

Google CEO Sundar Pichai og Google AI Quantum arbejder i deres kvantecomputer laboratorie i Santa Barbara, Californien. Foto: Google



FRA KVANTEFYSIK TIL KVANTECOMPUTERE

Kvantefysikken er svær at blive klog på i den forstand, at fysikerne ikke er enige om, hvordan man egentlig skal fortolke de grundlæggende ligninger. Til gengæld er der ingen tvivl om, at kvantefysikken "virker", hvilket forskerne blandt andet prøver at udnytte til at bygge kvantecomputere.

Af Henrik Bendix, videnskabsjournalist. Vidmere.dk

Om forskeren:



Klaus Mølmer er professor i kvantefysik. Han har i 35 år haft sin gang på Aarhus Universitet, men er for ganske nylig tiltrådt en stilling som professor ved Niels Bohr Institutet på Københavns Universitet. Her skal han fortsat forske i kvantefysik, kvantecomputere samt præcisionsmålinger og kvantespring. klaus.molmer@nbi.ku.dk

Klaus Mølmer er lidt af en manipulator. I årtier har han arbejdet med at finde ud af, hvordan man bedst manipulerer med atomer og lys, så de opfører sig præcis, som han ønsker. Det endelige mål er en kvantecomputer, der kan udføre visse former for beregninger langt hurtigere, end det er muligt med nutidens computere.

Som professor i teoretisk fysik på Niels Bohr Institutet ved Københavns Universitet går han i fodsporene på den mand, instituttet er opkaldt efter. I år fejres hundredåret for Niels Bohrs modtagelse af Nobelprisen i fysik, som han fik for at forklare vekselvirkningen mellem atomer og lys. Klaus Mølmers

speciale er kvanteoptik, som nu går et skridt videre og forsøger at styre denne vekselvirkning præcist.

»Jeg prøver at få de mindste byggesten til at spille sammen og afsøge grænserne for, hvad vi kan gøre i laboratoriet med atomer og lys,« fortæller Klaus Mølmer og fortsætter:

»Vi kan bruge lys til at få atomer til at bevæge sig rundt i de tilstande, vi har lyst til at studere. Vi kan selv bestemme, om et enkelt atom skal hoppe op eller ned i energiniveau. Omvendt kan vi også få atomerne til at udsende lys, når vi vil, og i den retning, vi ønsker det. Vi kan desuden bruge lys til at måle meget præcise egenskaber ved atomerne.«

»Hvis atomer for eksempel er påvirket af et magnetfelt, kan vi måle det i lyset fra dem, og på den måde bliver atomerne meget følsomme måleapparater. Man kan for eksempel måle magnetfelter fra hjerteslag eller strømme i nerverbaner i hjernen hos en patient med en lille gas af atomer placeret uden for patienten.«

»I det lidt længere perspektiv kan vi bruge vekselvirkningerne mellem lys og atomer til databehandling, hvor data bliver opbevaret i atomerne og bliver sendt som lys. Så kan vi lave et internet, hvor vores data er kvantemekaniske og baseret på mikroskopiske partikler, der kan være både det ene og det andet sted på samme tid. Og vi kan bruge

Lejrbålmysteriet:

Kolde gløder: rødglødende lys
Varme gløder: hvidglødende lys

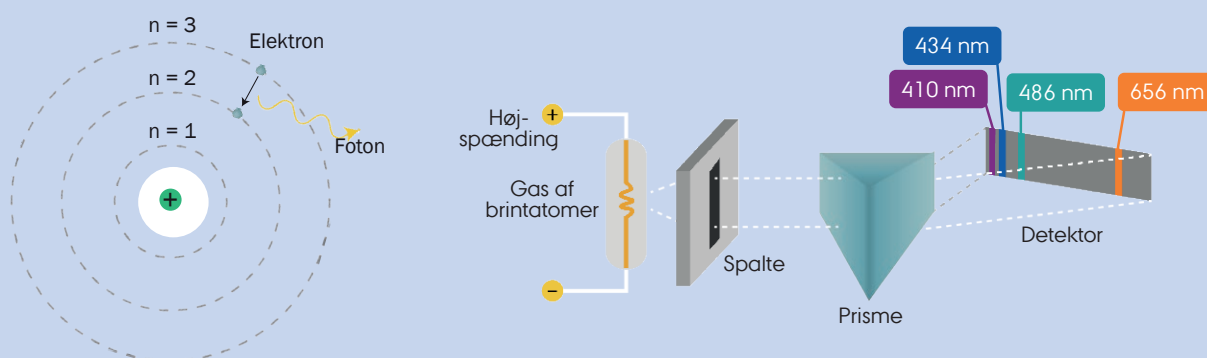


Lyset udsendes i kvanter,
 $E = h \cdot f$
Lav frekvens f (rød) $\rightarrow$ lav energi
Høj frekvens f (gul) $\rightarrow$ høj energi



Foto: Colourbox

Klassisk fysik tilbyder ikke nogen god forklaring på den simple observation, at ilden i et bål har forskellige farver afhængig af temperaturen. Forklaringen er, at lyset udsendes i kvanter. Energien for en foton (lyspartikel) er altid givet ved $E = h \cdot f$, hvor h er Plancks konstant med en ganske lille værdi på $6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s, og f er strålens frekvens. Høj temperatur forbindes med høj energi, og derfor de blålige dele af farvespektret med høje frekvenser. Klassisk fysik kunne heller ikke forklare, hvorfor nogle stoffer kun udsender lys med helt bestemte farver (frekvenser).



Bohrs atommodel giver en forklaring på, hvad der foregår. Bohr antog, at elektronen kun kan befinde sig i ganske bestemte, stabile baner, og at der udsendes eller absorberes et lyskvant, når elektronen hopper imellem banerne. Lysets energi og dermed frekvens er givet af energiforskellen mellem de baner, som elektronerne springer imellem: $E_2 - E_1 = h \cdot f$. Med modellen kunne Bohr endda opnå en meget præcis formel for de tilladte baneenergier, der forklarer spektret fra hydrogen, altså frekvenserne af det lys, som hydrogen udsender.

de kvantemekaniske egenskaber som en vanvittig ressource i en kvantecomputer.«

Atommodel gav Nobelpris for 100 år siden

I 1801 havde den engelske fysiker Thomas Young slået fast, at lys har bølgeegenskaber, men cirka 100 år senere fandt Max Planck og Albert Einstein ud af, at lys udsendes i små, diskrete pakker – lyskvanter – der nu kaldes fotoner. Specielt ved sin forklaring på den fotoelektriske effekt viste Einstein, at lys ikke kun kan forstås som bølger, men også har partikelegenskaber.

Samtidig kunne fysikerne måle, hvordan forskellige grundstoffer

udsender lys med forskellige, karakteristiske bølgelængder. De spektroskopiske analyser gjorde det muligt at identificere eksisterende grundstoffer og finde helt nye, men før Bohr havde ingen været i stand til at forklare, hvorfor atomerne absorberer og udsender lys ved ganske bestemte bølgelængder.

Med sin revolutionerende atommodel fra 1913 sikrede Niels Bohr sig både en plads i historiebøgerne og en Nobelpris i 1922. Hans store bedrift var at kombinere sin viden om det kvantificerede lys med en model af brintatomet, hvor en tung, positivt ladet kerne omkredsdes af en negativt ladet elektron.

Bølgefunktionen er svær at blive klog på

Atommodellen blev en succes, fordi den både kunne forklare brintatoms stabilitet og spektrum, men den har sine begrænsninger, idet den kun giver rigtige resultater for atomer med en enkelt elektron. Allerede for helium med to elektroner begynder det at knibe med at få de korrekte energier for kvantespringene, hvis man holder sig til Bohrs simple model.

Først i 1920'erne, hvor senere nobelprismodtagere som Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Max Born og Paul Dirac udviklede den moderne kvantemekanik, faldt brikkerne på plads. Særlig vigtig blev Schrödingers bølgeligning, der

Bølgefunktionen

En bølge har forskellig højde forskellige steder og til forskellige tider og beskrives som en matematisk funktion af tiden, t , og stedets r -vektor. Schrödingers ligning beskriver en sådan bølgefunktion $\psi(r,t)$ og angiver dens ændring per tid (symbolet indrammet i gult) ved virkningen af nogle stedafhængige matematiske operationer på funktionen selv (indrammet i gråt). Kender man startværdien, kan man beregne funktionens form til senere tider.

Der findes tilsvarende bølgeligninger, hvor funktionen Ψ beskriver højden af en vandoverflade, lufttrykket i en lydbølge eller et elektrisk felt

Schrödingers bølgeligning

$$i\hbar \frac{d}{dt} \psi(\vec{r}, t) = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + V(\vec{r}) \right] \psi(\vec{r}, t)$$

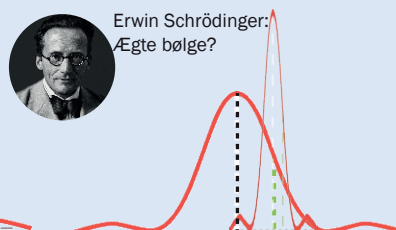
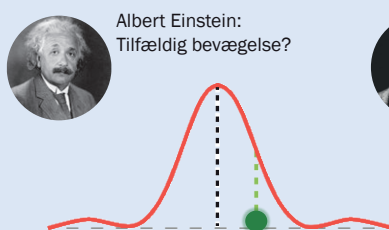
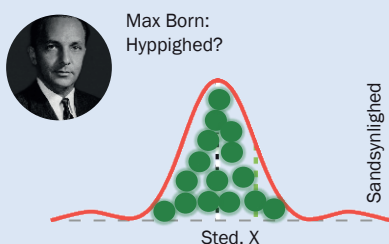
ψ_s spænding per tid, t

ψ (græsk: "psi") kaldes bølgefunktionen

i en radiobølge, men da Schrödinger lavede bølgeligningen var det uden nogen ide om, hvad det er, der faktisk "bølger". Den tyske fysiker Max Born viste, at der er overensstemmelse mellem bølgefunktionens værdi og hyppigheden af, hvor ofte man måler partiklen

forskellige steder. Men om det betyder, at teorien i virkeligheden kun virker for fordelinger af mange partikler, om den er en partikel, hvis position vi ikke kender, eller om partiklen faktisk er en udbredt bølge indtil den måles, kunne (og kan) fysikere ikke blive enige om.

Bølgefunktionens fortolkning



beskriver, hvordan kvantemekaniske systemer udvikler sig over tid.

Schrödingers udgangspunkt var, at elektronerne ikke bevæger sig i baner om atomkernen som planeter rundt om en stjerne, men nærmere skal forstås som en form for bølger. Med Schrödinger-ligningen blev det muligt at regne på de processer, der foregår i den mikroskopiske verden.

Løsningerne til ligningen er bølger, og sandsynligheden for et resultat af en kvantemekanisk måling er givet ved bølgefunktionens talværdi. Hvis man for eksempel kender de kræfter, som en elektron påvirkes af, kan man bruge Schrödinger-ligningen til at udregne sandsynligheden for, at elektronen findes et bestemt sted, når man måler efter.

Bølgeligningen har vist sig ekstremt

nyttig til beregninger, der involverer stoffets mindstedele, men den udstiller også forskellen på klassisk fysik og kvantefysik, fortæller Klaus Mølmer:

»Vi har en meget velbegrundet tillid til en bestemt, formel beskrivelse af naturen. Men vi er ikke helt enige om, hvad formlerne betyder. Vi er enige om, at eksperimenterne bekræfter formlerne, men vi ved ikke rigtig, hvad der foregår i den mikroskopiske verden.«

»Hvis jeg i klassisk fysik har en formel for en partikels bevægelse, så kan jeg regne med, at partiklen er der, hvor formlen forudsiger. Men i kvantefysikken taler vi om et objekt, vi kalder en bølgefunktion, som ikke har nogen direkte fysisk betydning. Man kan ikke se bølgefunktionen, og man kan spørge

sig selv, om der overhovedet er noget, der bølger, og hvad det i så fald skulle være. Det er en virkelig spændende og svær diskussion, hvor Bohr og Einstein aldrig kunne blive enige.«

En kvantebit kan være 0 og 1 samtidig

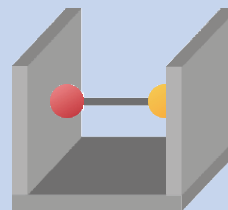
Kvantefysikkens love kan virke kontraintuitive, for bølge-partikel-dualiteten betyder, at så længe man ikke foretager en måling, kan en partikel tilsyneladende være to steder eller i to forskellige tilstande (eksempelvis have to forskellige energiniveauer) samtidig. Og flere partikler kan bringes i en samlet, kvantemekanisk tilstand, så en måling på én af partiklerne øjeblikkeligt påvirker alle partiklernes tilstand, uanset afstanden mellem dem – hvad Einstein kaldte en spøgelsesagtig fjernvirkning.

Superposition gør kvantecomputeren suveræn

Almindelige computere er baseret på fundamentale informationsenheder kaldet bits, og hver bit kan have værdien 1 eller 0. I en kvantecomputer er information derimod indkodet i kvantebits, forkortet qubits, der udover at have værdien 1 eller 0 også kan være i en superposition af de to værdier, altså være 0 og 1 samtidig.

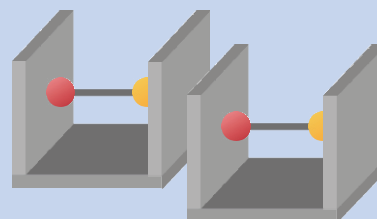
Superposition er et kvantemekanisk fænomen, der kan gøre en kvantecomputer ekstremt kraftfuld. Hvis det ved hjælp af kvantegates kan lade sig gøre at manipulere med de enkelte qubits, så er vejen banet for en brugbar kvante-computer, der kan regne på mange tal samtidig. Magien opstår, når flere qubits arbejder sammen og alle kan være 0 og 1 på samme tid. To qubits kan repræsentere fire forskellige tal samtidig, tre giver otte mulige tilstande og så fremledes – et system med 1.000 qubits kan være i en tilstand, der repræsenterer 2^{1000} værdier samtidig, og det er et astronomisk højt tal.

Så bliver det muligt at afsøge et udfaldsrum og finde den rigtige løsning på et problem langt hurtigere, end det kan lade sig gøre med en traditionel computer. I stedet for at prøve sig frem fra en ende af, kan en kvantecomputer så at sige tjekke alle mulige løsninger samtidig, og det gør den uhyre effektiv til visse klasser af matematiske problemer.



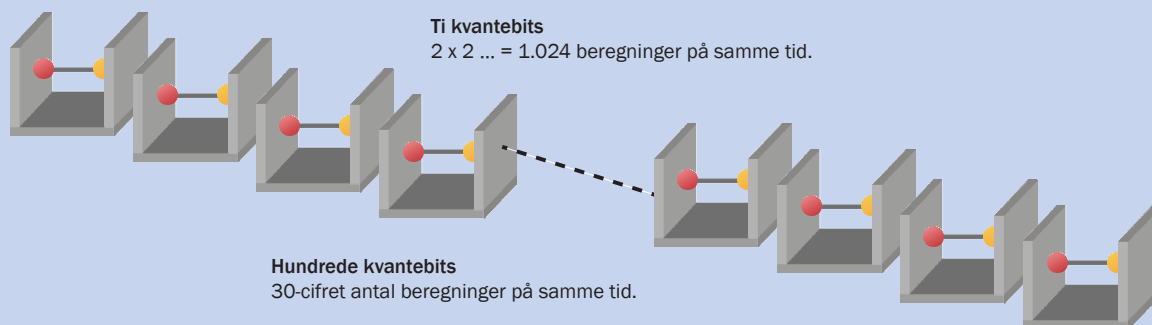
En kvantebit: 0 og 1

To værdier/regnestykker på samme tid.



To kvantebits: 00 og 01 og 10 og 11

$2 \times 2 = 4$ værdier på samme tid.



Ti kvantebits

$2 \times 2 \dots = 1.024$ beregninger på samme tid.

Hundrede kvantebits

30-cifret antal beregninger på samme tid.

»Vi har en fantastisk teori, men den rummer elementer, der er så besynderlige, at Einstein ikke kunne acceptere dem. Måske er det derfor, at det først er nu, vi rigtig forsøger at beherske den verden,« siger Klaus Mølmer.

»Det ser ud som om, at partikler kan være flere steder på én gang, og uanset hvad det udsagn præcis betyder, er det interessant, hvis så-dan nogle partikler repræsenterer dataværdier. Så har vi en verden, hvor data kan have flere talværdier på samme tid. Når man så regner på dem, så regner man på flere tal på samme tid – man regner parallelt.«

I en kvantecomputer kan alle bits både være 0 og 1 på samme tid, og med sammenfildrede kvantebits kan man regne på mange tal på én

gang. Det betyder, at en kvante-computer kan løse visse former for matematiske problemer ekstremt hurtigt – og meget hurtigere end almindelige computere.

Allerede i starten af 1980'erne indså fysikeren Richard Feynman, at det er nødvendigt med en kvante-computer, hvis man vil simulere naturen, som jo adlyder kvantemekanikkens love. I årtiet efter begyndte matematikere og dataloger at finde måder, hvorpå man kan løse interessante matematikproblemer uhyre effektivt, hvis man har en kvante-computer til rådighed, og med fremkomsten af disse kvantealgoritmer steg interessen for at bygge kvante-computere.

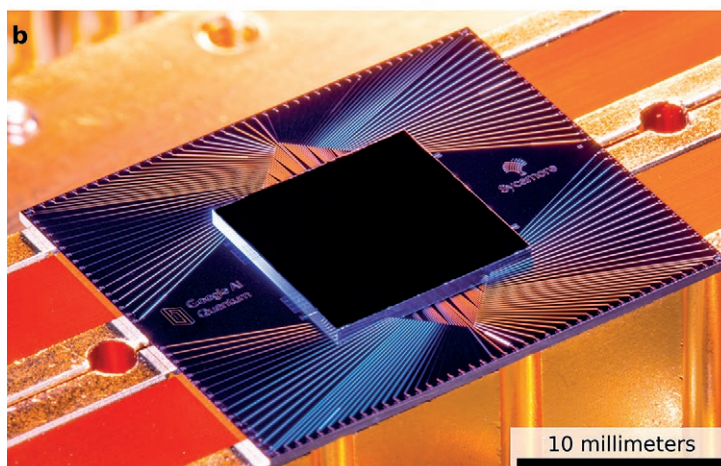
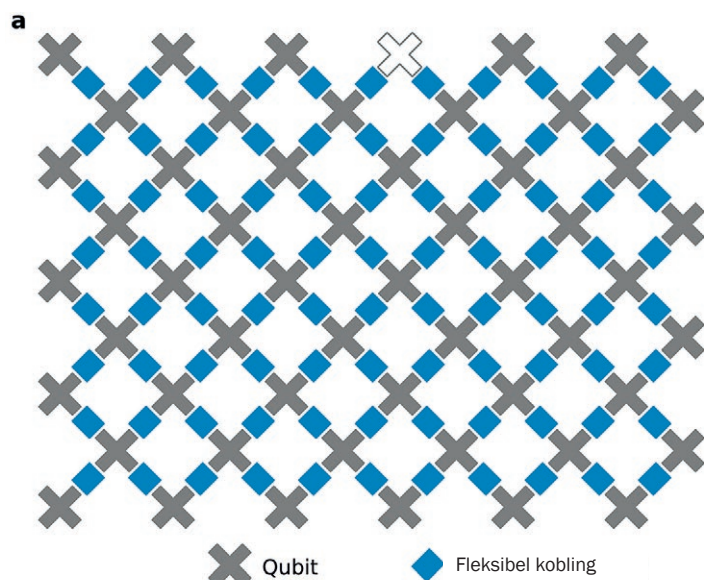
I dag har snesevis af forskningsinstitutioner og private firmaer kastet sig over udviklingen af brugba-

re kvante-computere. De store, amerikanske IT-firmaer IBM og Google lader til at have taget teten i øjeblikket, men Intel, Microsoft og kinesiske konkurrenter er lige i hælene, og en række mindre startups er også godt med.

Via Amazons cloud-platform kan man i dag købe sig adgang til fem forskellige kvante-computere baseret på fire forskellige teknologier, så der er ikke længere tale om, at kvante-computeren er på vej – den er her allerede.

Selv uperfekte kvante-computere kan bruges

Problemet er så, at nutidens kvante-computere ikke kan bruges til så meget. De er stadig på forsøgsstadiet og anvendes mest til at få en føling med teknologien og til under-visning – også på Niels Bohr Insti-



Sycamore-processoren. a, Layoutet af processoren, et rektangulær opstilling af 54 qubits (grå), alle er forbundet med de fire nærmeste naboer med koblinger (blå). Den ikke-funktionelle qubit er vist med sort streg. b, Foto af Sycamore-chippen.

tutet. Antallet af kvantebits i nogle kvantecomputere har rundet 100 og endda 1000, men kvantecomputerne er ikke fejlfri, og der skal flere kvantebits til, før det virkelig rykker.

Større og fejlfri kvantecomputere kan finde løsninger på problemer, som vi ikke kommer i nærheden af at løse i dag. Det er absolut ikke alting, de kan bruges til, men de kan være suveræne, når der er ekstremt mange mulige løsninger til et problem, men kun én af løsningerne er rigtig eller bedre end de andre.

Hvor almindelige computere må afprøve de mulige løsninger på hårde, matematiske problemer en efter en, kan en kvantecomputer nemlig

afsøge mange løsningsmuligheder samtidig. Derfor vil en kvantecomputer være ekstremt hurtig til databaseopslag, og den vil også kunne bryde mange af de koder, der i dag bruges til at holde beskeder hemmelige.

Og ikke mindst er det håbet, at den vil kunne simulere kvantemekaniske systemer, og at beregninger fra en kvantecomputer kan hjælpe forskerne med at udvikle ny medicin, mere effektive solceller, bedre batterier og nye metoder til at omdanne CO₂ til brændstoffer og nyttige kemikalier.

Men det kræver altså, at kvantecomputerne bliver større og mere præcise, og her er problemet,

at det ikke er nemt at bevare de ønskede kvantetilstande længe nok til, at beregningerne kan nå at blive udført. Kvantetilstandene er skrøbelige, og sammen med ingeniørerne arbejder fysikerne hårdt på at gøre dem mere robuste, så der sker færre fejl.

Samtidig forskes der i fejlrettede koder, så kvantecomputerne kan tåle, at der ind imellem sker fejl, men det kræver et stort antal ekstra regneoperationer og dermed mange flere kvantebits. En stor, universel kvantecomputer, der kan udføre komplekse kvantemekaniske beregninger ekstremt hurtigt og fejlfrit, ligger stadig et godt stykke ude i fremtiden, men mindre kan måske gøre det.

»Vi har det langsigtede mål at bygge en computer, der regner rigtigt. Men der findes også en række problemer, der er så svære at beregne, at vi kan få et rigtig godt bud fra en kvantecomputer, selv om der sker nogle få fejl,« forklarer Klaus Mølmer.

»Så vi kan ikke garantere, at kvantecomputeren finder frem til den absolut bedste løsning, men vi kan tjekke den i laboratoriet og se, om kvantecomputerens forslag er bedre end det, en klassisk computer kommer frem til. Her kan kvantecomputeren vise sin værdi i praksis. Rigtig mange går efter sådan en NISQ, noisy intermediate-scale quantum computer.«

Som eksempel nævner Klaus Mølmer det klassiske problem, der kaldes "the travelling salesman". Hvis en sælger skal besøge et stort antal byer og kender afstanden mellem byerne, hvilken rute er så den korteste? Det er et matematisk problem, der er uhyre svært at løse på en almindelig computer, og en kvantecomputer klarer det langt hurtigere. Fordi en NISQ ikke er fejlfri, finder den måske ikke den korteste vej, men den næstkorteste eller tredjekorteste, men det kan stadig være ekstremt værdifuldt – ikke kun for handelsrejsende,

men også ved analyser af mønstre i store datamængder, for eksempel fra dna-sekventering og i mange optimeringsproblemer.

Kvanteberegninger kan klares af lys

Kvantecomputere kan bygges på en håndfuld forskellige platforme, og mens IBM og Google satser på superledende kredsløb, der kun fungerer ved temperaturer meget tæt på det absolutte nulpunkt ved minus 273,15 °C, har Klaus Mølmer selv primært arbejdet med kvantecomputere baseret på samspillet mellem atomer og lys. Sådan en kan fungere ved stuetemperatur.

For fem år vakte han og forskere fra University of Sussex i England opsigt ved at foreslå en kæmpestor ionfældecomputer, der ville fylde 100 x 100 meter, fortæller han:

»Med de seneste fremskridt ved vi nu, at sådan en kvantecomputer kun behøver at være en enkelt kvadratmeter i størrelse. Det bliver stadig en kæmpe udfordring at bygge den, men nu er den meget mere realistisk – den kan være i et laboratorium, og den bruger ikke samme mængde energi som en by som Aarhus. Det er meget spændende.«

data i lyset og så bruge atomerne til at få lyset til at udføre regneoperationerne.«

»Jeg tror, vi kan komme til at se en fordeling frem og tilbage af rollerne for lys og stof, fordi begge systemer kan udgøre databits og har forskellige fordele og ulemper,« fortæller Klaus Mølmer.

“Nature isn't classical, dammit, and if you want to make a simulation of nature, you'd better make it quantum mechanical, and by golly it's a wonderful problem, because it doesn't look so easy.”

Richard Feynman, 1981

Selv er han i øjeblikket mest optaget af at designe komponenter, der kan optimere de mest basale processer i en optisk kvantecomputer, hvor input kodes i lyspulser, der modificeres under selve beregningen, så svaret kan aflæses i lyset, der kommer ud i den anden ende:

»I stedet for at kode data i atomer, der påvirkes af lys, kan man kode

Men hvornår har kvantecomputere så nået en teknologisk modenhed, så de for alvor kan bidrage til at skabe en bedre verden med ny medicin, grønne teknologier og kunstig intelligens? Det har de om 15 år, svarer Klaus Mølmer med et smil på læben. Det sagde han nemlig også for 15 år siden, så det er blevet lidt af en joke. Forskellen fra dengang er, at der er sket betragtelige fremskridt på alle platformene hvert eneste år, så der er al mulig grund til optimisme. Den revolutionerende kvantecomputer er lige om hjørnet. ■

Klaus Mølmer holdt den 4. oktober 2022 foredrag i serien Offentlige foredrag i Naturvidenskaben om "Kvantefysikken – atomernes vilde verden". Denne artikel er lavet i den forbindelse som led i projektet Brobygning på første række, finansieret af Novo Nordisk Fonden.

Roskilde Universitet

Læs Naturvidenskabelig Bachelor

”Vi finder et problem, og så leder vi efter naturvidenskabelige metoder til at løse det.

Vi samarbejder fx med hospitaler om modeller for, hvor lang tid kroppen kan tåle behandling med strålingsterapi mod kræft.”

— Max har læst Naturvidenskabelig Bachelor



Foto: Ture Andersen

RUC