



# COMPUTERSPIL TÆMMER ATOMERNES VERDEN

Spillet Quantum Moves viser vejen hen mod fremtidens supercomputere ved at finde nye måder at løse problemer inden for kvantefysik.

I kvantefysik beskrives atomers og molekylers bevægelse som om, de er bølger, der udbreder sig gennem rummet på samme måde som dønningerne fra et skib udbreder sig på en havoverflade. Fysikere kan beregne bølgens form og bevægelse ved at løse en bestemt matematisk ligning, Schrödingers ligning. Højden af den teoretisk beregnede bølge

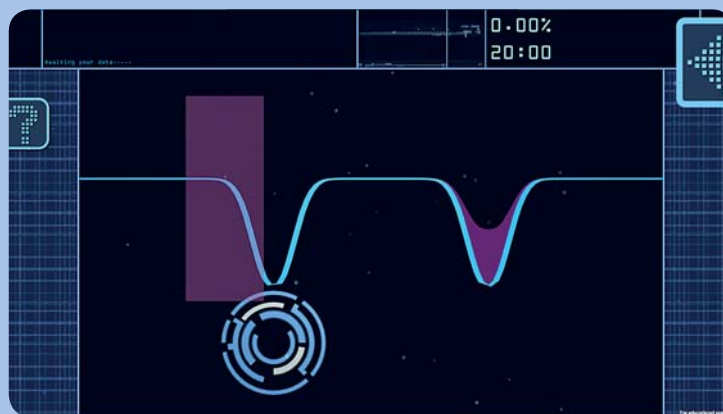
på forskellige steder angiver, hvor sandsynligt det er, at man i et eksperiment vil finde atomet netop der. Vi ved altså ikke med sikkerhed, hvor atomet er, før vi har målt det, og indtil målingen finder sted, er det som om, atomet er flere steder på samme tid.

Det er de mikroskopiske partiklers mærkværdige evne til at være flere

steder og have flere egenskaber på samme tid, som vi forsøger at anvende i kvantecomputeren.

I en klassisk computer benyttes strømme og spændinger til at repræsentere data i form af bits, således at fx to forskellige elektriske spændinger svarer til de to mulige talværdier 0 og 1. Hvis man i stedet lagrer informationen om

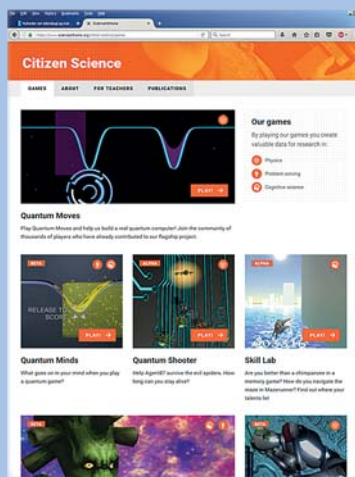
Bring Home Water niveauet i Quantum Moves. Laserstrålerne i eksperimentet danner de brønde, der bliver vist med den lyseblå streg. Den lilla væske, som man kan se, er atombølgen. Når man spiller, flytter man på brønden ved hjælp af musen eller fingeren.



← To meget unge gamere prøver kræfter med spillet Quantum Shooter sammen med Jacob Sherson i forbindelse med Forskningens døgn. Foto: Lars Kruse

## Du kan også forske

På scienceathome.org findes flere spil hvor du kan hjælpe med til at løse diverse forskningsproblemer inden for alt fra psykologi til kvantefysik. Du kan fx prøve at spille Alien Game, der undersøger hvordan virkninger løser problemer, eller Quantum Minds, der studerer, hvordan vi som mennesker lærer og finder på nye ideer. Du kan selvfølgelig også finde Quantum Moves, der igennem en række spil finder løsninger til, hvordan vi kan bygge en kvantecomputer, eller Skill Lab der kigger på hvilke kognitive evner der gør os gode til at spille forskellige spil. Der kommer hele tiden flere spil op på siden, og en del af spillene er også tilgængelige på smartphones.



Mads Kock Pedersen, leder ScienceAtHome's didaktiske afdeling og arbejder med, hvordan computerspil kan bruges i undervisning og til forskning. [madskock@phys.au.dk](mailto:madskock@phys.au.dk)



Klaus Mølmer, er professor i kvantefysik og arbejder med kvantecomputere og teori for målinger i kvantefysikken. [moelmer@phys.au.dk](mailto:moelmer@phys.au.dk)



Jacob Friis Sherson, er lektor i kvantefysik og arbejder med hvordan computerspil kan hjælpe til at designe en kvantecomputer under udvikling i hans laboratorium. [sherson@phys.au.dk](mailto:sherson@phys.au.dk)

bitværdierne 0 og 1 ved, at et atom er på et eller et andet sted, er det ifølge kvantefysikken muligt at være i en tilstand, som på samme tid repræsenterer talværdierne 0 og 1. Sådant en bit kaldes en *kvantebit*. To atomer kan så på samme tid repræsentere de fire muligheder 00, 01, 10 og 11 og med flere endnu kvantebits kan vi arbejde med tal med mange cifre og på samme tid udføre beregninger på mange tal: Kvantefysikken indebærer fantastiske muligheder for at løse meget svære regnestykker.

### Skal kunne bruges til noget

En kvanteberegning er en fysisk proces, som først er afsluttet, når computerens endelige resultat er blevet udlæst ved en måling. Udviklingen af en praktisk kvantecomputer handler især om at sikre, at løsningen til Schrödingers ligning fører til et måleresultat, vi kan bruge til noget. Den amerikanske matematiker Peter Shor foreslog i 1994 en computeralgoritme, der kan udnytte

kvantefysikken til effektivt at finde primfaktorer i store tal, dvs. de primtal, der ganget med hinanden giver det store tal. Det er svært at finde faktorerne til meget store tal, og det udnyttes man til at kryptere beskeder, fx hver gang man bruger sin e-mail eller netbank. I en hyppigt anvendt kode blandes en hemmelig tekst med et meget stort tal og bliver derved gjort ulæselig. Resultatet kan afkodes til den oprindelige besked ved en beregning, der kræver kendskab til det store tals faktorer – som kun den retmæssige modtager af beskeden forventes at have. Disse krypteringssystemer kan altså brydes med en kvantecomputer, og især efterretningstjenester støtter derfor både offentlig og dybt fortrolig forskning i kvantecomputere.

I 1997 supplerede den indisk-amerikanske datalog Lov Grover med en kvantemekanisk algoritme, der tillader effektiv søgning efter elementer i en database, og i de seneste år er

der kommet fokus på kvantecomputerens evne til at løse svære problemer i fysikken og kemien. Moderne industriel tilvirkning af medicin, kemiske stoffer og komponenter til energi- og miljøteknologier kræver forståelse af komplekse materialers opførsel på et mikroskopisk, atomart niveau, hvor det er meget vanskeligt at foretage præcise beregninger. Med en særlig energieffektiv produktion af kunstgødning som eksempel viste en analyse for nyligt, at en kvantecomputer ville kunne lave beregninger på få dage, som vil tage flere år på en konventionel computer.

### Kunsten at styre enkelte atomer

Konstruktionen af kvantecomputeren, der regner ved hjælp af enkelte atomer, er en formidabel teknisk udfordring. Erwin Schrödingers sammenlignede i 1950'erne ideen om at udføre rigtige forsøg på et enkelt atom med den absurde tanke at opdrætte fortidsøglere

Alle tre er tilknyttet Institut for Fysik og Astronomi på Aarhus Universitet og forskningsprojektet ScienceAtHome.org.



i zoologiske haver. Absurd eller ej – de tekniske muligheder har udviklet sig, og fra omkring 1980 har man i fysiklaboratorier kunnet fange og studere atomer ved hjælp af magnetfelter og laserlys. For at udnytte deres paradoksale egenskaber i en kvantecomputer skal man ikke alene kunne fange og iagttage disse kvantemekaniske partiklers opførsel, men også styre deres bevægelse og indbyrdes vekselvirkninger, ligesom vi styrer de elektriske strømme i en almindelig computerchip.

Blandt flere forslag til, hvordan det kan gøres, udviklede vi i Aarhus en protokol, hvor atomer fastholdes og flyttes rundt mellem hinanden ved hjælp af laserstråler. Når to atomer er tæt på hinanden, opstår de ønskede kræfter imellem dem, der udnyttes i beregningerne. Men

når vi flytter atomerne, skal vi passe på, at bølgerne ikke "skvulper" over, så de bliver tabt undervejs, eller de følgende regneoperationer giver forkerte resultater.

### Forskning som computerspil

En udfordring i protokollen er, at det er svært at løse Schrödingers ligning for atomernes bevægelse og derfor endnu sværere at finde den bedste og hurtigste måde at flytte atomet. Vi var derfor nødt til at lave computersimuleringer af, hvordan atomerne bevæger sig, afhængigt af hvordan laserstrålerne ændrer sig, og vi programmerede så computeren til at søge efter den bedste måde at kontrollere laserne.

Det viste sig at være en svær opgave for vores computer. Inspireret af forskningsprojekterne *FoldIt* og *EyeWire*, der havde omsat lignende

problemer om proteinfoldning og hjernens opbygning til computerspil, tog vi vores computersimuleringer af atomerne og omdannede dem til spillet *Quantum Moves*. I spillet vises laserstrålen, som flytter rundt på atombølgerne, som en brønd, der kan kontrolleres med computermusen eller en finger på en skærm. *Quantum Moves* repræsenterer den abstrakte matematik, der ligger bag ved kvantefysikken, som en væske, hvis bølgeskulp giver sandsynlighedsfordelingen for atomernes position. Det er hermed gjort både muligt og rigtigt sjovt for helt almindelige mennesker uden kendskab til matematik og kvantefysik at hjælpe med at løse et svært forskningsproblem.

### Spillere overgår computeren

*Quantum Moves* består af en række niveauer, der hver især fokuserer

## Findes kvantecomputeren allerede?

Der findes allerede kvantecomputere rundt omkring i verden. Den største kvantebaserede computer er D-Wave, som regner på 1000 superledende kvantebits. D-Wave kan dog kun bruges til at løse en specifik gruppe af optimeringsproblemer, og der bliver brugt meget tid på at undersøge, om den overhovedet er hurtigere end normale computere. Derfor er der



også en del diskussion om, hvorvidt D-Wave er en rigtig kvantecompu-

ter. De største af de mere traditionelle kvantecomputere består af omkring 14 kvantebits. Og hvis du selv skulle have lyst til at prøve at bruge en kvantecomputer, har IBM lige åbnet for, at alle frit kan prøve at bruge deres 5 bits kvantecomputer igennem the IBM Quantum Experience. Foto: Demonstration på en tablet i IBM's Quantum Lab. Foto: Jon Simon/IBM

## Kvanteteknologier på markedet

Der findes en række forslag til, hvordan man kan bygge en kvantecomputer ved hjælp af neutrale atomer, lys, elektroner, ioner, molekyler, halvledermaterialer eller superledende kredsløb. Forskere ved danske universiteter har leveret mange vigtige resultater til udvikling af kvantecomputere, der

benytter disse meget forskellige teknologier.

I 2016 er der i Danmark blevet oprettet et Quantum Innovation Center, QuBiz, hvor universitetsforskere i samarbejde med 18 højteknologiske virksomheder vil udvikle og markedsføre kvanteteknologier.

Der findes også lignende initiativer internationalt: I Storbritannien har man søsat et femårigt projekt til 2,7 mia. kr., og EU har netop annonceret et "Forskningsflagskib" til 7,5 mia. kr., som danske forskere også kan ansøge om til udvikling af brugbare kvanteteknologier, herunder en kvantecomputer.

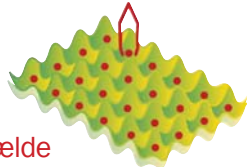
## Kvantecomputeren

### 1 Bits



Bits er computerens alfabet. En bit er enten "0" eller "1", og alle ord og instruktioner i en computer er i virkeligheden bare lange strenge af bits.

I en normal computer kræver komplicerede beregninger kæmpestore bitstrenge og en meget lang beregningstid.



### 4 Atomfælde

En kvantecomputer har brug for mange qubits. For at opnå det laver vi en æggebakkestruktur ved at bruge lasere og placerer derefter et atom i hver fordybning eller brønd i strukturen.

For at lave beregninger skal atomerne lægges ovenpå hinanden. Det gør vi med en optisk pincet, som er en laser, der gør brøndene dybere samt flytter atomerne rundt.

på en operation, som kan udføres i kvantecomputeren. Et af de niveauer, vi især har fokuseret på at forstå, har vi kaldt BringHomeWater. Her skal man flytte en tom brønd hen til en anden, fyldt brønd, samle atomet op og flytte det tilbage til start. Er der en lille barriere mellem brøndene, kan atomet ende op i den første brønd, lidt på samme måde som man med en såkaldt hævert kan flytte væske mellem to beholdere. I kvantefysikken kan man gøre det uden hævert ved en tunneleffekt, som vores spillere ikke vil have kendskab til, med mindre de har taget et kursus i kvantefysik.

Når vi så ser på, hvordan spillerne klarer sig i BringHomeWater, finder vi to meget interessante resultater. Det ene er, at spillerne helt uden problemer benytter tunneleffekten og altså har opnået en intuitiv forståelse for de underliggende mekanikker og udnyttet dem i praksis. Et andet helt epokegørende resultat er, at spillerne finder løsninger, som er markant bedre end de løsninger, som vores computer finder frem til!

### 2 Kvantebits

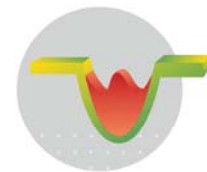
I en kvantecomputer er hver bit udskiftet med en kvantebit eller "qubit", som har den unikke evne, at den kan være "0" og "1" på samme tid!

Det betyder, at qubitstrenge kan repræsentere mange kommandoer simultant. Denne evne til at lave mange beregninger parallelt gør kvantecomputere enormt kraftfulde



### 5 Atomet som bølge

Atomet er i virkeligheden ikke en rund partikel, men et kompliceret objekt, som kan fremstilles som en slags bølge. Når atomet flyttes, begynder bølgen at skvulpe rundt. Hvis atomet bevæges for stærkt, spredt bølgen sig ud over det hele. Det er meget skidt, når man laver beregninger på en kvantecomputer!



### 3 Nedkøling af atomer

I vores kvantecomputer er hver qubit et atom. For at isolere atomerne sløver vi deres bevægelse ved at køle atomerne ned til ekstremt lave temperaturer. Herefter er det muligt at fange atomerne ved at lyse på dem med en laser. Laseren danner en dal, som atomet glider ned på bunden af.

### Computerspil i undervisningen

Hvad er det som gør, at mennesker igennem Quantum Moves kan finde bedre løsninger end computere? Er det fordi, vi opnår en viden om kvantefysik ved at spille Quantum Moves, som vi kan udnytte? Eller er det fordi, vi udnytter en særlig menneskelig evne for hånd-øje koordination, som vi umiddelbart kan træne op til en helt ny situation? Vi har endnu ikke noget entydigt svar, men der er klare indikationer på, at spillerne har lært noget om kvantefysik fra computerspillet. Vi har

således modtaget beskrivelser fra spillere af, hvordan de har løst problemerne, og selvom de ikke bruger det samme ordforråd, beskriver de deres løsninger med de samme mekanismer og iagttagelser som en trænet kvantefysiker ville bruge.

Derfor har vi også brugt Quantum Moves i gymnasierne som en introduktion til kvantefysikkens forunderlige verden. Ved at bruge spillet i undervisningen giver vi eleverne de visuelle værktøjer til at kunne arbejde konkret med atomfysiske problemstillinger, samtidigt med at spilelementerne både underholder og motiverer de studerende til at arbejde selvstændigt og eksperimenterende med materialet.

Vi arbejder nu på at udvikle spil, der er specifikt beregnet til undervisning. Et af vores mål er at lave en række spil, der fører den studerende hele vejen fra klassisk fysik op til, at man kan forstå, hvordan en kvantecomputer virker.

**Videre læsning:**  
Scienceathome.org

Klaus Mølmer "Kvantemekanik – atomernes vilde verden", Aarhus Universitetsforlag 2010.

Den kvantemekaniske computer: Aktuell Naturvidenskab nr. 2/2000.

**Hør mere om kvantecomputeren**  
Tirsdag den 30. august 2016 holder Klaus Mølmer foredrag om kvantecomputeren i serien Offentlige foredrag i Naturvidenskab på Aarhus Universitet. Foredraget livestreames til en lang række byer over hele landet. Tjek programmet på [scitech.au.dk/foredrag](http://scitech.au.dk/foredrag)

← Foto: I denne opstilling kan forskerne fange atomer med lasere og foretage den første nedkøling af atomerne. Foto: Scienceathome

