

Kvante- spring

AF KLAUS MØLMER



Klaus Mølmer (f. 1963) blev i 2000 professor i teoretisk fysik ved Aarhus Universitet efter forskningsophold i Frankrig og Tyskland. Hans forskning vedrører kvantemekaniske fænomener og deres mulige anvendelser i blandt andet kvantecomputere. Med bogen "Kvantemekanikken – atomernes vilde verden" (Aarhus Universitetsforlag, 2010) og en lang række offentlige foredrag er han tillige en flittig populærvidenskabelig formidler.

Klaus Mølmer har i 2012 modtaget Villum Kann Rasmuseens Årslegat til Teknisk og Naturvidenskabelig Forskning for sin banebrydende forskning inden for teoretisk kvanteoptik og atomfysik. Her har han haft særligt fokus på studiet af atomare systemers vekselvirkning med lys. Årslegatet på 2.500.000 kr. skal ifølge Klaus Mølmer anvendes til forskning, der har potentiale til at åbne helt nye muligheder for kontrol og anvendelse af kvantesystemerne.

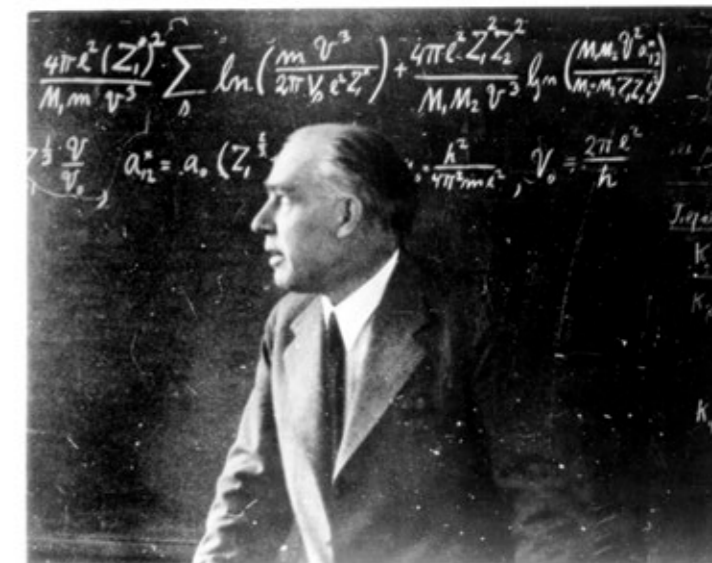
Bohrs atommodel

Den danske fysiker Niels Bohr foreslog i 1913, at stoffets mindste bestanddele, atomerne, består af elektroner i kredsløb om en atomkerne. Kredsløbene minder om planeternes baner rundt om solen, men i Bohrs atommodel kan en elektron kun bevæge sig i baner med *helt bestemte afstande* til atomkernen. Til gengæld bliver den undertiden afbrudt i sin banebevægelse og foretager et *kvantespring*, hvorefter den fortsætter bevægelsen i en bane med en anden afstand.

I år 1900 havde den tyske fysiker Max Planck forklaret, at lyskilder udsender deres stråling i pakker, eller *kvanter*, med en energi, der er proportional med lysets frekvens. Under elektronens kvantespring mellem Bohrs forskellige baner svarer forskellen i elektronens energi til energien i Plancks lyskvanter, så den samlede energi er bevaret. Frekvensen bestemmer lysets farve, og fx det orange lys fra motorvejenes gadelygter skyldes de mulige energier i elektronbanerne i grundstoffet natrium, mens elektronenergiene i grundstoffet neon fører til det karakteristiske røde lys i neonrør. Kvantespringene mellem bestemte elektronbaner forklarer altså de særlige farvespektre i lyset fra atomare gasser. De er et markant og uforklarligt brud med den klassiske fysiks beskrivelse af partiklers bevægelse.

Kvantemekanikken

Bohrs teori gav en præcis beskrivelse af lysspektret for brintatomer, men den fejlede for alle andre atomer, og det blev klart, at man måtte finde en ny og bedre teori for atomerne. Den teori fandt den østrigske fysiker Erwin Schrödinger i 1925. Han erstattede teorien om elektronernes baner med bølger, der svinger i rum og tid. Løsningerne til Schrödingers ligning kaldes *bølgefunktioner*.



Niels Bohr anno 1947. Foto: Niels Bohr Archive

SCHRÖDINGERS KAT

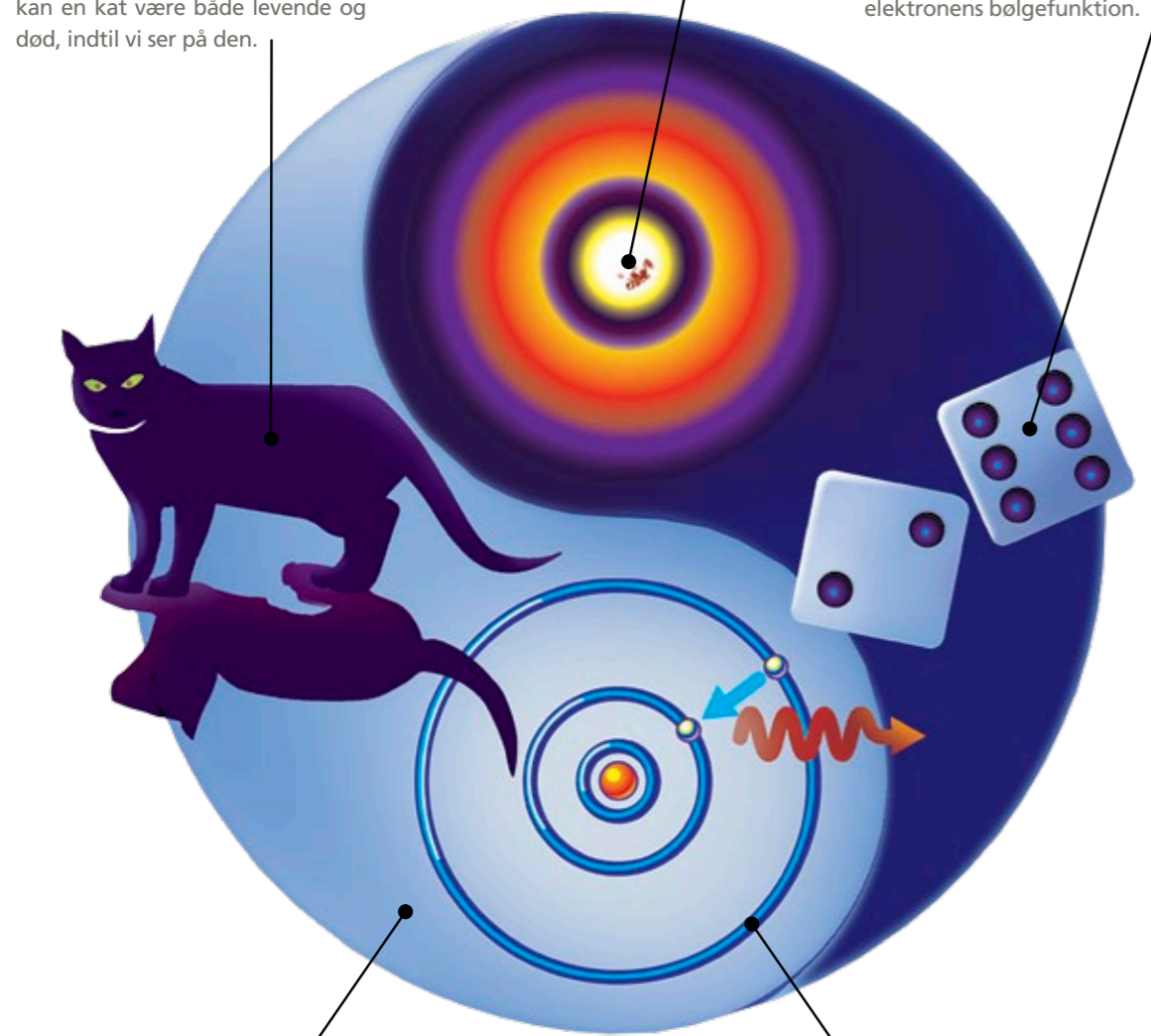
Kvantemekanikken beskriver den mikroskopiske elektron som en udstrakt bølge, indtil vi måler på den. Hvis den samme beskrivelse gælder i den makroskopiske verden, kan en kat være både levende og død, indtil vi ser på den.

SCHRÖDINGERS KVANTEMEKANIK

beskriver elektronen med en matematisk bølgefunktion. Bølgemønstrene svinger ved forskellige frekvenser og stemmer med frekvensen af det udsendte lys.

"GUD SPILLER TERNING"

I Bohrs atommodel sker springene og lysudsendelsen tilfældigt. I kvantemekanikken er resultater af målinger tilfældige, og måling af et lysglimt forårsager et spring i elektronens bølgefunktion.

**YIN OG YANG SYMBOLET**

repræsenterer dobbeltheden i den kvantemekaniske beskrivelse af stof som både partikler og bølger.

BOHRS ATOMMODEL

Elektronen følger klassiske "planetbaner" om atomkernen. Der udsendes lys, når elektronen foretager et kvantespring mellem banerne.

Grafik: Troels Marstrand. Tekst: Klaus Mølmer

De beskriver bølgemønstre med helt bestemte svingningsfrekvenser, ligesom strenge, trommeskind og luftsøjler i forskellige musikinstrumenter har bestemte svingningsmønstre med frekvenser, som bestemmer instrumenternes toner.

Da man inkluderede teorien for lys og stråling i Schrödingers ligning, fandt man, at bølgefunktionernes svingninger gradvist dæmpes, mens der udsendes lys med de observerede frekvenser – også for andre atomer end brint. Bohrs baner og kvantespring er således både utilstrækkelige og unødvendige for beskrivelsen af den atomare verden.

Schrödingers bølgebeskrivelse kaldes kvantemekanikken, og den er i dag det mikroskopiske grundlag for fysikken og kemien.

Schrödinger erstattede de klassiske partiklers bevægelse med bølger, men man udfører stadig forsøg, hvor partiklers position registreres, fx på en skærm eller en fotografisk film. Den tyske fysiker Max Born viste imidlertid, at de stedafhængige værdier af den matematiske bølgefunktion nøje angiver *sandsynligheden* for at opnå forskellige måleresultater. De fleste fysik- og kemiforsøg vedrører mange partikler, og sandsynlighedsbeskrivelsen er en fortrinlig måde at redegøre for hyppigheden og gennemsnittet af mange måleresultater. Albert Einstein var dog utilfreds med en beskrivelse af verden, hvor "Gud spiller terning", og man ikke kan forudsige det enkelte måleresultat. Bohr mente derimod, at de uforudsigelige resultater af målinger er udtryk for en fundamental begrænsning i vores evne til at udtale os om de mikroskopiske partiklers adfærd.

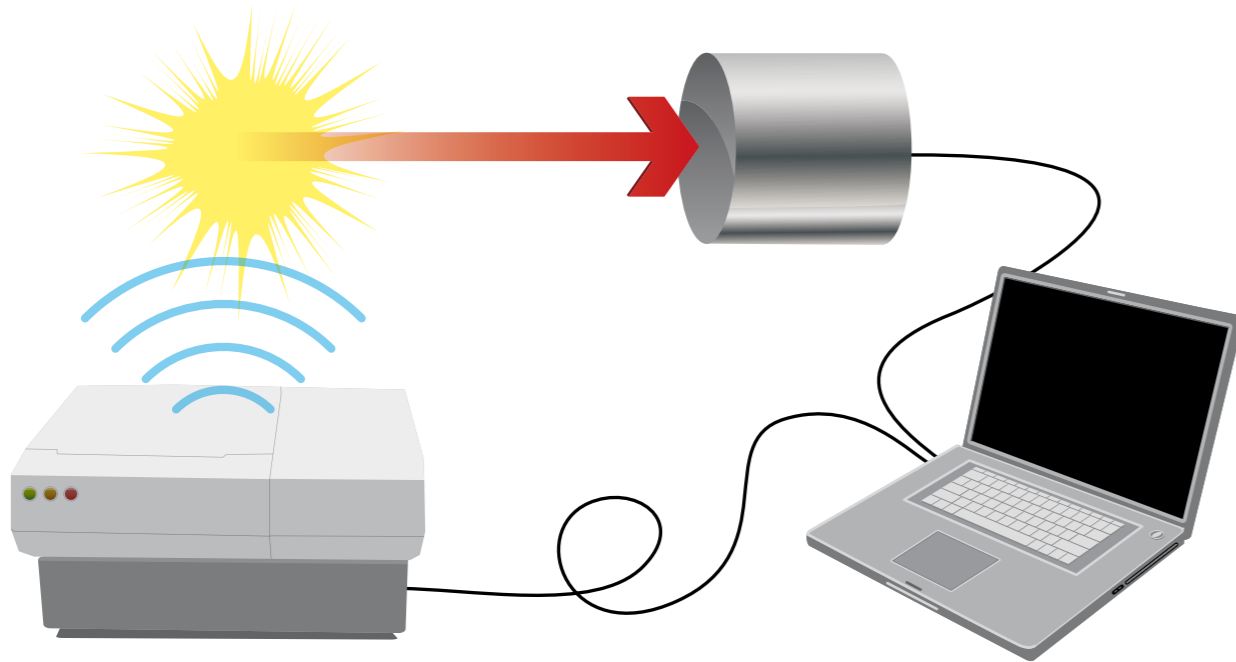
Kvantespring – fordi vi ser dem

Det er i dag muligt at studere et enkelt atoms opførsel og fx registrere det lys, atomet udsender, over længere tid. Kobler man en lysmåler til en højttaler, lyder der et klik ved registreringen af hvert enkelt lyskvant. Selvom vi kan beregne den gennemsnitlige hyppighed af disse klik med kvantemekanikken, er tidspunkterne for de enkelte klik tilfældige. Tilfældigheder forhindrer altså ikke en teoretisk beskrivelse. Men for at beregne atomets gennemsnitlige opførsel må man redegøre for bølgefunktionens form, afhængigt af om der til ethvert givet tidspunkt lyder et klik eller ej.

I de sidste årtier har vi såvel teoretisk som eksperimentelt vendt



Måling og feedback. Vi kan cykle uden at vælte, fordi vi kan registrere og korrigere cyklens bevægelser. (En kendt fysiker viser her hvordan.) Samme princip kan benyttes til at kontrollere atomers bevægelse – men her får målingerne ekstra konsekvenser, fordi de selv forårsager abrupte kvantespring i atomernes bølgefunktion. Foto: The Leo Baeck Institute's Photograph Collection



Et atomart kvantesystem styres ved hjælp af fysiske påvirkninger, som bestemmes af målinger på systemet. Kombinationen af feedback-påvirkningerne og de tilfældige kvantespring, som følger af målingerne, er en udfordring for den teoretiske fysik med mange anvendelsesmuligheder. Grafik: Klaus Mølmer

fokus imod den tilfældige opførsel i det enkelte eksperiment i stedet for den gennemsnitlige opførsel af mange eksperimenter. Kvantespringene er kommet tilbage, men med en ny betydning: I Bohrs beskrivelse sker elektronens kvantespring og lysudsendelsen, uanset om vi observerer det eller ej. I den kvantemekaniske beskrivelse er der en vis sandsynlighed for at detektere lyset, og hvis det sker, bliver det, der var en mulighed, til virkelighed, og Schrödingers bølgefunktion ændrer abrupt form som *konsekvens* af målingen. Kvantespringene sker, fordi vi ser lyset, og ikke omvendt.

To franske fysikere, Jean Dalibard og Yvan Castin, og denne artikels forfatter indførte i 1990-1992 en teoretisk beskrivelse, hvor vi lader som om, vi faktisk måler på lysudsendelse fra et atom og simulerer resultatet af de hypotetiske målinger ved at trække lod på en computer. Vi opkaldte metoden efter kasinoerne i Monte Carlo, og vores *Monte Carlo bølgefunktioner* følger Schrödingers ligning, men oplever tillige abrupte kvantespring

i bølgefunktionens form, når et tilfældigt detektorklik simuleres. Vi beviste, at Monte Carlo bølgefunktioner *i gennemsnit* giver eksakt samme resultat som de hidtidige metoder, som møjsommeligt holder styr på alle tilfældige muligheder. De enkelte Monte Carlo bølgefunktioner er meget lettere at beregne, og metoden tillader således en effektiv løsning af selv meget svære problemer.

Mens vi oprindeligt var interesserede i at simulere fysiske processer i atomare systemer og kun benyttede målingerne som et trick, var andre forskere på samme tid interesserede i netop at redegøre for faktiske måleserier. Monte Carlo metoden opstod inden for det samme år i tre forskellige forskningsmiljøer i Europa og USA. Metoden er i dag lærebogsmateriale, og den er løbende blevet videreudviklet og generaliseret til en bred vifte af fysiske problemer.

Kvantespring – en ressource

Når der registreres et klik, sker der abrupte kvantespring, hvor bølgefunktionen opnår nye former, som måske kun vanskeligt dannes med de naturlige kræfter, vi har til rådighed i laboratoriet. For eksempel er der udført eksperimenter, hvor lys detekteres fra to fjerne atomer, som begge er i energirige tilstande. Registreringen af et enkelt klik afgør ikke, om lyset kom fra det ene eller det andet atom, og de to atomer ender, som følge af klikket, i en såkaldt *entanglet kvantetilstand*, hvor det på samme tid er det ene og det andet atom, der har udsendt lyset, og derfor ikke længere er i den energirige tilstand.

Kvantespringenes abrupte og ikke-lokale dynamik er en af de mest effektive veje til at præparere entangled tilstande af atomer og lys, som er vigtige komponenter i præcise måleapparater, kommunikationsteknologier og kvantecomputere. Men måleresultaterne er tilfældige, og den ønskede tilstand opstår kun en gang imellem (når klikket har lydt).

Udnytter vi imidlertid den viden, vi opnår ved målingerne, kan vi med kontrollerede fysiske påvirkninger af systemet, fx med lys eller elektriske kræfter, til en vis grad ophæve tilfældighederne.

Årslegatet skal bruges til at udforske den dynamik, der fremkommer, når man kombinerer kvantespring med feedback – små puf bestemt af vores måleresultater. Denne forskning har potentialet til at åbne helt nye muligheder for kontrol og anvendelse af kvantesystemerne.

