

På tærsklen til en ny kvanteteknologisk revolution

Peter Lodahl, Kim Splittorff og Anders S. Sørensen, Niels Bohr Institutet

Drevet af en rivende teknologisk udvikling åbner der sig netop nu nye muligheder for anvendelse af kvantemekanik, der har potentialet til at revolutionere vores samfund. Vi giver her eksempler på de nye muligheder, og hvordan vi ved at kombinere forskellige kvantesystemer kan realisere hybride systemer i et forsøg på udnytte og optimere fordelene ved de forskellige kvanteteknologiske "byggeklodser". Samtidig giver vi vores bud på, hvordan vi i Danmark kan sikre, at vi uddanner en "kvantekar" arbejdsstyrke, der kan udnytte de muligheder, de nye kvanteteknologier åbner for.

Kvantemekanik er uden tvivl en af de største udfoldelser af menneskets intellekt, måske den allerstørste. Kvantestystemer har deres helt egen logik, der ofte er i direkte modstrid med den intuition, vi har opnået fra klassiske systemer. Fx er det naturligt fra et klassisk synspunkt, at man kan følge en partikels bevægelse uden at ændre den, mens dette er umuligt for et kvantesystem.

Kvantemekanik er ikke blot en intellektuel præstation, der har revolutioneret vores forståelse af verdenen på atomar skala, den har også revolutioneret hele vores samfund: Uden kvantemekanik var der fx ingen smartphones, computere, internet, lasere, osv. Man kunne derfor med rette hævde, at kvantemekanik allerede har gjort sit. Ikke desto mindre står vi måske på tærsklen til en ny kvanteteknologisk revolution, der har potentialet til at løse nogle af de udfordringer, det globale samfund har med fx at udvikle ny medicin og at finde en langsigtet løsning på klimaudfordringerne.

Vi vil her give eksempler på nogle af de fremskridt, der sker netop nu i Center for Hybrid Quantum Networks (Hy-Q) på Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet, og samtidig give vores bud på, hvordan Danmark kan sikre, at vi har en "kvantekar" arbejdsstyrke, der kan høste frugten af den kommende kvanterevolution.

Hvad er nyt, og hvad er udfordringen?

Teknologier, der har potentialet til at kunne ændre vores samfund, kaldes transformative teknologier. Når vi i dag er på tærsklen til at realisere transformative kvanteteknologier, skyldes det, at eksperimentel kvantefysik har gennemgået en rivende udvikling, så vi i dag har fuld kontrol over de basale byggesten for kvanteteknologi. Fælles for de nye kvanteteknologier er, at man søger at lagre information i sammenfiltrede (entangled) kvantemekaniske tilstande. Hermed kan man processere enorme mængder data, som vil være u håndterlige selv med verdens mest kraftfulde klassiske computer, eller sende ubrydelig krypteret information, hvor sikkerheden er garanteret af kvantemekanikkens love.

En af de helt store udfordringer i udviklingen af nye kvanteteknologier er at opskalere små kvantesystemer til større og mere komplekse funktionaliteter. Det er i dag et åbent og fundamentalt forsknings spørgsmål at forstå og dernæst realisere, hvordan man

bedst laver kvantesystemer større samtidig med, at de delikate kvantemekaniske sammenfiltrede tilstande bevares. Udfordringen er, at kvantemekaniske tilstande er skrøbelige og derfor skal skærmes meget effektivt for alle former for forstyrrelse. Af den grund udvikler kvanteteknologi helt nye standarder for teknologi, som også har en kraftigt afsmittende effekt på andre områder end kvanteteknologi.

I Center for Hybrid Quantum Networks (Hy-Q) arbejder vi eksperimentelt med at konstruere kvantenetværk baseret på lys (fotoner) og stof (atomer). Vi fremstiller specielle nanofotoniske komponenter, som muliggør, at en foton og et kunstigt atom kan vekselvirke meget effektivt med hinanden. Baseret på dette, vil vi opskalere til større netværk, og bl.a. demonstrere en såkaldt "kvantesimulator", der potentielt kan udføre beregninger, som ikke kan udføres på klassiske computere. Vi vil desuden forbinde kvantesystemer over store afstande og derved lave et "kvanteinternet".

For at opskalere de eksperimentelle kvantesystemer vil vi fx prøve på at generere et netværk af atomer, hvor hvert atom er koblet til andre ved at udveksle netop én foton ad gangen. Kan man dette, opnås en række nye muligheder inden for kvantecomputing og kvantekommunikation. Det er et forskningsfelt i en rivende udvikling, og netop nu begynder mange års fundamental grundforskning at lede til nye anvendelser.

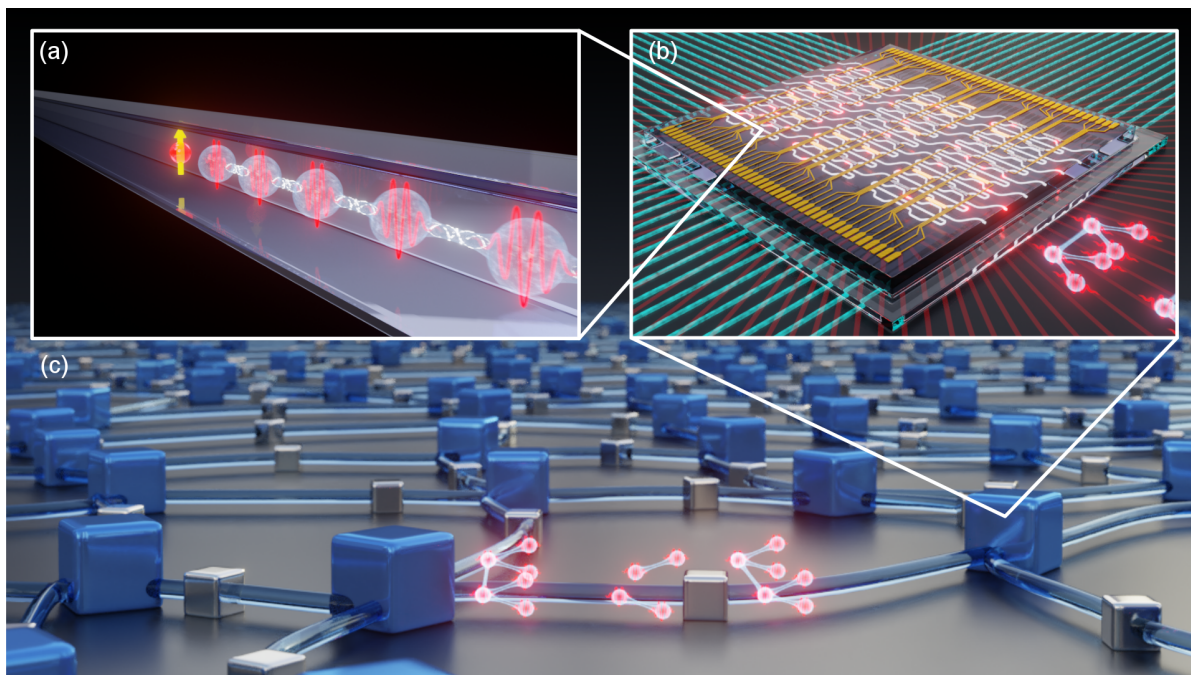
Hybride kvantesystemer

En af de mest lovende udviklinger sker ved at danne hybrider mellem forskellige kvantesystemer, og Hy-Q er førende indenfor denne tilgang.

Centret er finansieret af Danmarks Grundforskningsfond og har som ultimativt mål at gøre et kvanteinternet muligt. De forskellige teknologiske platforme har alle fordele og ulemper, men ved at koble dem og danne hybrider kan vi udnytte det bedste fra hver. Eller så at sige opnå det bedste fra hver verden. Blandt de forskellige kvanteplatforme, Hy-Q forsker i, er fotoner (lyskvanter), atomer og fononer (mekaniske lydquanter), og det er allerede nu muligt at koble disse systemer.

Samarbejde med industri om transformative kvanteteknologier

De kvanteteknologier, der udvikles netop nu, beror på det samme fysiske grundlag, nemlig kvantemekanisk



Figur 1. (a) Illustration af en deterministisk en-foton-kilde udviklet i Hy-Q: En-foton-bølgepakker sendes ud fra et atom og bevæger sig i en nano-lysleder. (b) En-foton-kilde indlejret i en komponent som led i opskaleringen til at generere sammenfiltrede fotoner. (c) Illustration af et komplekst kvantenetværk, hvor information udveksles via sammenfiltrede fotontilstande. Figur fra [2].

sammenfiltrering, men udnytter mulighederne forskelligt. Karakteristisk for udviklingen er, at den i høj grad sker i samarbejde mellem universiteter og industri. For hvis vi skal realisere eksempelvis et kvanteinternet, der gør det muligt at kommunikere verden rundt via sammenfiltrede kvantetilstande, så kræver det både massive investeringer og øje for, hvordan den nye teknologi kan modnes og implementeres.

Vi kan på universitetet skabe fundamentet for en ny teknologi og vise dennes muligheder. De næste skridt med at opskalere teknologien kræver et større samarbejde mellem akademiske og industrielle partnere. Vi arbejder derfor aktivt på at etablere et internationalt konsortium, der kan bringe universiteter og industri tættere sammen.

Nye talenter og opgradering af eksisterende

For at Danmark kan få mest muligt udbytte af den kommende kvanterevolution, er det afgørende, at der er tilstrækkeligt mange veluddannede unge talenter, der har den fornødne indsigt til at udvikle og arbejde med de nye kvanteteknologier; eller med andre ord, at vi har en kvanteklar arbejdsstyrke.

Danmark er (i forhold til vores størrelse) verdensmestre i at uddanne kandidater med stærke kompetencer inden for kvantemekanik [1]. Det er i høj grad disse nye talenter, der driver udviklingen fremad i deres dedikerede arbejde i forskningslaboratorierne. Men med de mange muligheder, som nye kvanteteknologier åbner, er det ikke tilstrækkeligt at uddanne en lille gruppe højt specialiserede studerende, der kan udvikle fundamentet for de nye kvanteteknologier. Der er samtidig et behov for at skabe en bred forståelse for de nye kvanteteknologiers muligheder, særligt i danske virksomheder, men også blandt kommende brugere.

Nedenfor giver vi eksempler på mulige tiltag gen-

nem uddannelsessystemet, fra gymnasiet over universitetet til efter- og videreuddannelse, som vi mener kan have afgørende betydning for, at Danmark får mest mulig nytte af den kommende kvanterevolution.

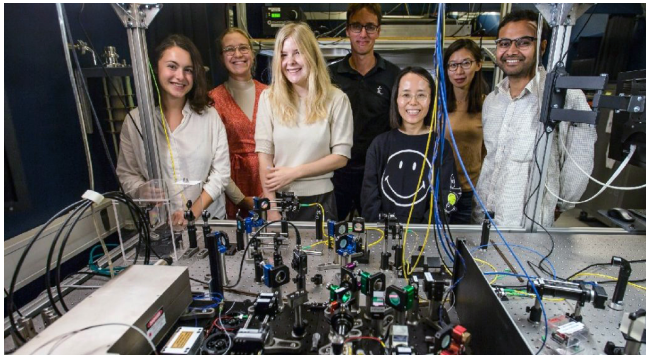
Gymnasiet

I gymnasiet er kvantefysik en central søjle i læreplanernes kernestof, både på A- og B-niveau i fysik [3]. Pensum dækker bredt fra atomers og atomkerners opbygning over fotoners energi, atomare systemers emission og absorption af stråling, til radioaktivitet. Selv partikelbølge-dualitet er inkluderet på A-niveau, så kvantefysik er solidt repræsenteret.

Det er her, at fundamentet for Danmarks verdensførende position inden for kvanteuddannelse skabes. For at sikre, at dette fundament er up to date, kunne man overveje at udvide kvantefysikkens omfang i gymnasiet eller at ændre fokus i læreplanerne. Kvanterevolutionen vil potentielt komme til at betyde lige så meget for vores hverdag, som kernefysikken gjorde under den kolde krig. Det er derfor oplagt at overveje, om det er muligt også at give eleverne indsigt i sammenfiltrede kvantetilstande.

Vi har meget positive erfaringer med at undervise i kvantemekanisk sammenfiltrering på gymnasiet niveau, og emnet vækker naturligt elevernes nysgerrighed og fascination. Det træner samtidigt elevernes forståelse af sandsynlighedsregning. Vores erfaring er, at det er lige så let for elever at lære at arbejde med to koblede spin-1/2-partikler og målepostulatet, som det er at lære at spille Uno.

Pointen er, at det på en vis måde er blevet simplere at undervise kvantemekanik nu, fordi vi nu arbejder med enkelte tilstande, og hvordan de interagerer med andre tilstande.



Figur 2. Den vigtigste ressource i kvanterevolutionen: De unge nye talenter. Billedet viser teamet, som har udviklet en verdensførende en-foton-lyskilde i Hy-Q på Niels Bohr Institutet. Foto: Ola J. Joensen.

Universitet

Udviklingen af frontforskningen i nye kvanteteknologier ligger i høj grad i krydsfeltet mellem fysik, matematik og datalogi. Derfor er det en stor fordel at have en god forståelse for, hvordan fysikere, matematikere og dataloger hver især bidrager i arbejdet med at udvikle nye kvanteteknologier.

For at sikre en "kvanteklar" arbejdsstyrke, der kan udnytte og udvide de muligheder, den nye teknologi giver for at skabe værdi i samfundet, arbejder Københavns Universitet og DTU netop nu på at etablere en ny kandidatuddannelse i Quantum Information Science. Uddannelsen er designet netop til at ligge i krydsfeltet mellem fysik, matematik og datalogi, og ambitionen er at tiltrække talenter, der vil arbejde tværfagligt og har øje for innovation.

En sådan uddannelse er afgørende, hvis Danmark skal være konkurrencedygtig i den internationale dyst om at udvikle og udnytte den teknologiske kvanterevolution.

Efter- og videreuddannelse

Den teknologiske kvanterevolution vil ikke blot øge efterspørgslen af talenter; den vil også kræve massiv efteruddannelse. Udviklingen går så hurtigt, at den teknologiske verden vil ændre sig flere gange i løbet af et arbejdsliv. Derfor har Niels Bohr Institutet og KPMG etableret et samarbejde om kurser i nye kvanteteknologier for erfarne teknologiekspertter. Kurserne giver indsigt i de nye muligheder, kvanteteknologier åbner, så deltagerne kan vurdere, hvilke af de nye teknologier, der er mest relevante for udviklingen af deres virksomheder.

Opsummering

Verden er på tærsklen til en ny kvanterevolution, og Danmark spiller en særdeles aktiv rolle heri. Vi har i Danmark bl.a. udviklet de redskaber, der gør det muligt at bygge en kvantesimulator, der kan udføre

beregninger, der er umulige på en klassisk computer eller at konstruere et kvanteinternet, hvor information kan sendes, uden det er muligt for andre at læse den. Disse gennembrud er det første skridt ind i en ukendt del af kvanteverdenen.¹

Litteratur

- [1] Economic impact of Quantum in The Netherlands, Quantum Delta, Nederland, 18. maj 2020 (opdateret 28. juli 2020).
- [2] R. Uppu, L. Midolo, X. Zhou, J. Carolan og P. Lodahl (2021) Single-photon quantum hardware: towards scalable photonic quantum technology with a quantum advantage, arXiv:2103.01110.
- [3] <https://www.uvm.dk/gymnasiale-uddannelser/fag-og-laereplaner/laereplaner-2017/stx-laereplaner-2017>



Peter Lodahl er professor i kvantefysik og -teknologi ved Niels Bohr Institutet. Han er direktør for Hy-Q og Novo Nordisk Fondens Center for Solid State Quantum Simulators. Han er ph.d. i kvantefysik (2000) fra Københavns Universitet og har været post.doc. ved Caltech og University of Twente.



Kim Splittorff er lektor på N. Zahles Gymnasieskole og på Niels Bohr Institutet. Han arbejder med teoretisk fysik og har været viceinstituttleder for undervisning på Niels Bohr Institutet. Netop nu er han ved at integrere IBMs eksisterende kvantecomputer i undervisningen på Niels Bohr Institutet.



Anders S. Sørensen er professor i teoretisk kvanteoptik. Han laver teorier for, hvorledes man kan realisere kvanteteknologier i praksis. Hans teorier bliver brugt i nogle af de mest avancerede kvantecomputere i verden. Desuden er han ansvarlig for Niels Bohr Institutets efteruddannelse i samarbejde med KPMG.

¹Det er en fornøjelse at takke alle kollegaer og studerende på universiteter og gymnasier for deres store interesse og entusiasme for kvanteteknologier. Det er i dag, som på Niels Bohrs tid, gennem diskussioner og forsøg på at svare på spørgsmål, at vi bedst kan forsøge at få indblik i kvantemekanikkens verden. Også tak til Niels Bohr Institutet og til Danmarks Grundforskningsfond for den store opbakning og støtte til udviklingen af nye kvanteteknologier i Centeret for Hybrid Quantum Networks.