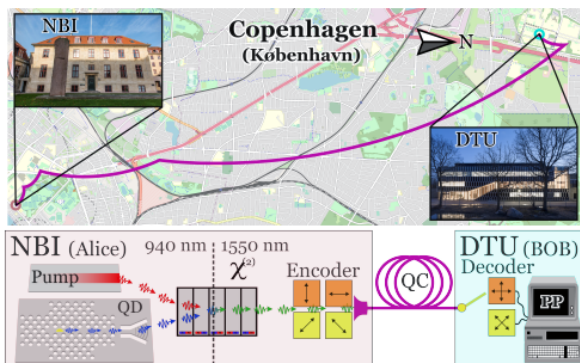


Figur 3. Sempel illustration af en Boson Sampler. Enkelte fotoner kommer ind fra venstre, veksler i et optisk netværk (blå figur), og bliver detekteret på måleapparaterne til højre. Figuren er fra [2].

Boson sampling er interessant, fordi det er et problem, hvor kvantecomputeren vil have en meget stor fordel over klassiske computere, og derfor demonstrerer det, vi kalder “kvantefordel”. Men der er indenfor de sidste år dukket interessante mulige anvendelsesmuligheder op. Blandt andet har man fundet ud af, at man kan bruge Bosonsampling i graf-analyse [3], et matematisk problem hvor man undersøger hvordan forskellige enheder er forbundet. Det kan være relevant indenfor optimeringsopgaver indenfor logistik og indenfor molekylesimuleringer [2].

Ud over beregningsopgaver kan man også bruge enkelte fotoner til at forbinde kvantesystemer over store afstande og på denne måde lave et stort netværk - en slags kvanteinternet. Man kan også sende hemmelige eller krypterede beskeder ved hjælp af enkelte fotoner. Det kaldes for kvantekryptering, og benytter enkelte fotoner til at udveksle information mellem afsender og modtager på en måde der gør det fuldstændig umuligt for en tredje part at aflytte forbindelsen. I november 2022 sendte man en kvantekrypteret nøgle fra Niels Bohr Institutet (NBI) på Østerbro i København til Danmarks Tekniske Universitet (DTU) i Lyngby [4,5] – altså over en afstand på 18 km. Figur 4 viser afsender (NBI) og modtager (DTU). Figuren viser også hvordan enkelt-fotoner udsendes fra et kvantepunkt (QD), hvorefter fotonernes bølgelængde ændres² fra 940 nm til 1550 nm. Herefter sendes fotonerne igennem en “encoder” og så videre ind i en fiber (QC). Når fotonerne ankommer til Lyngby, bliver de undersøgt af en “decoder”, og der er etableret en hemmelig kode, som kun afsender og modtager kender. Ethvert forsøg på at aflytte forbindelsen vil blive opdaget med det samme, og aflytteren vil derfor ikke kunne få adgang til den hemmelige information.

²Bølgelængden ændres for at undgå at for mange fotoner forsvinder på vej fra NBI til Lyngby



Figur 4. Kortet viser et kvantekrypteret link mellem NBI og DTU, samt illustration af teknologien hos afsender såvel som modtager. Figur fra [2].

Konklusion

Der er mange interessante anvendelsesmuligheder for enkelte fotoner – og listen er endnu længere end den vi er kommet ind på her, og den vil højst sandsynlig vokse sig længere og længere i takt med at forskningen på området intensiveres. En ting er i hvert fald sikkert; i Sparrow Quantum arbejder vi på at give så mange som muligt adgang til en enkelt-fotonkilde. En kilde, hvor fotonerne udsendes deterministisk og med meget høj effektivitet, hvilket er afgørende for at realisere de mange muligheder og tage dem fra de første gode ideer, der opstår på universiteterne, og ud i virksomhederne, hvor de kan blive opskaleret og optimeret til et niveau, hvor de virkelig kommer til at spille en transformativ rolle for vores samfund.

Litteratur

- [1] P. Lodahl, K. Splittorf og A. S. Sørensen (2021) “På tærsklen til en ny kvanteteknologisk revolution”, *KVANT*, bind 32, nr. 2, side 26–28.

- [2] I. Walmsley (2023) “Light in quantum computing and simulation: perspective”, *Optica Quantum*, bind 1, side 35–40
- [3] J. M. Arrazola og T. R. Bromley (2018) “Using Gaussian Boson Sampling to Find Dense Subgraphs”, *Phys. Rev. Lett.*, bind 121, side 030503.
- [4] M. Zahidy m.fl. (2023) “Quantum Key Distribution using Deterministic Single-Photon Sources over a Field-Installed Fibre Link”, *arXiv*, ID: 2301.09399.
- [5] Kvant-nyheder (2022) “Kvantekrypteret forbindelse mellem NBI og DTU”, *KVANT*, bind 33, nr. 4, side 34.



Sofie Lindskov Hansen er forretningsudvikler i Sparrow Quantum. Hun er ph.d. fra Peter Lodahls forskningsgruppe på Niels Bohr Institutet, hvor hun har arbejdet med enkelt-fotonkilder i mange år. Sofie er medlem af “The Young Academy of Technology, Science and Innovation” (YATSI) hvor hun arbejder med at styrke forbindelsen mellem universiteter og virksomheder.



Maria Genckel er Chief Marketing Officer i Sparrow Quantum. Hun er uddannet fra Copenhagen Business School indenfor økonomi og business administration. Maria mange års erfaring fra deep-tech-verdenen, hvor hun har arbejdet i både Danmark og USA, og så er hun en del af European Innovation Councils “Women Leadership Programme”.

Kvant-nyheder

Christine Pepke Gunnarsson, Kvant

Andreas Mogensen filmer sjældne lyn fra rummet

ATMOSFÆREFYSIK. Det er lykkedes Andreas Mogensen, der befinder sig på den internationale rumstation ISS, at filme og tage billeder af lynfænomenerne med et særligt kamera udviklet på DTU Space. Kameraet har en høj tidsopløsning hvilket er nødvendigt for at kunne se og følge lynenes udvikling.

Det nye kamera fra DTU kaldet IniVation er et “event kamera”, der kan tage op til 100.000 billeder i sekundet. Det er monteret oven på et almindeligt Nikon videokamera.

De sjældne fænomener røde feer og blå jets tilhører

gruppen af “Transient luminous events” (TLE), som beskriver flere forskellige typer lyn i den øvre atmosfære.

En rød fe er et kæmpelyn, der forekommer højt over tordenskyer i atmosfæren mellem 40–80 km over jordoverfladen. Røde feer er egentlig ikke lyn, men et koldt plasmafænomen, som skyldes en elektrisk udladning, der inducerer et lysende plasma, ligesom vi kender det fra neonrør.

Blå jets er omvendte lyn, som slår opad fra tordenskyen. Almindelige lyn, som vi kender dem på Jorden, slår nedad fra tordenskyen. Forskere mener, at blå jets bevæger sig opad mod rummet pga. en elektrisk ubalance i toppen af tordenskyen og at der her sker

en kortslutning i tordenskyen, som får lyngnisten til at bevæge sig opad. De blå jets bevæger sig med 360.000 km/timen.

Den flotte blå farve i de blå jets skyldes kvælstofmolekyler, som lynets elektroner exciterer, hvorefter de udsender lys. De røde feers farve skyldes også excitationer i kvælstofmolekyler, og stammer fra overgange ved højere bølglængder, som giver rødt lys.

De blå jets opstår først, og næsten samtidig dannes de røde feer højere oppe i mesosfæren. Lynene er svære at observere, og de breder sig over store områder – i billedet nedenunder er den røde fe ca. 14×26 km.



Figur 1. Lyn oplyser en sky, og i atmosfæren over lynet ses en rød fe i 40–80 kilometers højde. (Foto: Andreas Mogensen / DTU / ESA).

Andreas Mogensen finder lynene i samarbejde med bl.a. DMI, der giver vejrprognoser om, hvor og hvornår lynene kan opstå i atmosfæren i forhold til rumstationens placering.

Billederne af lynene skal hjælpe forskerne med at forstå, hvordan lyn påvirker atmosfærens sammensætning særligt i forhold til mængden af drivhusgasser i atmosfæren.

Kilder: DTU Space og videnskab.dk.

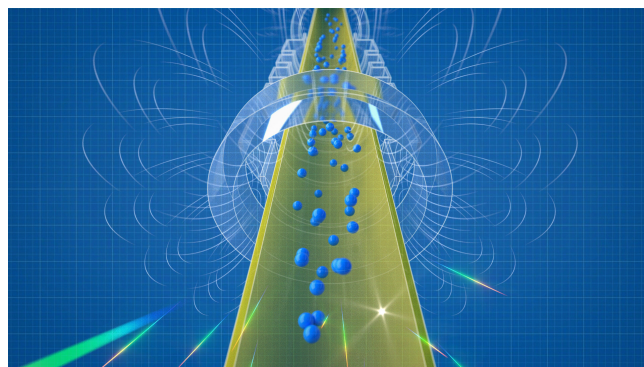
Antistof falder (også) nedad

ANTISTOF. Antistof er et spejlbillede af stof, hvilket betyder, at det har de samme egenskaber. masse, levetid og spin som stof, men at ladningen og nogle kvantetal som fx pariteten (rumkoordinaterne) og tiden er modsat af stof. Lidt kompliceret kan vi forstille os, at antistof bevæger sig bagud i tid. Hver partikel i standardmodellen har en antipartikel, det meste kendte eksempel er nok positronen som er elektronens positivt ladede antipartikel.

Når stof og antistof mødes annihilere de, og der dannes lys, neutrinoer og ioniserende stråling. Fotoner (lyspartikler) kan omvendt kolliderer og danne et stof-antistof-partikelpar. Forskerne mener, at der i universet

er produceret lige meget stof og antistof, men at en asymmetri har gjort, at kun stof har overlevet i annihilationerne. Denne asymmetri er stadig et af de største mysterier i kosmologien.

Det har undret fysikere, om tyngdekraften ville virke på antistof på samme måde, som den virker på stof. Ifølge ækvivalensprincippet i Einsteins relativitetsteori vil tyngdekraften påvirke antistof på samme måde som stof og få det til at falde nedad på Jorden. Men det er muligt, at tyngdekraften virker anderledes på antistof. Hvordan tyngdekraften påvirker antistof, har forskere på CERN nu undersøgt i et forsøg kaldet ALPHA.



Figur 3. Tegningen viser, hvordan antibrint falder nedad i tyngdefeltet og annihilere i en magnetisk atomfælde.

Forsøget på CERN gik ud på at sende antiprotoner og positroner (antielektroner) ind i en lodret atomfælde, hvor de kan danne neutralt antihydrogen, når en positron bindes til en antiproton. Da antihydrogen, som hydrogen, har et magnetisk moment, kan det holdes fast i et magnetfelt. Det magnetiske moment er meget lille, så der er brug for stærke magnetfelter for at holde antihydrogen i fælden. Forskerne skrues herefter ned for magnetfeltstyrken og ser, hvilken vej antihydrogen bevæger sig. Når magnetfeltet skrues ned, bevæger antihydrogen sig og kolliderer med væggen i kammeret og annihilere med stof, og da der er flere detektorer i kammeret, kan forskerne måle, hvor annihilationen sker. Forskerne observerede, at det meste antihydrogen bevægede sig nedad præcis som det meste hydrogen gør det. De kunne derfor konkludere, at antihydrogenatomerne påvirkes af en attraktiv tyngdekraft mellem atomerne og Jorden, præcis som hydrogenatomer.

Det er vigtigt, at det er neutralt antistof, de laver eksperimentet med, da tyngdekraften er den svageste kraft og derfor svært at observere. Hvis stoffet er ladet, som fx antiprotoner alene, ville det påvirkes meget mere af de andre kræfter.

Forsøget er første skridt på vej mod præcisionsstudier af størrelsen af tyngdeaccelerationen mellem antistof og Jorden. Måske en dag deres forskning kan forklare asymmetrien mellem stof og antistof i Universet.

Kilde: E. K. Anderson m.fl. (2023) "Observation of the effect of gravity on the motion of antimatter", *Nature*, bind 621, side 716–722.

Flere Kvant-nyheder

Der er flere nyheder side 28 i bladet.