Kapløbet om kvantecomputeren

Der foregår i øjeblikket et globalt kapløb om at udvikle en kvantecomputer, der kan bruges til noget interessant. I det kapløb står forskerne både overfor spændende faglige udfordringer og benspænd på grund af en anstrengt geopolitisk situation.

■ Af Carsten R. Kjaer, Aktuel Naturvidenskab

■

KLAUS MØLMER

Professor ved Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet. Han forsker i atomare systemers vekselvirkning med lys og deres anvendelse i kvantesensorer og kvantecomputere.

klaus.molmer@nbi.ku.dk

Klaus Mølmer holder foredrag om kvantecomputere i serien Offentlige Foredrag i Naturvidenskab den 20. oktober. Foredraget streames til lokationer over hele landet. Se ofn.au.dk

I 1920'erne og 30'erne valfartede fremtrædende forskere fra hele verden til det kreative fysikmiljø omkring Niels Bohr i København. Her blev teorierne om atomernes mærkelige opførsel – kvantemekanikken – udviklet i en åben idéudveksling mellem store hjerner.

I årene derefter, især ved opblussen af 2. Verdenskrig blev det dog klart, at en forståelse af atomernes verden havde konsekvenser langt udover rent akademisk interesse for materiens natur. Mange af de forskere, der deltog i udviklingen af kvantemekanikken, kom således også til at deltage i udviklingen af atombomben – på forskellige hold.

Lige siden har dette dilemma mellem fri udveksling af idéer, og hemmeligskræmmeri på grund af forskningens militære, men også kommercielle, betydning, været et vilkår for "atom-forskningen" i bred forstand.

Det nye store slag om at komme først står nu om kvantecomputeren.

Klaus Mølmer står populært sagt midt i "slaget". Han er professor i kvantefysik ved Niels Bohr Instituttet på Københavns Universitet, hvor han forsker i kvantecomputere. Aktuel Naturvidenskab har mødt ham til en snak om, hvordan den store opmærksomhed om kvanteforskningen påvirker hele feltet.

Kvantecomputere laver stadig for mange fejl

Kort fortalt er en kvantecomputer en computer, der bruger atomare kvantetilstande til at regne på mange tal på samme tid. Regneenheden i en kvantecomputer er såkaldte kvantebits (qubits). Sammenlignet med en bit i en klassisk computer, der kan være i tilstanden enten "0" eller "1", glimrer en kvantebit ved også at kunne optræde i begge tilstande samtidigt. En kvantecomputer bygger altså på kvantemekanikkens mærkværdige fænomener, der intuitivt kan være svære at forstå, men meget konkret kan udnyttes i teknologi.

Der foregår i øjeblikket en intens konkurrence på tværs af lande og mellem teknologigiganter som Google, IBM og Microsoft samt masser af nyopstartede virksomheder om at bygge en fungerende kvantecomputer. Der er forskellige teknologiske tilgange til at bygge de kredsløb – eller kvantechips – der er hjertet i en kvantecomputer. For eksempel superledende kredsløb, ionfælder, fotoniske chips eller neutrale atomer fanget i gitre af laserstråler. Fælles for dem er, at det gælder om at få sin kvantechip til at fungere med så mange kvantebits som overhovedet muligt – mindst en million, hvis man spørger Google. På nuværende tidspunkt har de cirka hundrede fungerende kvantebits i deres kvantechips, så der er lang vej igen.

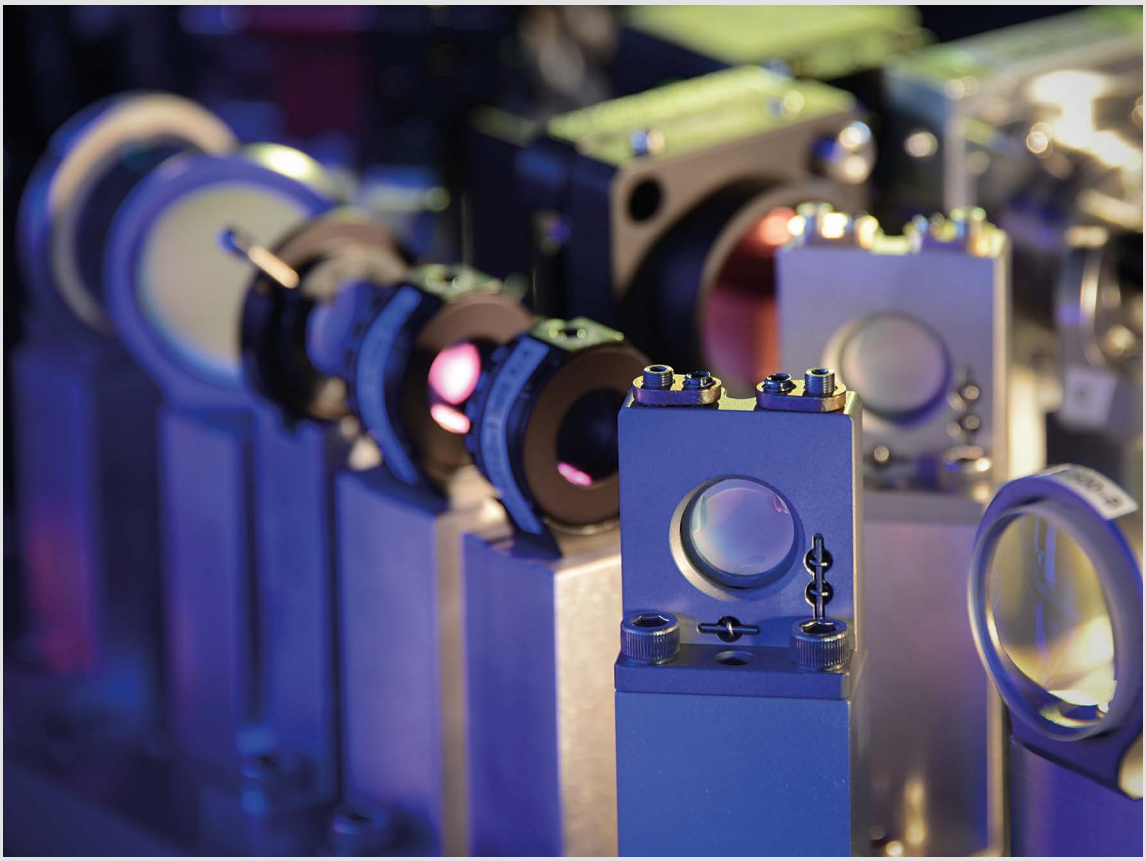
Men at øge antallet af bits på chippen er i virkeligheden ikke det største problem ifølge Klaus Mølmer:

»Problemet er, at disse kvantecomputere laver cirka 1 procent fejl i hver kvantebit i hver regneoperation. Vi vil jo gerne løse svære opgaver med kvantecomputeren, og til svære opgaver skal vi lave rigtig mange regneoperationer. En fejlrate på 1 procent betyder derfor, at vi ikke rigtig kan bruge dem til noget,« siger han.

På trods af mange års forskning og udvikling er vi altså stadig i dag ikke et sted, hvor man kan bruge en kvantecomputer til at løse problemer af praktisk interesse.

Kvantecomputeren som kodebryder

Det faktum gør dog ikke Klaus Mølmer til pessimist angående perspektiverne i kvantecomputerne, for der er virkelig sket meget på området de senere år. Men han medgiver,



Udsnit af den interne optik i Atom Computings kommercielle kvantecomputer. Det er netop sådan en, den danske virksomhed QuNorth (etableret i fællesskab af EIFO og Novo Nordisk Fonden) har købt. Kvantecomputeren kaldet Magne ventes klar til brug omkring årsskiftet 2026/2027.
Foto: Atom Computing

FEJLRETNING ER DEN STORE NØD AT KNÆKKE

Når dagspressen omtaler nye resultater med kvantecomputere, handler det typisk om, at nu har en kvantecomputer lavet en beregning, som hvis den skulle foregå på en klassisk computer, ville tage en million år. Det er det, man kalder "quantum advantage" – dvs. beregninger, hvor kvantecomputeren har en principiel fordel sammenlignet med en klassisk computer.
At kvantecomputeren faktisk ikke har løst noget interessant problem, og at den laver fejl, som i praksis vil gøre beregningerne ubrugelige, springer presseomtalerne mere let henover.

En af de væsentligste nødder at knække for forskningen er at nedbringe fejlraten. For nylig har Google for eksempel kunnet vise, at de har fået deres 100 kvantebits til – i stedet for at regne forkert med 100 bits – blot at huske én fælles bitværdi tre gange længere end de enkelte kvantebits på chippen kunne gøre det. Når dette resultat kom i *Nature*, skyldes det netop, at det er et eksempel på, hvordan man kan korrigere fejl, der sker i kvantecomputeren. Men det indebar også, at chippen nu kun holder en enkelt kvantebit og derfor er meget langt fra nogen form for "quantum advantage". Den del af historien fyldte ikke meget i pressen.

Kvantechips, der ikke laver fejl, bliver derfor en afgørende konkurrenceparameter. Den pointe kan illustreres med, at IBM i 2019 udgav et såkaldt road map, der fremskrev udviklingen af deres kvantechip de kommende år. Det leverede de på med en chip med cirka 400 qubits og senere 1100 – endda til tiden. Men chippen lavede for mange fejl. Her i 2026 lagde IBM så pludselig roret hårdt om og startede nærmest helt forfra med en chip, hvor fejlraten er reduceret markant, men også med et nyt road map med længere tidshorisonter.

Til sammenligning var anvendelsen af neutrale atomer til kvantebits i starten langt bagud, fordi det var en svær teknik. Men pludselig knækkede forskerne koden til at fange atomer – så der nu findes forskningsgrupper, der bruger 5-6.000 atomer, som hver udgør en bit. De er langsommere end for eksempel superledende kredsløb, men til gengæld laver de færre fejl. Kvantecomputeren Magne, som er indkøbt til Danmark fra det Amerikanske firma Atom Computing, benytter sådanne atomer og har elementer af fejlretning, sådan at den bruger 1200 fysiske kvantebits til at danne 50 fejlkorrigerede logiske kvantebits.

Hvilken teknologisk platform, der vil føre til det store gennembrud for kvantecomputere, er således langt fra afgjort.

at der er meget "hype" om kvantecomputeren i forhold til, hvor interessante ting de faktisk er i stand til at regne på i dag.

Det, der i høj grad fik verdens øjne op for kvantecomputerens potentiale, var da matematikeren Peter Shor i 1994 udviklede en algoritme, som ville kunne bruges på en kvantecomputer til at faktorisere store tal. Med denne ville man potentielt kunne bryde den kryptering, som hele internettet var bygget på.

»Det hoppede hele verden op og ned over. Men det førte også til en bekymring, som så også har drevet en del af hypen over kvantecomputere. Bekymringen over vores datasikkerhed er sådan set nem at imødekomme: Der findes alternativer, som ikke kan knækkes af Shors algoritme, og som allerede er i brug i nogle internetbrowsere og mobiltelefoner i dag,« siger Klaus Mølmer.

Klaus Mølmer fortæller, at der siden Shors algoritme og en algoritme til hurtig søgning af databaser fra 1997 ikke rigtig er blevet udviklet tilsvarende, epokegørende algoritmer til kvantecomputere, som vil kunne bruges til at løse interessante problemer.

»Det hænger selvfølgelig til dels sammen med, at det kan være svært at få datalogi-institutter til at dedikere sig til den opgave, når der endnu ikke findes hardware, algoritmerne kan køre på«, siger han.

Store summer i spil

Den store interesse for kvantecomputeren har udmøntet sig i, at både store og små lande nu har en national strategi på området, at der er opstået talrige "spin out-virksomheder" ud af universiteternes kvanteforskning, og at der investeres milliarder af kroner i de store techvirksomheder.

»For små lande som Danmark handler kvantestrategien meget om, at "vi skal også være med", og hvordan man navigerer i forhold til det internationale. For det har længe været klart, at det ikke kan være en global konkurrence, man som lille land kan vinde på egen hånd,« siger Klaus Mølmer.

For ikke at gentage historien om udviklingen af de elektroniske computere, hvor de europæiske lande i dag er kunder og ikke leverandører, er der nu oprettet store europæiske og nationale programmer i forskning i kvanteteknologier, også i Danmark.

»Det er en spændende udvikling og præcis, hvad vi drømte om i 1990'erne, da vi foreslog at den abstrakte kvantefysiks særeste elementer kan udnyttes i praktiske kvanteteknologier,« siger Klaus Mølmer.

Der er for ham og hans kolleger intet nyt i, at grundforskning kan føre til anvendelser, og heller ikke i at produktudvikling i virksomhederne sker med langt større budgetter og under andre spilleregler end i universiteternes forskningsmiljøer.

»Der er jo store økonomiske interesser på spil, ligesom der også er væsentlige hensyn til vores teknologiske uafhængighed af andre stater og i sidste ende vores nationale sikkerhed, « siger Klaus Mølmer.

»Virksomheder og myndigheder skal naturligvis beskytte deres teknologier og strategier, men for netop kvanteområdet er der et ekstra element af "skæg og blå briller", fordi Shors algoritme jo netop handlede om at knække koder og dermed bryde datasikkerhed. Og som med al teknologi, vil der også kunne være militære anvendelser; kvanteteknologier byder ikke på nye bomber, men de kan muligvis forbedre en række overvågnings- og styresystemer.«

Misser Europa kvanterevolutionen?

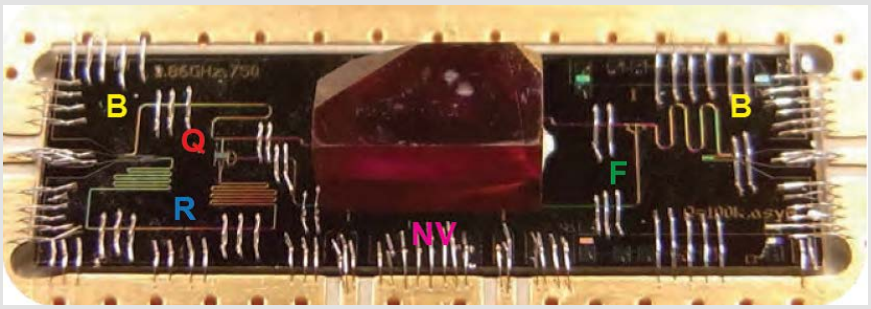
Klaus Mølmer fortæller, at han i virkeligheden ikke er urolig for, hvad en fremmed magt rent militært vil kunne bruge kvanteteknologier til mod os.

»Forsvarsmyndighederne er på vej væk fra kommunikation, der kan brydes med Shors algoritme, og kvanteteknologiernes bidrag til overvågning og dataanalyse er få blandt mange løbende forbedringer af de samme funktioner med klassiske teknologier og kunstig intelligens. Kvantecomputeren er ikke en generel supercomputer, men har kun en potentielt stor fordel ved meget specielle kvantealgoritmer. Jeg er derfor meget mere urolig for vores fremtidige konkurrenceevne og velfærd, hvis andre lande finder anvendelser af kvantecomputeren, for eksempel i deres kemiske og højteknologiske industrier,« siger han.

Man kan sige, at Europa missede IT-revolutionen, idet Europa i dag er helt afhængig af amerikansk soft- og hardware, mens computerchips bliver fremstillet i Asien. Der er derfor ifølge Klaus Mølmer ikke noget at sige til, at man i Europa tænker: Det skal ikke ske igen for kvanteområdet.

»Men det tror jeg desværre, at det kommer til,« siger han. » I hvert fald har man i Danmark valgt at købe en amerikansk kvantecomputer i stedet for at "teame up" i et fælleseuropæisk samarbejde om at bygge en selv. Og vi kommer næppe til at se en fælles europæisk front, der vil være i stand til at rejse lige så mange penge, som der er i det amerikanske "økosystem". Derfor er det også svært at se, at det er os, der får lederskabet i forhold til en

Fremvisning af kvantecomputer fra IBM ved en telekommunikationskonference (ITUWTSA) i Delhi 2024. Foto: Dev Jadiya/CC BY-SA 4.0



I et superledende elektrisk kredsløb løber der svage kvantestrømme, som kan bruges til kvante-beregninger. På billedet er en få millimeter stor diamant (den lilla klods) placeret ovenpå kredsløbet. Den kan lagre de svage elektriske signaler og dermed bruges som "kvante-harddisk. Teorien bag denne ide er udviklet af Klaus Mølmer, og forskere i Europa, Asien og USA har realiseret den. Illustrationer: Klaus Mølmer, Aarhus Universitet.

fremtidig global økonomi omkring kvanteteknologier.«

Han mener dog ikke, at vi skal fortvivle af den grund:

»De kraftigste computerchips i verden laves i dag på avancerede maskiner fra ASML i Holland, og danske virksomheder skal nok få kontrakter og økonomiske muligheder i den globale økonomi, ikke mindst takket være den stærke grundforskning, den målrettede satsning på basale teknologier og komponenter og den professionelle rådgivning til nye virksomheder i Danmark.«

Når geopolitik påvirker forskningen

Klaus Mølmer fortæller, at dykker man ned i de forskellige undermiljøer indenfor feltet – dvs. dem der laver grundforskning i ionfældefysik, atomfysik mv – er der en udbredt følelse af, at de faglige udfordringer er store, og at man hellere vil se feltet "komme i mål" end komme ud i en destruktiv konkurrence.

»Vi kender jo hinanden personligt hen over fag- og landegrænser. Vi var hinandens studerende og postdocs og faglige vejledere, og vi samarbejder stadig intenst i grundforskningsmiljøerne, fordi det accelererer vores egen forskning og hjælper til at den hurtigt bliver anvendt og får kollegial anerkendelse,« siger han.

»Samtidigt med, at jeg anerkender myndigheders og virksomheders behov for at beskytte og hemmeligholde strategier og teknologier, har jeg og alle de kolleger, jeg taler med, en stor bekymring for, at der for tiden lægges hindringer i vejen for samarbejder indenfor grundforskningen. Grundforskning er et stort puslespil, som lægges hurtigere, hvis alle lægger deres brikker, så hurtigt de kan. Det sker specielt ved, at vi rejser ud i verden og udveksler studerende.«

Politikerne taler i dag om en ny geopolitisk situation med en altomfattende boykot af Rusland og Hviderusland på grund af krigen i Ukraine, og hvor vi skal være forsigtige med relationerne til Kina. De tre lande er, sammen med Iran, på eksplicitte lister, hvor der i dag er indført særlige sanktioner ved besøg og ansættelser ved danske universiteter.

»For mig betyder det for eksempel, at jeg ikke kan have en gæst indenfor til en kop kaffe, uden der skal være en sikkerhedsvurdering, og selv ved ansættelse af danskere ved min afdeling skal de gennem en ekstra vurdering, hvis de har samarbejdet med forskere fra disse lande,« siger Klaus Mølmer.

Mens Rusland, Hviderusland og Iran ikke repræsenterer teknologiske rivaler og i højere grad er underlagt en udenrigspolitisk bestemt boykot, skyldes restriktionerne overfor Kina mere frygten for uønsket vidensoverførsel. Og det er restriktionerne i forhold til Kina, der giver Klaus Mølmer og hans kolleger flest hovedbrud, fordi Kina er en kilde til studerende og forskere af højeste internationale kvalitet – også indenfor kvanteområdet.

Når berøringsangsten overfor Kina betyder, at man for eksempel ikke kan invitere kinesiske studerende med på kurser, hvor man blot underviser i, hvad der står i lærebøgerne, bliver det helt tosset, synes han.

»Jeg og mange af mine kolleger så derfor gerne, at vi får en bedre vurdering af, hvor restriktionerne giver mening, og hvor de ligefrem skader os. Universiteterne publicerer jo under alle omstændigheder deres grundforskning vidt og bredt, og de fleste forskningsgrupper vil på et øjeblik kunne fortælle, om de ville lide tab ved, at der blev lækket information om deres arbejde. Jeg tror, det vil være undtagelsen frem for reglen,« siger Klaus Mølmer.

Dansk forskning er afhængig af talent udefra

Klaus Mølmer er klar over, at det nemt kan komme til at lyde som om, at universitetsforskere som ham er blåøjede, og ukritisk vil fortælle, hvad som helst til hvem som helst. Men sådan mener han det selvfølgelig ikke.

»Selvom jeg er grundforsker, er jeg da også så praktisk indrettet og så "dansk i hjertet", at skulle jeg få en genial idé, som jeg tænker vil kunne give dansk industri eller det danske beredskab et forspring, vil jeg selvfølgelig gå til universitetets Technology Transfer Office og til relevante myndigheder for at få en vurdering, før jeg bare buser ud med det offentligt,« siger Klaus Mølmer.

»Men når jeg bare har fundet et nyt forskningsresultat til det store puslespil, vi alle er i gang med, og hvor jeg også selv har haft brug for de andres brikker, er det jo bare med at komme ud med det og sætte Danmark på verdenskortet.«

Han illustrerer idealet om den åbne forskning med et eksempel:

»Man kan med atomer og lasere detektere meget svage radiobølgesignaler. Det har masser af potentielle, og måske også militære, anvendelser. Efter årtiers forskning var de fleste laboratorier nogenlunde lige gode til det. Men så var der pludselig en ung forsker på Shanxi University i Kina, som fandt en måde at gøre den metode tusind gange mere følsom – en rigtig god idé, som han publicerede i *Nature Physics*. Den artikel er nu citeret 800 gange, og man bruger hans metode i hele verden. Jeg synes da, at Verden er blevet et bedre sted af, at vi alle sammen har fået hurtig adgang til den metode, fremfor hvis han havde gemt den for sine vestlige kolleger,« siger Klaus Mølmer.

»Niels Bohr opbyggede i sin tid meget bevidst sit institut som et internationalt institut, fordi svære problemer kræver de bedste hjerner fra hele verden at knække. Vi er stadig international relevante på kvanteområdet, fordi forskningen stadig foregår i den ånd,« siger Klaus Mølmer.

»Hvis jeg må sige nej til at ansætte den dygtigste forsker, der søger en stilling i min forskningsgruppe, fordi hun er fra Kina, kan vi også med tiden blive mindre interessante for forskere fra alle mulige andre lande. For de kigger jo på, hvad der bliver publiceret fra vores institutter, og hvis kvaliteten ikke er i top, ja så søger de også andre steder hen.«

Klaus Mølmer er meget bekymret for, om man på det politiske niveau forstår denne konsekvens: At jo mere, vi vælger at beskytte vores viden, jo mindre bliver der også at beskytte. ■

VIDERE LÆSNING

Du kan læse mere om princippet i en kvantecomputer og Klaus Mølmers forskning i artiklen: Fra kvantefysik til kvantecomputere, Aktuel Naturvidenskab nr. 6-2022.

Mere om kvantecomputere, og hvordan de fungerer: Hvad kan man regne på en kvantecomputer i dag? Aktuel Naturvidenskab nr. 2-2020.