

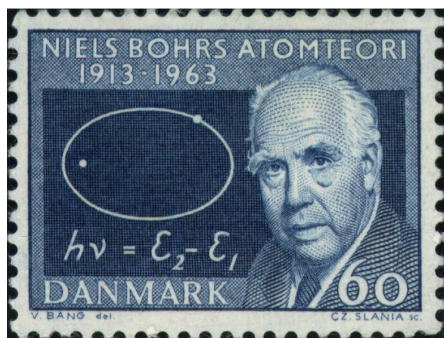
Hundrede år efter Bohr: Nobelprisen for fysik under gennemsnittet

Af Brian Julsgaard og Klaus Mølmer, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

I 2012 blev nobelprisen i fysik givet for eksperimenter på enkelte atomer og fotoner. Eksperimenterne har bekræftet kvantemekanikkens helt basale forudsigelser om, hvad der sker, når man f.eks. måler på et kvantesystem. I denne artikel beskriver vi nogle af disse eksperimenter, som Niels Bohr og kredsen af fysikere bag den kvantemekaniske revolution i perioden 1900-1930 kun kunne have drømt om.

Bohrs atommodel

I 1913 publicerede den danske fysiker Niels Bohr sin berømte model for sammensætningen af stoffets mindste bestanddele: Atomer består af elektroner, der kredser om en atomkerne ligesom planeterne bevæger sig om Solen. I 1900 havde den tyske fysiker Max Planck foreslået, at lys med frekvens ν kun kan udsendes i pakker, eller kvanter, med energi $\mathcal{E} = h\nu$, hvor h er Plancks konstant, og Bohrs bedrift var at forklare, hvorfor sammensætningen af lys fra atomare gasser ikke rummer alle farver men kun består af bestemte spektrallinjer. Til det formål postulerede Bohr, at (i) kun helt bestemte baner med dertil hørende energier er tilladte og (ii) absorption eller udsendelse af lys finder sted, når elektronerne foretager et *kvantespring* mellem to baner. Bevarelse af den samlede energi i atomet og i lyset giver nu en formel, der er så simpel, at den kan stå på et frimærke (og som er så vigtig, at den gør det):



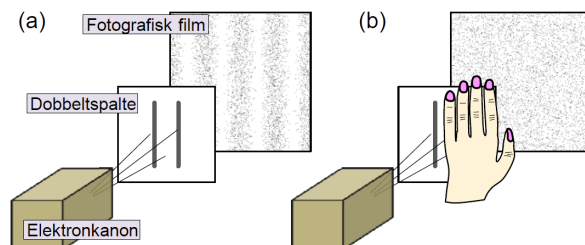
(1)

hvor \mathcal{E}_1 og \mathcal{E}_2 er energierne hørende til to forskellige baner, og ν er frekvensen af det udsendte lys. Modellen forklarer frekvensspektret (dvs. farvesammensætningen) af lyset, og Niels Bohr fik i 1922 Nobelprisen i fysik for *sit bidrag i undersøgelsen af atomers struktur og lyset udsendt fra dem*.

Kvantemekanikken bliver til

Niels Bohr gav et argument for præcist hvilke baneenergier, der er tilladte i brintatomet. Hans argument holdt dog ikke for mere komplicerede atomer, så derfor måtte en mere komplet teori udvikles. I 1926 fremsatte den østrigske fysiker Erwin Schrödinger en sådan teori, der erstatter elektronernes bevægelse i klassiske baner med

matematiske bølger, der svinger i rum og tid. Denne teori, for hvilken Schrödinger fik Nobelprisen i fysik i 1933 (sammen med Paul A.M. Dirac, der videreudviklede Schrödingers teori), kendes i dag som kvantemekanikken, og Schrödingers ligning danner det matematiske fundament for bølgebeskrivelsen. Løsninger til Schrödingers ligning, de såkaldte *bølgefunktioner*, svarer til f.eks. svingningerne af en guitarstreng eller af luften i en orgelpibe, hvor kun helt bestemte frekvenser er tilladte og bestemmer instrumentets toner. Tilsvarende giver Schrödingers ligning de tilladte energier for f.eks. mere komplicerede atomer eller molekyler, og Bohrs formel (1) giver de tilladte frekvenser af deres udsendte lys. Schrödingers mikroskopiske bølgebeskrivelse udfordrer vor dagligdags opfattelse af den fysiske verden: Hvor er elektronerne i virkeligheden henne, hvis de beskrives som bølger? Den tyske fysiker Max Born gav i 1926 svaret på dette spørgsmål: "Det ved vi ikke, men kvadratet på de stedafhængige bølgefunktioner angiver *sandsynligheden* for at finde en elektron forskellige steder i rummet, *når* målingen foretages". Denne forklaring, som belønnedes med Nobelprisen i fysik i 1954, sammenkobler den matematiske teori med målinger, som vi kan foretage i laboratoriet. Et glimrende eksempel herpå er dobbeltspalteeksperimentet, se figur 1, hvor enkelte elektroner beskyder en skærm med to spalter. Så længe vi ikke måler, om elektronen passerer den ene eller den anden spalte, vil bølgefunktionens bidrag fra de to spalter interferere, og måleresultaterne vil udgøre et stribet mønster.



Figur 1. Dobbeltspalteeksperimentet. (a) Elektroner beskyder en skærm med to spalter, og bølgebeskrivelsen af elektronbevægelsen giver anledning til et interferensmønster på en fotografisk film. Hvis en af spalterne blokeres, som vist i (b), ved man, hvilken rute elektronerne følger, og interferensmønsteret forsvinder.

I de fleste anvendelser af kvantemekanikken studeres meget store antal partikler, og vi observerer fordelinger af måleresultaterne som i figur 1 forudsagt af bølge teorien. I 1952 skrev Schrödinger i en artikel: "Vi eksperimenterer ikke med enkelte partikler ligesom vi ikke opdrætter Ichtyosaurusser i zoologisk have", underforstået at det tilfældige element af den enkelte måling er et filosofisk paradoks, men ikke et praktisk problem for fysikken. Inden for de seneste tre årtier har kvantemekanikken imidlertid bevæget sig ind i en ny tidsalder, hvor enkelt-partikel eksperimenter er blevet mulige. I 2012, næsten hundrede år efter Bohrs atommodel, blev Nobelprisen i fysik således givet til den amerikanske fysiker David Wineland og den franske fysiker Serge Haroche for deres *banebrydende eksperimentelle metoder, der muliggør måling og manipulation af enkelte kvantesystemer*. Vi vil i det følgende beskrive disse to forskeres arbejde, som har stærke rødder helt tilbage til Bohrs atommodel.



Figur 2. Alfred Nobel (i midten) flankeret af Serge Haroche (tv) og David Wineland (th).

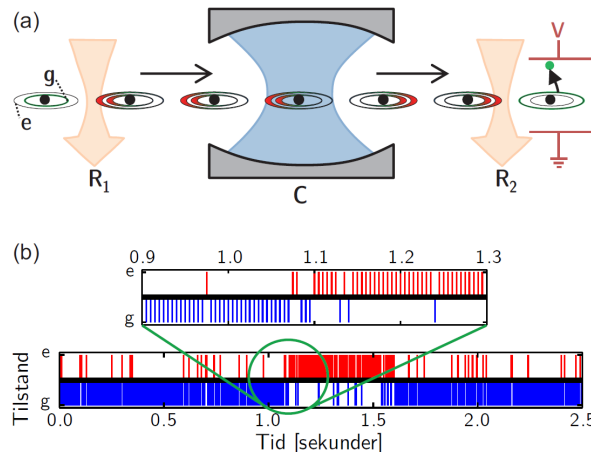
Eksperimenter med enkelte lyskvanter

Vi vil i det følgende bruge Bohrs betegnelse – baner – om de forskellige fysiske tilstande af elektronen, og så selvom de beskrives matematisk med Schrödingers bølgefunktioner, der beskriver sandsynligheden for at finde elektronen forskellige steder omkring atomkernen. Bohrs atommodel siger, at lyskvanter, eller fotoner som de også kaldes, enten kan udsendes ved at en elektron skifter til en bane (bølgefunktion) med lavere energi eller absorberes, når en elektron skifter til en højere liggende bane. Disse processer er normalt svage, og en enkelt foton skal passere mange atomer, inden det er sandsynligt, at et af dem absorberer fotonen. Serge Haroche har derfor forfinet sine eksperimenter på tre afgørende punkter:

- i) Han kan præcist kontrollere atomernes bevægelse, et ad gangen, gennem forsøgsopstillingen,
- ii) Han forbereder atomerne i en bestemt bane med (mest sandsynlig) afstand 0,13 mikrometer til atomkernen, hvilket er 2.500 gange mere end banen med lavest energi i brint,
- iii) Den centrale del af forsøgsopstillingen er omkranset af en meget højt-reflekterende kavitæt, dvs. to spejle, hvorimellem lys kan rejse frem og tilbage ca. en milliard gange uden at gå tabt.

Atomets ekstreme størrelse bevirker, at chancen for at indfangne eller udsende en foton er drastisk forøget, og

kavitæten bevirker, at fotoner får rigtigt mange chancer for at vekselvirke med det samme atom. Det gør koblingen så stærk, at Serge Haroche i 1996 kunne observere et enkelt atom udsende og indfangne én og samme foton op til flere gange efter hinanden. Herefter blev atomernes rolle i eksperimenterne typisk at manipulere eller detektere lyset mellem de to spejle, se eksemplet i figur 3, der viser en foton s fødsel, levned og død [1].



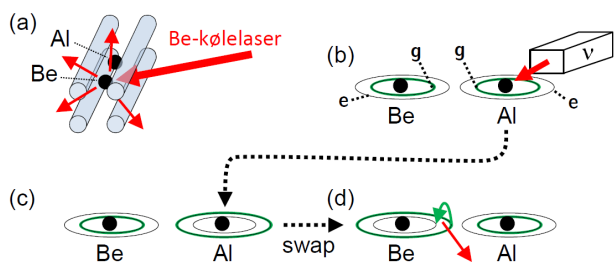
Figur 3. (a) Skitse af Serge Haroches fotonmålinger. Atomer flyver gennem forsøgsopstillingen fra venstre mod højre. Først initialiseres atomerne i elektronbanen g, og med stråling R_1 flyttes elektronen til en planet-agtig banebevægelse i et særligt samspil mellem elektronbanerne g og e, en såkaldt superposition af de to tilstandes bølgefunktioner. Elektronens bevægelse er meget følsom over for tilstedeværelse af selv enkelte lyskvanter i kavitæten og eksperimentet kan justeres således, at hvis et atom passerer kavitæten C indeholdende blot en enkelt foton, vil elektronen cirkulere en ekstra halv omgang om kernen i forhold til tilfældet med en tom kavitæt. Når atomet har forladt kavitæten, bruges strålingen R_2 til at overføre elektronen til banen e (eller til g, hvis kavitæten var tom og elektronen ikke tog den ekstra halve runde). Tilstanden e kan detekteres, fordi elektronen kun er svagt bundet, og atomet kan ioniseres med et elektrisk felt. (b) Skitse af signalet fra ionisationsdetektoren som funktion af tiden, dvs. tilstanden af hvert enkelt udgående atom. Bortset fra enkelte isolerede fejlmålinger viser signalet gennem lang tid, at der ikke er en foton i kavitæten, men omkring $t = 1,1$ s opstår en foton i C (fra ekstern varmestråling), og den forsvinder igen (pga. tab i kavitæten) omkring $t = 1,6$ s.

Eksperimenter med enkelte ioner

David Wineland udfører forsøg med ioner, dvs. atomer, der mangler en elektron, og som indfanges og fastholdes i en ionfælde vha. elektriske felter fra særligt designede elektroder. Gennem en årrække er disse forsøg blevet forfinet på følgende punkter:

- i) Det er muligt at påvirke ionerne med laserlys, så de kommer til at ligge helt stille (således at ikke blot elektronernes opførsel, men hele atomets bevægelse i fælden beskrives af bølger),
- ii) Det kan kontrolleres og måles med stor nøjagtighed, hvilken Bohr-bane elektronen i en enkelt ion befinder sig i,
- iii) Hvis der er flere ioner i fælden, kan de, pga. deres elektriske frastødning, skubbe til hinanden, og vha. laserteknikker kan man få ionernes *indre* tilstande til at kommunikere med hinanden.

I modsætning til Serge Haroche benytter David Wineland altså lys til at styre og detektere de atomare partikler, og udviklingen og brugen af lasere med stor frekvensstabilitet har haft afgørende betydning for hans forskning.



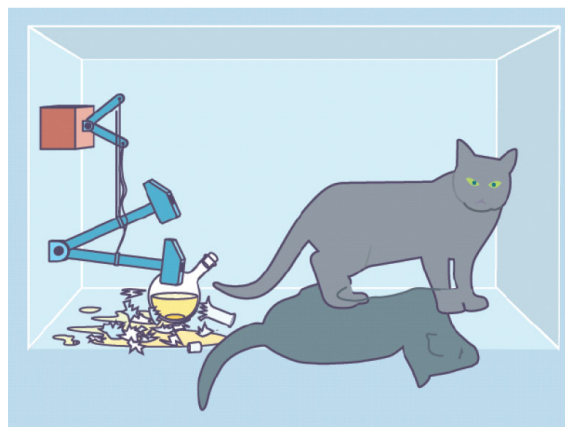
Figur 4. Skitse af David Winelands atomur. (a) En Al- og Be-ion er fanget mellem elektroder i en ionfælde, og Be-ionens bevægelse nedkøles med en laser. Pga. ionernes elektriske frastødning fjernes bevægelsesenergien (varmen) fra *begge* ioner, og også Al-ionen kommer til at ligge stille. Vi ønsker at kontrollere, om laserlys med frekvensen ν opfylder $\nu = \nu_0$, og dette lys sendes nu ind på Al-ionen (b), som får sin elektron eksiteret til banen e som vist i (c). Hvis laserlyset er svagt vil denne proces være meget langtvarende og chancen for, at Al-ionen skifter elektronbane, bliver ultra-følsom over for frekvensbetingelsen $\nu = \nu_0$. Med særlige laserteknikker, udføres nu en swap operation, dvs. Be-ionen bliver eksiteret, betinget af at Al-ionen var eksiteret. Den eksiterede Be-ion i (d) kan effektivt udføre kvantespring og udsende lys, som kan detekteres.

Et af David Winelands forskningsområder handler om ultra-præcise atomure, der kan bruges som referencer for tids- og frekvensmålinger, og hvor det er vigtigt, at to forskellige ure, evt. placeret vidt forskellige steder i verden, går helt ens. Bohrs atommodel kan benyttes til at opfylde denne betingelse: En standardiseret frekvens ν_0 kan vælges således, at den iflg. formel (1) netop passer til energien mellem to elektronbaner i et velvalgt atom. Frekvensen ν af lyskilder kan overalt i verden sammenlignes med ν_0 ved at undersøge, om man kan tilføre energi til den valgte type atom. David Wineland benytter sig af elektronbaner, hvor de styrende kræfter overvejende kommer fra atomets indre elektriske felter og ikke fra ydre ukontrollerbare påvirkninger, så to forskellige atomure vil være helt enige om frekvensen. For at opnå en meget høj præcision er det afgørende at registrere mange svingninger. Det tager lang tid, og en enkelt isoleret ion i en fælde er velegnet til formålet. En langvarig måling er dog kun mulig på en ion, hvis den ikke alt for hurtigt vil skifte elektronbane og udsende lys af sig selv. David Wineland har i sine seneste forsøg brugt en aluminium-ion, $^{27}\text{Al}^+$, hvor en særligt langlevende elektrontilstand kun udsender lys i gennemsnit hvert tyvende sekund. Tilstandens lange levetid bevirker imidlertid, at ionen ikke kan bringes til hvile ved hjælp af laserlys, og det kan kun vanskeligt detekteres, hvilken tilstand elektronen befinder sig i. Wineland har udviklet en snedig løsning ved at indsætte en beryllium-ion, $^9\text{Be}^+$, i den samme fælde. $^9\text{Be}^+$ -ionen kan bringes til hvile med laserlys, og trækker dermed også energien ud af $^{27}\text{Al}^+$ -ionen. Hvis vi tænker på de to ioner som et enkelt samlet fysisk system,

kan vi ændre deres samlede tilstand, hvis vi tilfører eller fjerner den nødvendige mængde strålingsenergi. Er for eksempel $^{27}\text{Al}^+$ -ionen i tilstanden med den høje energi $\mathcal{E}_2^{\text{Al}}$, mens $^9\text{Be}^+$ -ionen har sin laveste energi $\mathcal{E}_1^{\text{Be}}$, er den samlede energi $\mathcal{E}_2^{\text{Al}} + \mathcal{E}_1^{\text{Be}}$, og vi skal tilføre energien $(\mathcal{E}_2^{\text{Be}} - \mathcal{E}_1^{\text{Be}}) - (\mathcal{E}_2^{\text{Al}} - \mathcal{E}_1^{\text{Al}})$ for at begge ioner skifter tilstand. Således vil $^9\text{Be}^+$ -ionen ende i tilstanden med den høje energi, og ved et kvantespring vil denne hurtigt henfalde og udsende lys, som dermed indirekte afslører $^{27}\text{Al}^+$ -ionens tilstand. Den nødvendige energi kan tilføres til de to ioner ved at lyse på dem med to laserstråler, hvis frekvenser netop er afstemt, så der efter ligning (1) bliver energibevarelse, men kun hvis begge ioner skifter tilstand. Præcisionen af dette atomur er $\delta\nu/\nu \approx 10^{-17}$, svarende til en tidsforskel på få sekunder over hele universets alder. Nøjagtige tidsmålinger har betydning for kommunikation og navigation, f.eks. gennem GPS systemet, og inden for grundforskningen kan man bl.a. teste, om naturkonstanterne faktisk er konstante eller undersøge korrektheden af Einsteins generelle relativitetsteori. Sidstnævnte siger, at tiden går langsommere i et tyngdepotentiale, og ved at sammenligne to atomure og hæve det ene med blot 33 cm, kunne David Wineland i 2010 påvise en målbar forskel i overensstemmelse med relativitetsteorien [2].

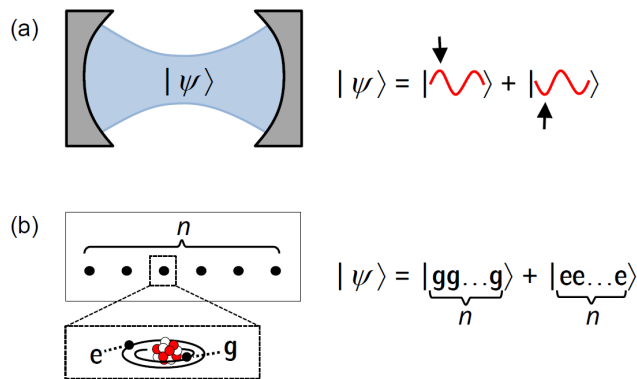
Schrödingers kat har fået killinger

Erwin Schrödinger fandt selv kvantemekanikkens beskrivelse af naturen utilfredsstillende, og han udtrykte i 1935 med det såkaldte katteparadoks sin bekymring for opdelingen af fysikken i en mikroskopisk verden med bølger og en makroskopisk verden med tilfældige målinger, se figur 5.



Figur 5. I en lukket kasse er en Geigertæller placeret nær en så lille mængde radioaktivt materiale, at sandsynligheden for et udslag i løbet af en time er 50%. Hvis et radioaktivt henfald registreres, udløses en hammer, der smadrer en flaske med blåsyre, der vil dræbe en kat, som således har en fifty-fifty chance for at overleve efter en time. Schrödinger fandt det absurd, at en bølge-teori skulle kunne redegøre for, hvad der foregår i kassen, for i sådan en teori ville katten efter en time (inden kassen åbnes), være beskrevet som *både levende og død*, og dens skæbne ville først afgøres tilfældigt, idet kassen åbnes. Paradokset stiller spørgsmålet: Hvor går grænsen mellem bølgefunktionens "både-og" og måleresultaternes "enten-eller"?

Mange år senere har både Serge Haroche og David Wineland ladet sig inspirere af dette katteparadoks og forsøgt at skabe kvantetilstande med mikroskopiske kvantemekaniske partikler i kontakt med lidt større fysiske systemer. De store systemer er endnu ikke så store som katten i figur 5, og vi kalder derfor de opnåede tilstande for Schrödingers killinger, se figur 6.



Figur 6. (a) Serge Haroche's Schrödinger-killing: Lyset i en kavitet svinger som en helt almindelig sinusbølge, dog i en kvantetilstand, så der bestemte steder i bølgen (f.eks. markeret med pile) er *både* en bølgetop og en bølgedal på samme tid. Notationen til højre er fysikerens måde at udtrykke denne såkaldte superposition. (b) David Wineland's Schrödinger-killing: Et antal af n ioner er placeret i en ionfælde og kan hver især have sin elektron i en af to elektronbaner, g eller e . I forsøget laves en tilstand, hvor alle ioners elektron er i den samme tilstand, men de er alle i banen g og samtidigt i banen e .

Lysbølger er svingende elektriske og magnetiske felter, og Serge Haroche skabte i 1996 lysfelter i sin kavitet, hvor feltet svingede *både* til den ene og den anden side på samme tid. Når han efterfølgende lod et atom vekselvirke med den skabte killinge-tilstand, kunne han iagttage feltets “både-og”-karakter som en interferens mellem de to tilstande, atomet ville have været i, hvis felt-tilstanden havde haft “enten-eller”-karakter [3]. David Wineland kunne i 2000 skabe en tilstand i sin ionfælde, hvor elektronerne i fire ioner *både* er i banen e og i banen g samtidigt (i 2005 lykkedes det med seks ioner [4]). Hvis n angiver antallet af ioner, kunne han bevise “både-og”-karakteren, ved at ionerne altid opførte sig som et enkelt system med to fysiske tilstande, separeret af energien $nh\nu$, og ikke som n ioner, som hver især har tilstande separeret af energien $h\nu$. Serge Haroche's forsøg viste klart, at jo kraftigere hans “både-og”-svingninger var, des hurtigere ville tab af selv ganske lidt lys få interferensen mellem de to tilstande til at forsvinde, og en klassisk “enten-eller”-beskrivelse ville være tilstrækkelig til at forklare målingerne. På samme måde, skal man i David Wineland's tilfælde blot forstyrre eller måle tilstanden af en enkelt ion, for at de resterende $n - 1$ ioner mister deres “både-og”-karakter. Jo flere ioner, der er i Wineland's Schrödinger- katsystem, des mere sandsynligt er det, at blot en af dem på et tidspunkt forstyrres. I både Serge Haroche's og David Wineland's forsøg gælder det altså at jo mere makroskopisk vi gør kvantesystemet,

jo hurtigere henfalder “både-og”-bølgebeskrivelsen til en statistisk “enten-eller”-beskrivelse. Det er en vigtig del af forklaringen på, hvorfor vi ikke observerer rigtige (levende og døde) Schrödingers- katte i hverdagen: Schrödingers killing bliver til en klassisk kat, når den bliver stor!

Fysik under gennemsnittet

Serge Haroche's og David Wineland's eksperimenter på enkelte og isolerede systemer har et helt særligt kvantemekanisk perspektiv. Deres observationer demonstrerer, hvordan den gennemsnitlige opførsel af et kvantesystem skyldes den underliggende tilfældige dynamik – de viser os “fysikken under gennemsnittet”. David Wineland's atomur er en konkurrent til en mere traditionel version, hvor en gas af mange cæsiumatomer bruges som reference for en standardfrekvens ν_0 . Cæsiumatomerne er selv gode til at udsende lys, og den endelige udlæsning af de mange cæsiumatomer giver et kontinuerligt varierende signal, når lysfrekvensen ν justeres omkring ν_0 . Ved at registrere mængden af udsendte lyskvanter fra mange atomer og dividere med antallet af atomer måler vi atomernes *gennemsnitlige* opførsel — eller med andre ord det enkelte atoms sandsynlighed for denne lysudsendelse. I David Wineland's Al-baserede atomur har ionen en varierende sandsynlighed for at være i de to tilstande g og e , når frekvensen ν justeres omkring ν_0 . Når tilstanden måles ved hjælp af laserlys og Be-ionen, sker der fra forsøget til forsøget et valg, om den overhovedet vil udsende lys eller ej. Ifølge Max Born's fortolkning er udfaldet af dette valg helt tilfældigt, som når man slår plat eller krone; kvantemekanikken forudsiger sandsynlighederne for hvert enkelt valg og dermed også, hvad man skal få *i gennemsnit*. David Wineland er således nødt til at gentage sit forsøg mange gange, inden han kan afgøre om $\nu = \nu_0$ ligesom man også skal bruge mange møntkast på at afgøre præcist, om en mønt er fair (dvs. fifty-fifty chance for plat eller krone) eller om der af en eller anden grund er en oversandsynlighed for f.eks. krone.

Planck's teori for lyskvanter forudsiger, at der ved en given temperatur vil være et bestemt gennemsnitligt antal kvanter ved forskellige frekvenser (farver). Planck's teori blev faktisk udformet som en forklaring på at gløderne i en kakkelovn skifter farve fra hvidglødende til rødglødende, når de bliver koldere. Serge Haroche laver sine forsøg ved en lav temperatur, hvor der iflg. Planck skal være mindre end en enkelt foton i gennemsnit imellem spejlene, og eksperimentet i figur 3(b) er et eksempel på fysikken der ligger til grund for dette gennemsnit. Figuren viser, at der *enten* er stor sandsynlighed for at finde det udgående atom med sin elektron i banen g eller i banen e , svarende til at der henholdsvis er nul eller én foton i kaviteten. Der findes ikke halve fotoner, og der er på intet tidspunkt f.eks. fifty-fifty chance for g eller e . Hvis forsøget havde været konstrueret med mange fotoner i kaviteten, eller i frit rum hvor der kan være både 0 og 1 foton ved mange

forskellige frekvenser, ville de ovennævnte egenskaber fortabe sig som kontinuertlige gennemsnitseffekter.

Wineland og Haroches eksperimenter foretages på enkelte systemer, en enkelt ion eller en enkelt reflekteret lysstråle, og de viser, at de enkelte målinger er i fuld overensstemmelse med kvantemekanikkens forudsigelser om tilfældige resultater. Den tilfældige natur af de enkelte målinger optog kvantemekanikkens skabere dybt, og dobbeltspalte-eksperimentet i figur 1 og katteparadokset i figur 5 er eksempler fra de meget intense diskussioner, hvor Einstein og Schrödinger kritiserede teoriens mystiske egenskaber. Winelands og Haroches eksperimenter er vigtige og en Nobelpris værd, fordi de tillader os at trænge et skridt dybere ned i diskussionen af målinger i kvantemekanikken: I modsætning til dobbeltspalteeksperimentet, hvor elektronen rammer en fotografisk film, og vi ser striberne, når vi fremkalder filmen, *overlever* den fangede ion i fælden efter at have udsendt lys, og der er stadig et felt i spejlkaviteten, efter atomet er fløjet ud.

Det betyder, at man eksperimentelt kan undersøge, ikke blot resultaterne af målingerne, men også deres konsekvenser for det mikroskopiske kvantesystem, der måles på. I de seneste eksperimenter i Serge Haroches laboratorium udnyttes det, at vi gennem kvantemekanikken faktisk kender disse konsekvenser, og man inddrager nu de tilfældige måleresultater fra tidligere atomer til at optimere, hvilke atomare tilstande de følgende atomer skal præpareres i, så man kan styre dynamikken af det fangede strålingsfelt. En sådan kontrol er vigtig, hvis vi vil udnytte kvantemekanikken teknologisk, f. eks. i endnu bedre atomure og i nye strategier for kvantecomputere.

Opsummering

Vi indledte artiklen med Planck og Bohrs teori for kvanter og atomer, som udgør de elementære byggestene i vekselvirkningen mellem lys og stof. Bohrs frekvensbetingelse i formel (1) er, med 100 år på bagen, stadig en helt central ligning, som udtrykker energiens bevarelse, og som derfor har generel anvendelighed langt ud over den oprindelige anvendelse på brintatomet. Bohrs atommodel blev i 1920'erne erstattet af kvantemekanikken, men frekvensbetingelsen holder stadig. Haroches observation i figur 3 af spring mellem tilstande med 0 og 1 foton i kaviteten er også i fin overensstemmelse med Bohrs oprindelige idé om kvantespring.

Efter fremkomsten af den nye kvantemekanik blev

Niels Bohr en af de mest aktive deltagere i arbejdet med at fortolke den. Hans idéer om måleprocessens centrale betydning, og om hvorledes forskellige beskrivelser og begreber kan være i modstrid med hinanden, men samtidigt er nødvendige for fuldstændigt at redegøre for et fysisk systems opførsel, udgør en hjørnesten i den såkaldte Københavnerfortolkning. Der har siden Bohrs arbejder været flere eksperimentelle og teoretiske milepæle i udforskningen af kvantemekanikkens grundlag, og Wineland og Haroche har med deres nærmest ultimative kontrol sat scenen for næste akt, hvor vi ikke bare vil iagttage, men også selv styre og udnytte kvantemekanikkens mere spidsfindige konsekvenser.

Litteratur

- [1] S. Gleyzes, et al., *Nature* **446**, 297 (2007). <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0612031>.
- [2] Se NIST pressemeddelelse fra 28. september 2010, Dit hoved er ældre end dine fødder, <http://www.nist.gov/pml/news.cfm>.
- [3] M. Brune, et al., *Phys. Rev. Lett.* **77**, 4887 (1996). Frit tilgængelig på <http://prl.aps.org>.
- [4] Se NIST pressemeddelelse fra 30. november 2005, Fysikere lokker 6 atomer i en "kvante-kat" tilstand.



Brian Julsgaard er lektor i fysik ved Aarhus Universitet og beskæftiger sig med kvantefysik samt optiske egenskaber af halvleder-nanostrukturer i siliciumbaserede materialer.



Klaus Mølmer er professor i fysik ved Aarhus Universitet og beskæftiger sig med kvantoptik, teori for målinger i kvantemekanikken og kvantecomputere.