

Kvantecomputere og grafteori

Ulrich Hoff, Jonas Schou Neergaard-Nielsen, Mikkel Vilsbøll Larsen og Ulrik Lund Andersen, *bigQ*, DTU Fysik

Kvantecomputeren er en realitet, men har indtil videre ikke nok qubits til virkelig at demonstrere sit værd. En lovende mulighed for at skalere til store qubitantal er at lave rent optiske kvantecomputere, hvor information processeres gennem målinger på store entangled klyngetilstande af lys. I denne artikel illustrerer vi, hvordan grafteorien giver en bekvem beskrivelse af sådanne klyngetilstande, og hvordan de eksperimentelt kan realiseres i laboratoriet og udnyttes som grundlag for en optisk kvantecomputer.

A billion dollar question

“Can physics be simulated by a universal computer?” [1]. Netop det spørgsmål holdt den amerikanske Nobelprisvinder i fysik, Richard P. Feynman, et foredrag over i 1982. Hans spørgsmål gik ikke på, hvorvidt man kan simulere den klassiske fysiks tilnærmede beskrivelse af naturen, men derimod om det er muligt at simulere den underliggende kvantefysik:

[...] the physical world is quantum mechanical, and therefore the proper problem is the simulation of quantum physics [...]. I want to talk about the possibility that there is to be an exact simulation, that the computer will do exactly the same as nature [1].

Derudover ville han have, at simulationen skulle være effektiv:

If doubling the volume of space and time means I'll need an exponentially larger computer, I consider that against the rules [1].

I sin analyse af problemet betragtede Feynman to mulige tilgange – enten at simulere kvantefysikken ved hjælp af en sædvanlig computer eller at bygge en ny type computer, der i sig selv er et kvantefysisk system, en kvantecomputer. Den første mulighed sendte han til tælling med reference til kvantefysikkens ikke-lokale korrelationer, også kaldet “entanglement”, som ikke lader sig beskrive inden for den klassiske fysiks rammer. Det viste John Bell allerede i 1964 [2], og det er efterfølgende blevet demonstreret igen og igen i talrige eksperimenter [3, 4]. I karakteristisk kontante vendinger konkluderede Feynman:

That's all. That's the difficulty. That's why quantum mechanics can't seem to be imitable by a local classical computer [1].

Anderledes optimistisk var hans holdning til ideen om en kvantecomputer, og han havde en klar formodning om, at det ville være muligt at konstruere en helt ny klasse af computere med potentiale til at simulere alt.

I therefore believe it's true that with a suitable class of quantum machines you could imitate any quantum system, including the physical world.

Hvordan en sådan maskine konkret skulle realiseres, og om der eventuelt kunne være et hierarki blandt kvantesystemer, i forhold til deres muligheder for at simulere hinanden, lod han stå som et åbent spørgsmål:

[W]e should try to find out what kinds of quantum mechanical systems are mutually intersimulatable, and try to find a specific class, or a character of that class which will simulate everything. What, in other words, is the universal quantum simulator? [1]

Svaret er: ja!

Den handske, Feynman kastede, blev samlet op flere forskellige steder rundt omkring i verden. I 1992 gav briterne David Deutsch og Richard Jozsa det første eksempel på “computation by quantum parallelism” [5], der på slående vis illustrerer, hvordan kvantecomputeren internt kan processere information parallelt, og dermed hurtigere, i kraft af superpositionstilstande. Året efter beskrev amerikaneren Seth Lloyd en realiserbar arkitektur for en kvantecomputer [6], og i 1996 besvarede han Feynmans spørgsmål med et rungende “yes”. Ved at indkode information i simple to-niveaukvantesystemer, også kaldet kvantebits eller qubits, og koble og kohærent manipulere dem ved hjælp af et universelt sæt af gates, kan man skabe en programmerbar maskine, der kan simulere et vilkårligt kvantesystem. Med andre ord: kvantecomputeren er en universel kvantesimulator [7]. Muligheden for eksakte simuleringer af komplekse kvantefysiske systemer åbner op for et væld af anvendelser inden for fx materialeforskning, biofysik og farmaci, og det er nogle af motivationerne bag udviklingen af kvantecomputere.

NISQ

Som så mange gange før inden for fysikken, så er teorien også årtier foran eksperimenterne, når det gælder kvantecomputeren. Plantegningerne for den gate-baserede kvantecomputer har ligget klar siden 1990'erne, og det samme gælder killer applications som Shors

algoritme til primtalsfaktoriserings [8], men hardwaren volder problemer. Det kniber med at finde en qubitplatform, der er modstandsdygtig over for omgivelsernes støj, kan bevare de skrøbelige kvantetilstande længe nok og kan skaleres til millioner eller bare tusinder i antal; og det kniber med at frembringe gates, der kan manipulere qubits med tilstrækkelig høj præcision og reproducerbarhed. Derfor omtales den aktuelle status for kvantecomputerteknologien ofte som NISQ-æraen – Noisy Intermediate-Scale Quantum technology [9].

Det er for nuværende tech-giganter som Google og IBM, der fører an, i tæt parløb med universitetslaboratorier, og den fremherskende platform er såkaldte transmon-qubits baseret på superledende Josephson-junctions. En konkurrerende tilgang er at bruge fangede ioner som qubits og implementere gates vha. laser- og mikrobølgepulser. Det giver super “rene” qubits, fordi de udgøres af individuelle atomare systemer fuldstændig isoleret fra omverdenen, og gateoperationerne kan udføres nærmest perfekt. Gennem årtiers grundforskning inden for atomfysik og ionfælder har forskerne lært at kontrollere vekselvirkningen mellem atomer og elektromagnetisk stråling med formidabel præcision (det modtog David J. Wineland og Serge Haroche Nobelprisen i fysik for i 2012 [10]).

I 2019 kunne Google annoncere, at de ved hjælp af deres “Sycamore”-processor med 53 effektive transmon-qubits havde gennemført en beregning på 200 sekunder, som på den kraftigste supercomputer ville have taget 10.000 år [11]. En efterfølgende diskussion mellem Google og IBM omkring estimeringen af den klassiske beregningstid førte dog til, at de 10.000 år blev til 2,5 dage. Selvom den konkrete opgave, der blev løst, var af meget begrænset praktisk relevans og skræddersyet til netop at demonstrere kvantecomputerens overlegenhed, så er det den første demonstration af kvantecomputerens formåen og potentiale til at udføre beregninger, der er praktisk umulige for sædvanlige klassiske computere, og dermed et afgørende skridt i teknologiens udviklingshistorie. Men når det er sagt, så er det stadig meget usikkert, om en gate-baseret kvantecomputer med superledende qubits er den rette vej at gå, primært på grund af udfordringerne med at skalere antallet af qubits.

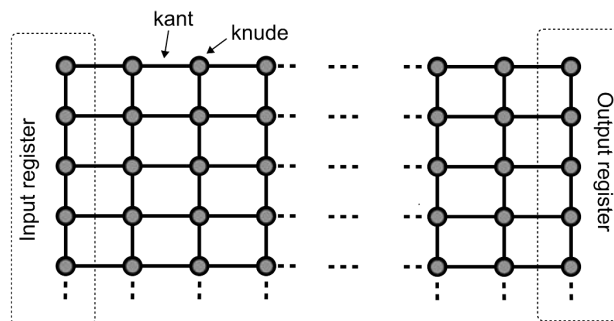
IBM annoncerede i september 2020 et roadmap for at nå 1000 qubits i 2023, men det er stadig i omegnen af en faktor 10 for lidt til at bryde RSA2048 med Shors algoritme – vel at mærke uden at tage højde for, at et forventet qubit overhead på mindst 100:1 er nødvendig til fejlkorrektion. Og dertil kommer alle de gates, der skal bruges for at implementere algoritmen. En Intel Core i5-processor, som den der benyttes i skrivende stund, består af 1,75 milliarder transistorer, og med 3-5 transistorer per gate svarer det til 400-500 millioner gates! Til trods for kvantecomputerens eksponentielle speed-up for nogle typer af beregninger, så er der brug for et sammenligneligt antal gates for at køre fx Shors algoritme på en kvanteprocessor. Til sammenligning brugte Google i deres demonstration ca. 31.000 gate-operationer.

En skalerbar arkitektur baseret på målinger

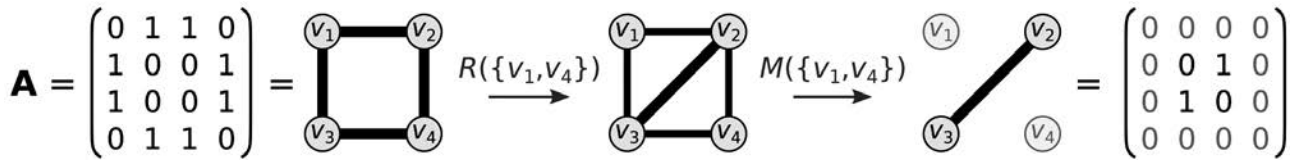
Grundlæggende ved vi, hvad der skal gøres, men i praksis er skaleringen af nuværende kvanteprocessorer stadig en enorm teknologisk og forskningsmæssig udfordring. En løsning på det problem kan meget vel være den alternative kvantecomputerarkitektur kendt som “measurement-based quantum computing” (MBQC) [12]. I stedet for at opbygge algoritmer af unitære kvantegates, som Seth Lloyd oprindeligt foreslog, så er udgangspunktet for MBQC en stor entangled klyngetilstand (engelsk: entangled cluster state), hvorpå input-informationen indkodes og efterfølgende processeres gennem en række irreversible målinger. Herved udbredes informationen igennem klyngetilstanden i takt med, at processeringen skrider frem, og det endelige resultat kan udlæses gennem målinger på de sidste qubits i klyngen. For hvert procestrin er det valget af den specifikke måling, og på hvilken qubit i klyngetilstanden den udføres, der fastlægger hvilken operation, der realiseres. Målingen fjerner den pågældende qubit i klyngen og bryder den entanglement, der eventuelt var med nabo-qubits. Som en konsekvens reduceres klyngetilstanden og mængden af entanglement i den for hvert procestrin. I MBQC er entanglement altså en ressource, der indledningsvist etableres og gradvist opbruges undervejs i beregningen. Det er i kontrast til den sædvanlige kvantecomputer, hvor antallet af qubits er uændret gennem en algoritme, mens deres kvantetilstand blot ændrer sig. Efter at resultatet er udlæst, kan hele registret af qubits initialiseres igen og genbruges til en ny beregning. I MBQC skal der skabes en ny klyngetilstand for hver beregning.

Klyngetilstande og grafteori

En klyngetilstand består som nævnt af et komplekst netværk af entangled qubits, og det kan bekvemt repræsenteres ved en graf $G(V, E)$, hvor $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ er en mængde af knuder; to knuder v_i og v_j siges at være naboer, hvis der i mængden af kanter E findes en, der forbinder de to knuder. I en universel klyngetilstand for MBQC er knuderne for den tilsvarende graf organiseret i en rektangulær gitter-topologi, som illustreret i figur 1, og alle grafens kanter har samme vægtning, svarende til samme grad af entanglement mellem alle qubits.



Figur 1. Klyngetilstand med rektangulær gitter-topologi. De grå cirkler repræsenterer den tilsvarende grafes knuder og linjerne imellem dem dens kanter. Det yderste venstre sæt af knuder udgør et “input-register” og det er på disse, at inputtet til beregningen indkodes. Tilsvarende er det yderste højre sæt af knuder et “output-register”, hvorfra resultatet af beregningen udlæses gennem målinger.



Figur 2. (Fra venstre) Grafitilstand og tilhørende kantmatrice. Målinger sletter de involverede knuder og tilknyttede kanter, og resultatet er en ny, reduceret graf.

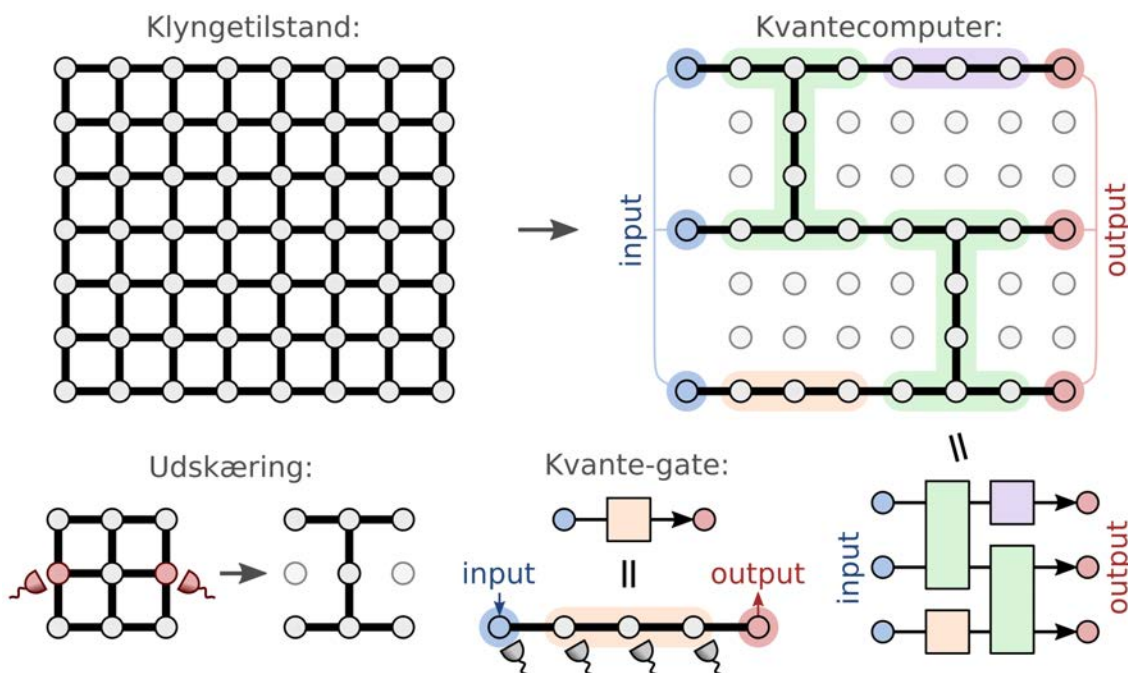
Grafen kan beskrives ved hjælp af en kantmatrice (engelsk: adjacency matrix), A , hvor værdien af de enkelte elementer, A_{ij} , repræsenterer vægtningen (eller styrken) af kanten, som forbinder knude i med knude j . Hvis to knuder i tilstanden ikke er forbundet, dvs. at kanten ikke eksisterer, er det pågældende matricielement 0, mens en stærk kobling mellem to knuder repræsenteres med værdien 1. Grafen er entydigt bestemt af kantmatricen og transformationer af grafitilstanden kan derfor entydigt beskrives matematisk gennem operationer på matricen. Et eksempel på en simpel grafitilstand er illustreret i figur 2 (venstre). Her er 4 knuder $\{v_1, v_2, v_3, v_4\}$ forbundet med kanter med maksimal vægtning. Den tilhørende kantmatrice, bestående af 16 elementer, er vist ved siden af. Bemærk, at kantmatricen er symmetrisk, idet $A_{ij} = A_{ji}$, samt at diagonalelementerne er nul, da knuderne ikke har en kant med sig selv (i praksis vil diagonalelementerne for klyngetilstande ikke være præcis nul, men det vil vi ikke dykke yderligere ned i her).

En klyngetilstand kan som nævnt transformeres ved at måle på udvalgte qubits. Afhængig af hvilken variabel, der måles, vil det transformere klyngetilstanden på en særlig måde. Teoretisk er det nyttigt at dele måleprocessen op i to operationer, som illustreret i figur 2: Først en rotation $R(\{v_1, v_4\})$ på to af klyngens qubits, hvorved grafen ændres, så parret $\{v_2, v_3\}$, der tidligere

ikke var forbundet, nu er stærkt forbundet (de er blevet naboer), mens de oprindelige kanter har mistet vægt. Dernæst en måling $M(\{v_1, v_4\})$ på de netop roterede qubits, hvorved de tilsvarende knuder i grafen og deres tilknyttede kanter fjernes. Resultatet er en mindre graf bestående af kun to knuder, $\{v_2, v_3\}$, og en kant med vægt 1, svarende til kantmatricen vist til højre i figuren.

Graferne giver os en forholdsvist simpel og intuitiv visuel repræsentation af et temmelig komplekst fysisk system, som gør det muligt at illustrere opbygningen af en massivt entangled kvantetilstand af massevis af qubits samt effekten af operationer på denne. Bag det simple billede ligger dog en veldefineret og omfattende matematisk og fysisk formalisme. Det kan sammenlignes med Feynman-diagrammer, som giver et enkelt og intuitivt, men samtidig præcist og kraftfuldt værktøj til at håndtere meget komplekse udregninger fx inden for kvantefeltteori.

Ingredienserne til en målebaseret kvantecomputer er altså en stor klyngetilstand med gittergraf-struktur samt målinger af de enkelte qubits, der transformerer tilstandens graf som netop beskrevet. Figur 3 illustrerer, hvordan delene stykkes sammen til en kvanteberegning. I princippet kan man bare tage det kredsløb, man ville bruge i en sædvanlig gate-baseret kvantecomputer og programmere det ind i grafen. Først skal gittergrafen "udskæres", så den resulterende graf kun består af de kanter, der er nødvendige for at udføre beregningen.



Figur 3. Klyngetilstanden er grundlaget for den målebaserede kvantecomputer. Gennem talrige målinger omformes klyngetilstanden til et netværk af tråde, der kan bære kvanteinformation, og gates, der processerer informationen og i sidste ende udfører en beregning.

Udskæringen klæres ved at måle på de qubits, hvis knuder ikke skal indgå i grafen. Almindeligvis skæres grafen ud i "tråde" – lange vandrette rækker af forbundne knuder – som svarer til de enkelte qubits i en gate-baseret kvantecomputer. Trådene er desuden forbundet de steder, hvor de skal interagere. Dernæst programmeres de enkelte gates i kredsløbet ved at måle på nogle få nabo-qubits. I figur 3 er de knuder, der indgår i en gate, markeret med samme baggrundsfarve. Præcis hvilken gate, der implementeres, afhænger af hvilke målinger, der udføres. De detaljer er ikke inkluderet i figuren, men for en given type af gate (svarende til en bestemt farve) er det helt fastlagt, hvad der skal gøres. Der er nu lagt i ovnen til at udføre kvanteberegningen. Input indkodes i knuderne længst til venstre i grafen, de forskellige målinger foretages på klyngetilstanden, hvilket processerer inputtet gennem det programmerede kredsløb, og endelig kan resultatet af beregningen udlæses på elementerne længst til højre i grafen.

Opbygning af en klyngetilstand

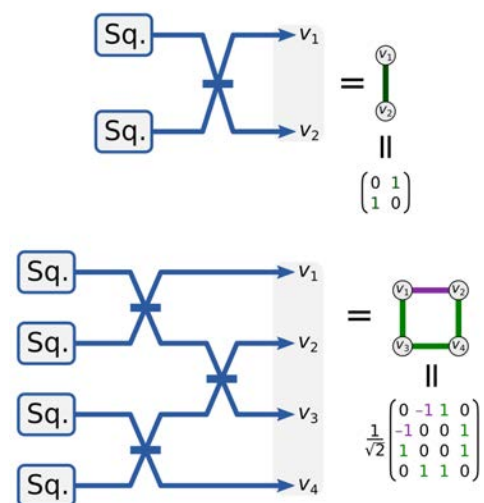
En klyngetilstand kan frembringes optisk, og det er grundlaget for at realisere en optisk kvantecomputer. Specifikt vil vi her fokusere på den gren af kvanteoptikken, der beskæftiger sig med "kontinuerte variable" (CV) (engelsk: continuous variable). Det elektromagnetiske felt er kvantemekanisk beskrevet som en harmonisk oscillator, og operatorerne, der repræsenterer amplitude- (x) og fasekvadraturerne (p), er ækvivalente med de kanoniske positions- og impulsoperatorer. Og de har som bekendt et kontinuert spektrum af egenverdier, heraf navnet "kontinuerte variable".

For CV klyngetilstande bruger man betegnelsen qumodes i stedet for qubits, fordi man sædvanligvis siger, at lys udbreder sig i modes. De enkelte qumodes i klyngetilstanden er altså knuder i den tilsvarende graf, og kanterne repræsenterer entanglement mellem dem. Informationen indkodes i kvadraturerne (amplitude og fase) for hver qumode, og udlæses vha. homodyn detektion, der selektivt kan måle den ene eller anden kvadratur.

Lad os betragte et simpelt eksempel på opbygning af en klyngetilstand bestående af blot to qumodes. Den kan relativt nemt skabes i laboratoriet ved at interferere to squeezed kvantetilstande på en stråledeler, som illustreret i figur 4 (øverst). "Squeezed" betyder, at kvantestøj i én af kvadraturerne er mindre end for det elektromagnetiske vakuum, på bekostning af en tilsvarende forøget støj i den anden kvadratur. Ved interferensen skabes kvantekorrelationer – entanglement – mellem de to udgangsstråler, som først beskrevet af Einstein, Podolsky og Rosen (EPR) i 1935. Den resulterende klyngetilstand kan beskrives med en 2×2 kantmatrice, $A = (0, 1; 1, 0)$. Klyngetilstanden kan forstørres ved at bruge flere kvantetilstande og udbygge netværket af stråledelere. Det er for eksempel muligt at skabe en kvadratisk klyngetilstand ved at interferere fire kvantetilstande, som vist i figur 4 (nederst).

Ved at fortsætte opbygningen af klyngetilstanden efter samme model, er det muligt at konstruere en meget stor gittergraf, som den vist i figur 3. Den helt store

udfordring er dog, at klyngetilstanden skal bestå af millioner af qumodes for at kunne bruges til at udføre relevante udregninger i en kvantecomputer. Følger man naivt strategien ovenfor, er det klart, at man skal bruge millioner af kvantetilstande og millioner af stråledelere. Benyttes almindelige optiske komponenter, vil maskineriet derfor komme til at fylde flere fodboldbaner! Én løsning på problemet kunne være at bruge optisk nanoteknologi, hvormed det optiske kredsløb kan integreres i meget små siliciumchips. På den måde vil det optiske "footprint" formindskes med flere størrelsesordener. Nanoteknologien er dog stadig ikke på et teknisk niveau, hvor tabsfri skalering er muligt, og indtil videre er det derfor ikke den mest farbare løsning på problemet. Et bedre alternativ er tidlig skalering.



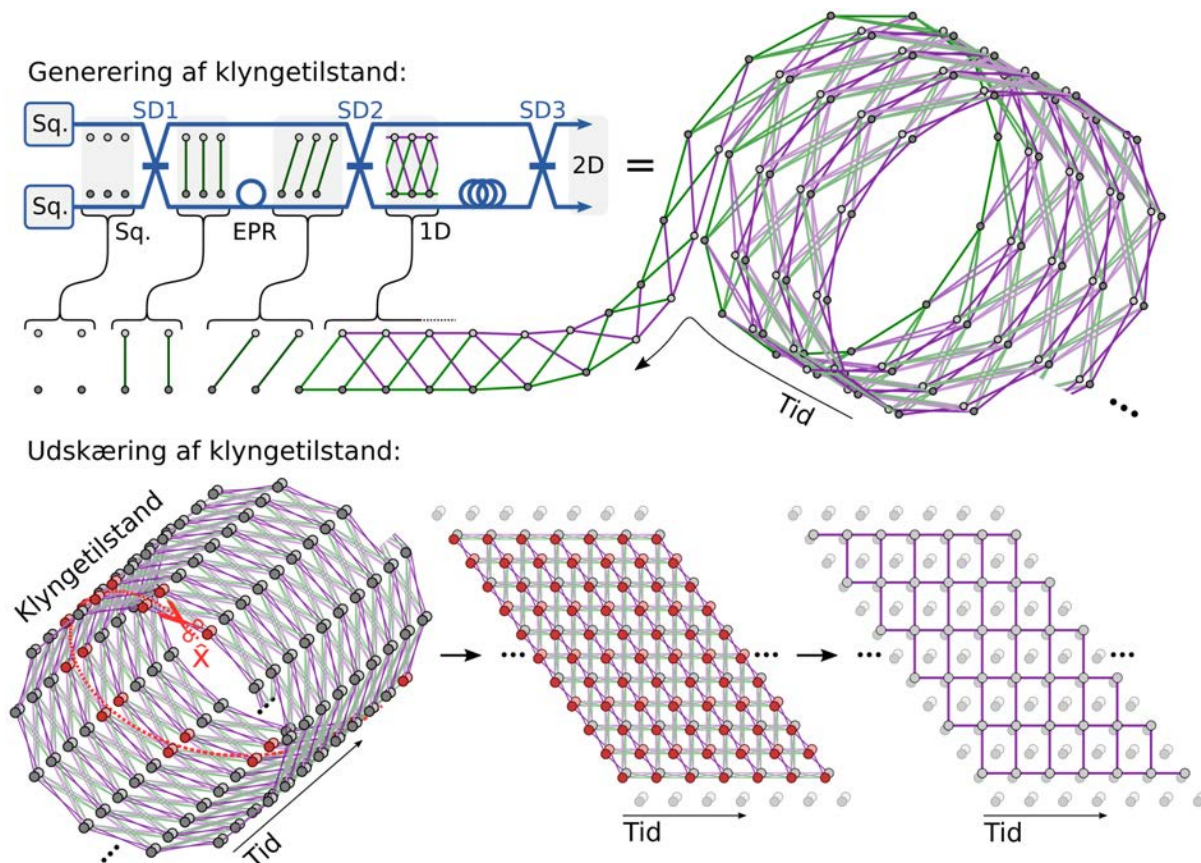
Figur 4. Øverst: En simpel klyngetilstand kan frembringes ved at interferere to squeezed (Sq.) kvantetilstande. Nederst: Interfererer man i stedet fire kvantetilstande, kan man skabe en kvadratisk klyngetilstand.

Tidsdelt multipleksing gør det muligt at skalere

I stedet for at skalere "byggeprocessen" rumligt er det muligt at skalere den tidligt [13,14]. Dvs. at korrelationerne – kanterne i grafen – etableres mellem qumodes (knuder), som er produceret på forskellige tidspunkter. Knuderne i klyngetilstanden i figur 3 er således ikke placeret i forskellige rumkoordinater, men forskellige tidskoordinater. For sådanne tidlige klyngetilstande, er proceduren for at skabe en meget stor tilstand markant simplere, som illustreret i figur 5. Den tidlige klyngetilstand skabes i tre trin:

(1) Processen starter med etableringen af en rumlig 2-qumode-klyngetilstand – en EPR-tilstand – via interferens af kvantetilstande på en stråledeler (SD1), som allerede diskuteret ovenfor og vist i figur 4. Kvantetilstandene produceres i form af optiske pulser med en tidlig afstand på ca. 250 ns, og stråledeleren sørger for, at der genereres en perlerække af 2-qumode-klyngetilstande med en afstand på samme 250 ns. Som nævnt ovenfor er den type tilstande repræsenteret ved simple grafer med kanter, der forbinder to knuder.

(2) I næste trin skabes endnu flere kanter i grafen ved at bruge endnu en stråledeler (SD2) til at lave tidsdelt



Figur 5. Illustration af, hvordan en skalerbar gittergraf til MBQC kan skabes ved tidsdelt multipleksing af squeezed tilstande og efterfølgende udskæring gennem målinger.

multipleksing af de netop skabte små klyngetilstande. For at sikre, at det er de rigtige qumodes, som interfererer, indføres en relativ tidsforsinkelse på 250 ns mellem de øvre og nedre modes, som vist i figuren. Det kobler de enkelte 2-qumode klyngetilstande sammen til én stor endimensionel (1D) klyngetilstand.

(3) I det sidste skridt, som er vigtigt for at få skabt den nødvendige todimensionelle (2D) klyngestruktur, snos 1D-klyngetilstanden rundt i en cylinderstruktur, hvorefter nye kanter etableres gennem interferens på en tredje stråledeler (SD3). Hvirvlen skabes ved at tidsforsinke de nedre modes i forhold til de øvre modes, og diameteren af cylinderen afhænger af størrelsen af forsinkelsen. I det pågældende eksperiment er forsinkelsen på 12×250 ns, hvorved der skabes 12 knuder rundt på cylinderens periferi. Det er værd at bemærke, at selvom cylinderens omkreds er begrænset til 12 knuder, så er dens dybde i princippet ubegrænset – dog i praksis begrænset af stabiliteten af eksperimentet.

Den cylinderformede graf er ikke identisk med den ønskede kvadratiske gittergraf i figur 1. Men det er muligt at frembringe gittergrafen ved at folde den cylinderformede graf ud gennem måling af specifikke knudepunkter, som vist i figur 5 og beskrevet i [13]. Efter udfoldningen er gittergrafen skabt og dermed klar til brug i en MBQC, hvor gates udføres gennem specifikke målinger af knudepunkterne som beskrevet ovenfor. At det faktisk virker, er for ganske nylig blevet vist eksperimentelt [15]. Som nævnt indledningsvist, så er klyngetilstanden en ressource for MBQC, og som en anden Pacman fortærer målingerne sig igennem

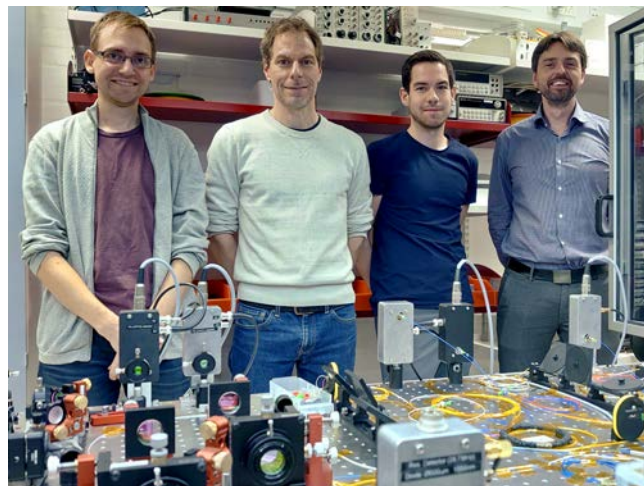
klyngen, som beregningen skrider frem. En interessant egenskab ved den tidlige klyngetilstand er imidlertid, at den hele tiden udbygges med nye knuder og kanter i den anden ende, og dermed er man ikke begrænset af et bestemt antal qubits – der kommer hele tiden nye til.

Der er stadig et stykke vej, før den optiske klyngetilstand kan anvendes som en fuldgyldig kvantecomputer. Blandt andet skal mængden af squeezing forbedres, og der er stadig brug for såkaldt “ikke-Gaussiske” operationer eller tilstande for at kunne udføre universelle kvanteberegninger. Dette er nok den optiske kvantecomputers akilleshæl: Selvom sådanne operationer og tilstande allerede er eftervist eksperimentelt, er det stadig på et meget grundlæggende niveau, og der er endnu brug for meget forskning for at nå i mål. Ikke desto mindre er optisk MBQC vældig lovende, særligt på grund af den meget direkte vej til at skalere platformen.

Litteratur

- [1] R.P. Feynman (1982) Simulating Physics with Computers, *Int. J. Theor. Phys.*, bind 21, side 467.
- [2] J.S. Bell (1964) On the Einstein Podolsky Rosen paradox, *Physics*, bind 1, side 195.
- [3] A. Aspect m.fl. (1981) Experimental Tests of Realistic Local Theories via Bell’s Theorem, *Phys. Rev. Lett.*, bind 47, side 460.
- [4] B. Hensen m.fl. (2015) Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometers, *Nature*, bind 526, side 682.

- [5] D. Deutsch og B. Jozsa (1992) Rapid solution by quantum computation, *Proc. R. Soc. London*, bind 439, side 553.
- [6] S. Lloyd (1993) A Potentially Realizable Quantum Computer, *Science*, bind 261, side 1569.
- [7] S. Lloyd (1996) Universal Quantum Simulators, *Science*, bind 273, side 1073.
- [8] P.W. Shor (1994) Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring, *Proceedings 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science. IEEE Comput. Soc. Press*, side 124–134.
- [9] J. Preskill (2018) Quantum Computing in the NISQ era and beyond, arXiv:1801.00862v3.
- [10]] <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/popular-physicsprize2012.pdf>
- [11] F. Arute m.fl. (2019) Quantum supremacy using a programmable superconducting processor, *Nature*, bind 574, side 505.
- [12] R. Rausendorff m.fl. (2001) A One-Way Quantum Computer, *Phys. Rev. Lett.*, bind 86, side 5188.
- [13] M.V. Larsen m.fl. (2019) Deterministic generation of a two-dimensional cluster state, *Science*, bind 366, side 369.
- [14] W. Asavanant m.fl. (2019) Generation of time-domain-multiplexed two-dimensional cluster state, *Science*, bind 366, side 373.
- [15] M.V. Larsen m.fl. (2020) Deterministic multi-mode gates on a scalable photonic quantum computing platform, arXiv:2010.14422.



Fra venstre:

Jonas S. Neergaard-Nielsen er seniorforsker ved DTU Fysik med speciale i ikke-klassisk lys og dets anvendelse inden for kvanteinformation.

Ulrik L. Andersen er kvantefysiker og leder af Danmarks Grundforskningsfonds center for makroskopiske kvantetilstande (bigQ) på DTU Fysik. Hans forskning er centreret om kvanteinformationssystemer.

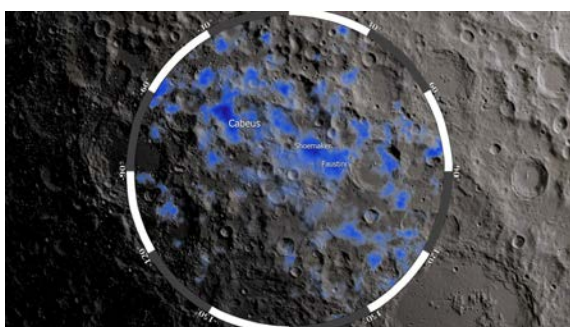
Mikkel V. Larsen er ph.d.-studerende inden for kontinuert variable kvanteinformatik ved DTU Fysik med fokus på klyngetilstande og målebaserede kvantecomputere (MBQC) vha. lys.

Ulrich Hoff er seniorrådgiver i kvanteteknologi ved grundforskningscentret bigQ, DTU Fysik. Han er desuden daglig leder af QuantumDTU, skribent for ForskerZonen på Videnskab.dk og medforfatter til flere populærvidenskabelige bøger om naturvidenskab.

Vand på Månen

Christine Pepke Gunnarsson, Kvant

MÅNEFYSIK. NASA har bekræftet, at de har fundet vandmolekyler på Månen. Det er NASAs flyvende teleskop SOFIA (Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy), som har observeret vand i et krater kaldet Claviuskrateret, der ligger på den sydlige halvkugle på Månens lyse side, som er synlig fra Jorden.



Opdagelsen kan betyde, at der er vand flere steder på Månen, og at det ikke kun findes som is i de kolde og mørke kraterer ved Månens poler, som tidligere observationer har vist. Forskere har før set tegn på vand på Månen, men her har man ikke kunnet skelne, om det faktisk var vand (H₂O) eller hydroxyl (OH).

SOFIA er en modificeret Boeing 747SP, som har et teleskop med ombord. Da SOFIA er flyvende ca. 14 km over Jordens overflade, kan den få gode billeder af universet uden

at være forstyrret af atmosfæren. SOFIA har målt det Sollys, der reflekteres fra Månens overflade med et infrarødt kamera, og her kunne SOFIA fra Claviuskrateret måle en bølgelængde på 6,1 μm, hvilket er specifikt for vandmolekyler.

SOFIA målte en vandkoncentration på 100–412 ppm, til sammenligning er vandkoncentrationen i Sahara 100 gange større. Selvom det er en lille mængde, er det interessant, at der er vand på den ellers golde og barske Måne, og det får forskerne til at overveje, hvordan vandet er kommet der, og hvorfor det ikke fordamper. Det ville man forvente, da Månens atmosfære har en meget lav densitet og ikke ville kunne holde på vandet.

Forskerne har overvejet flere muligheder for, hvorfra vandet er kommet: Fx med små meteoritter eller med Solvinden, der kunne tænkes at bære hydrogen til overfladen og gennem en kemisk reaktion med oxygen-indeholdende mineraler skabe hydroxyl. Derefter skulle strålingen fra Solvinden omdanne hydroxyl til vand. Forskerne tror, at vandet er blevet indkapslet i små perlelignende strukturer i Månestøv, eller at det er gemt imellem støvkornene og på den måde afskærmet fra Sollyset.

Vand er en værdifuld ressource i rummet, og en vandresource på Månen ville kunne bruges af astronauter enten til at drikke eller til brændstof ved at splitte vandmolekylerne vha. elektrolyse for derved at danne brint. Det er dyrt at transportere materiale ud i rummet, så en vand- eller brændstofftank på Månen ville være oplagt som en base for rejser længere væk til fx Mars. At vandet tilmed befinder sig på et varmere område på Månen og ikke på de kolde poler, er perfekt, da et sådant område også er egnet til en fremtidig Månebase.

Kilde: NASA & C.I. Honniball mfl. (2020) Molecular water detected on the sunlit Moon by SOFIA, *Nat. Astron.*