

Kvantemekanikkens fortolkninger

Klaus Mølmer, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

Kvantemekanikken beskriver mikroskopiske legemers bevægelse med en bølgefunktion Ψ , som på samme tid antager større eller mindre talværdier alle steder i rummet. Alle fysikere er enige om, hvordan bølgefunktionen beregnes, og hvordan den med stor præcision kan forudsige sandsynligheder og middelværdier af udfaldet af målinger på mikroskopiske kvantesystemer. Men enigheden ophører, og der er en ekstrem variation i, hvad fysikere mener, vi kan sige om det, der faktisk foregår på den mikroskopiske skala.

Niels Bohr beskrev i 1913 brintatomet som en elektron i kredsløb om atomkernen i analogi med en planet i kredsløb om Solen. Ved kun at tillade bestemte baner kunne Bohr argumentere for, at atomet kan udsende og absorbere lys med bestemte frekvenser i processer, hvor elektronen foretager et kvantespring mellem disse baner. Niels Bohr var helt klar over denne beskrivelses fundamentale modstrid med kendt fysik og pegede selv på behovet for "med Tiden at bringe en vis Sammenhæng i de nyere Forestillinger". Da Bohrs metode til beregning af de tilladte baneenergier fejlede for heliumatomets to elektroner, var der under alle omstændigheder behov for udvikling af en ny og bedre teori.

I analogi med lyskvanter, som samtidigt er elektromagnetiske bølger, foreslog Louis de Broglie i 1924, at mikroskopiske partikler har bølgenatur. Lyskvantets (fotonens) energi er givet ved den optiske frekvens, $E = hf$, og dets impuls er givet ved bølgelængden, $p = h/\lambda$. Med samme relation for elektroner ville omkredsen af Bohrs baner netop svare til et helt antal bølgelængder, og i 1926 fandt Erwin Schrödingers en matematisk ligning for bølger, hvis løsninger udviste tidlige svingninger med frekvenser, der præcist svarede til Bohrs frekvensbetingelse for brintatomets lysudsendelse og -absorption.

I modsætning til lysbølger, som er løsninger til de kendte Maxwellligninger for elektriske og magnetiske felter, er Schrödingers bølgefunktion en rent matematisk konstruktion. Fysikeren Max Born viste dog kort efter Schrödingerligningens fremkomst, at den rumlige variation af bølgerne i en situation med kollisioner mellem ladede partikler svarede til den måde, en fordeling af klassiske partikler spredes i forskellige retninger ifølge Newtons love. Helt præcist er normkvadratet $|\psi|^2$ proportionalt med antallet af partikler, der spredes i de forskellige retninger (bølgefunktionen betegnes her med det græske bogstav ψ (udtales "psi"), og da ψ er en funktion med komplekse talværdier, skal vi bruge normkvadratet $|\psi|^2$ og ikke ψ^2). Denne teoretiske observation førte til det, vi kalder Borns regel: Hvis vi forudsætter, at integralet af normkvadratet af bølgefunktionen over hele rummet har værdien 1, er den lokale værdi af $|\psi|^2$ lig med sandsynlighedstætheden for, at en enkelt partikel findes netop der. Det gælder ikke kun partiklernes rumlige fordelinger, men også resultater af målinger af andre fysiske egenskaber (impuls, impulsmoment, kinetisk energi, ...) hvis fordelinger

og størrelser, som fx deres statistiske middelværdi og varians, kan forudsiges ved brug af bølgefunktionen og simple formler. Overalt i fysikken og kemien giver Schrödingers ligning og Borns regel resultater i fuld overensstemmelse med eksperimentelle undersøgelser.

Fra et teknisk og beregningsmæssigt synspunkt har vi altså en teori, der virker, men vi vil jo også gerne forstå den verden, vi lever i, og ikke bare have formler for den, og siden 1926 er fysikere kommet med mange forskellige bud på, hvordan kvantemekanikken og specielt bølgefunktionen skal fortolkes. Wikipedia-opslaget "Interpretations of quantum mechanics" opsummerer mange forskellige fortolkninger og diskuterer kort, hvordan de afviger fra hinanden – og endda indbyrdes inden for hver fortolkning. Ingen fortolkning er fri for åbenlyse mangler eller svagheder, men de byder alle ind med relevante spørgsmål og (meget forskellige) svar. I stedet for en gennemgang af alle fortolkningerne og deres principielle forskelle, vil denne artikel diskutere de mest udbredte fortolkninger med udgangspunkt i deres svar på de mest "naturlige" spørgsmål, man kan stille om kvantemekanikken. Selv hvis man ikke abonnerer på en given fortolknings svar på sådanne spørgsmål, eller at det overhovedet er vigtige spørgsmål, kan de måske påpege de svagheder, man let glemmer eller fortrænger ved sin egen foretrukne fortolkning. Og så kan de ofte bidrage med ny intuition og nye ideer til anvendelser og eksperimentelle undersøgelser.

Hvad siger formalismen – og hvad siger den ikke?

Det er et eksperimentelt faktum, at man ved målinger på systemer præpareret i samme kvantetilstand (med samme bølgefunktion), opnår resultater med sandsynligheder givet ved bølgefunktionen og Borns regel. Hverken teorien eller eksperimenterne viser, om de observerbare størrelser allerede havde én eller flere af de mulige værdier, før man målte dem, og heller ikke hvordan eller hvorfor en given observeret værdi blev foretrukket i det enkelte forsøg. Det forventede gennemsnit af mange målinger kan beregnes med en kompakt matematisk formel, som let fortrænger det faktum, at formelen er udledt direkte fra Borns regel, og at der blot er tale om en klassisk vægtet middelværdi af de mulige målresultater med de pågældende sandsynligheder – og ikke en værdi, som den fysiske størrelse "har", uanset om vi måler eller ej.

Det er måske fristende at opfatte elektronbølgefunktionen i brintatomet som en bogstaveligt udsmykket lad-

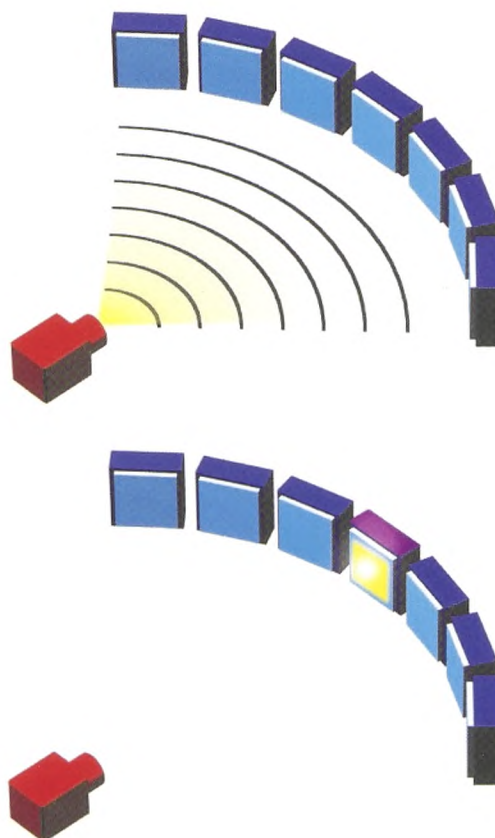
ningsfordeling, men for en ladningsfordeling ville den elektriske vekselvirkning med kernen have en bestemt værdi givet ved et integral over bidrag fra alle dele af fordelingen, mens den for en rumlig sandsynlighedsfordeling er karakteriseret ved en fordeling af mulige energier. Hvis bølgefunktionen og Borns sandsynlighedstæthed ikke må tages bogstaveligt som en fysisk størrelse, hvordan skal den så forstås? Albert Einstein forfægtede det synspunkt, at der måtte eksistere en mikroskopisk virkelighed, som måtte kunne beskrives med en måske mere kompliceret teori end kvantemekanikken, og Erwin Schrödinger blev i stigende grad så utilfreds med teorien, at han udtalte at han "fortrød at have haft noget med den at gøre". Einstein og Schrödingers kritik tog udgangspunkt i rigtig gode spørgsmål og tankeeksperimenter, og de pegede på muligheder og begrænsninger af kvantemekanikken på en så kreativ måde, at de i dag danner grundlaget for de mest subtile test af teorien og nogle af de mest spændende kvanteteknologier [1].

Niels Bohrs fortolkning

Niels Bohr indså, at det ville være en konsistent fortolkning, at kvantemekanikkens formalisme redegør for vores viden, udtrykt helt præcist som vores evne til at komme med forudsigelser af resultaterne ved målinger på systemet, mens man skal være varsom med – og helst undgå – at tro, at den direkte beskriver egenskaber ved det fysiske systems. Niels Bohr tog det som et empirisk faktum og et uomgængeligt grundvilkår ved den matematiske formalisme, at der er grænser for vores viden, og der derfor forekommer sandsynligheder og usikkerhed om måleresultater. Med udgangspunkt i hypotetiske eksperimenter diskuterede Bohr også, hvordan måleopstillinger kan sikre præcis viden om en egenskab, mens de i praksis udelukker samme grad af viden om andre, komplementære egenskaber. Man har både kritiseret Bohrs fortolkning af kvantemekanikken for at reducere teorien til de kvantitative resultater af teoriens formler og for at være filosofisk spekulativ og unødigt problematisere eksistensen af en uafhængig fysisk virkelighed. Men hans analyse er mere end et tilbagemag til formler og tal, og hans insisteren på at adskille vores viden og evne til at forudsige resultater aflæst af makroskopiske apparater fra ideen om et mikroskopisk systems egentlige opførsel opløser netop de paradoksale konsekvenser, der følger af en for bogstavelig opfattelse af bølgefunktionen som tilknyttet objekter i den fysiske verden.

Det er i dag muligt at udføre målinger på en partikel uden at ødelægge eller absorbere den, så man bagefter vil kunne foretage yderligere målinger af den samme eller andre egenskaber. Måler man den samme egenskab to gange hurtigt efter hinanden, vil man forvente samme resultat, og for at Borns regel skal gælde ved den anden måling, må der ved den første måling ske et kollaps af bølgefunktionen til en ny bølgefunktion, der giver sikkerhed for det næste (samme) måleresultat. For Bohrs fortolkning er disse kollaps af bølgefunktionen en proces, som ikke sker i den fysiske verden, men netop anerkender, at en bølgefunktion, som repræsen-

terer vores viden, øjeblikkeligt må antage værdien nul overalt i rummet undtagen der, hvor vi har detekteret en partikel. Som den tyske fysiker Werner Heisenberg formulerede det, sker der i målinger "en overgang fra det mulige til det virkelige" – ligesom det sker med klassiske sandsynligheder, når vi løfter et rafflebæger og alle de hidtil sandsynlige udfald bortfalder bortset fra det, vi faktisk ser. I dag kan man udføre hele målesekvenser på enkelte kvantesystemer, og de eksperimentelle resultater reproduceres netop med en teori, der inkluderer løbende ændringer af bølgefunktionen som følge af målinger [2].



Figur 1. En kvantemekanisk partikel på vej fra en kilde imod en række detektorer er beskrevet med en bølgefunktion skitseret med det viste ringmønster i den øverste figur. Der er kun tale om en enkelt partikel, og den nederste figur viser, at kun en enkelt detektor "klikker".

Bohrs fortolkning blev hjulpet på vej af vedvarende udfordringer fra Einstein, og især EPR-paradokset (efter Einstein, Podolsky og Rosen) i 1935. Flere partikler kan være beskrevet med en fælles, såkaldt entangled bølgefunktion, der kun er forskellig fra nul, hvis stedkoordinaterne for begge partikler har den samme afstand til et bestemt punkt, mens selve afstanden kan antage et bredt interval af værdier. Måler man den ene partikels position, ændrer bølgefunktionen sig straks for den anden partikel, så den kun kan blive detekteret i den samme afstand og ikke inden for dens oprindelige sandsynlighedsfordeling. Det var for Einstein svært at forlige sig med, da de to partikler på det tidspunkt kan være meget langt fra hinanden, og måske endda inde-sluttet i hver sit lukkede laboratorium, men kollapsedet af den fjerne partikels bølgefunktion er meget nemmere

at acceptere med Bohrs fortolkning af bølgefunktionen, som jo blot beskriver, hvordan eksperimentatoren efter den første måling ved, og derfor kan forudsige, hvilke resultater der nu er mulige for målingen på den anden partikel.

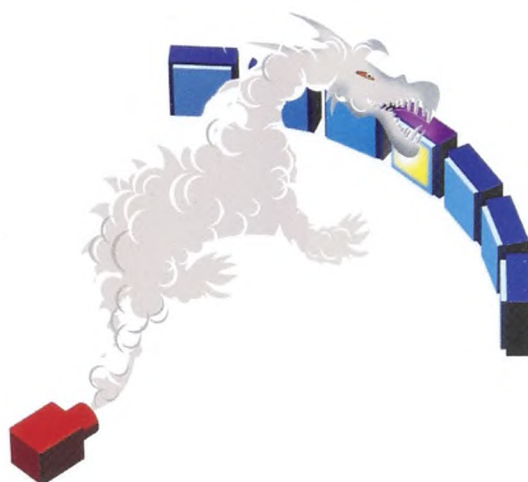
Niels Bohr levede i en tid, hvor kvantemekanikken tjente til at forklare og forudsige fysiske fænomener, og han argumenterede for sin fortolkning med fysiske og erkendelsesmæssige overvejelser over de praktiske og principielle grænser for vores viden. Moderne anvendelser af kvantefysik ved datatransmission og kryptering og ved kontrol med kvantetilstande i præcise sensorer og kvantecomputere har inspireret en ny og mere formel fortolkning ved navn QBism. QBism insisterer ligesom Bohr på, at formalismen vedrører vores viden i form af sandsynligheder for måleresultater, men QBism har mere fokus på rollen af det subjekt, der har (og skal bruge) den viden, og hvordan han eller hun opnår den. Niels Bohr forklarede, hvor godt man kan forudsige et måleresultat, mens det i QBism er helt naturligt, at to personer, Alice og Bob, med adgang til resultaterne fra forskellige tidligere målinger på samme system, har forskellig viden, og derfor bruger forskellige formler til at beskrive samme system. B'et i QBism står for Bayes regel, som siger, hvordan sandsynligheder opdateres, når man opnår gradvis viden om et fænomen, svarende til effekten af kollaps af bølgefunktionen, og det håndterer Alice og Bob altså med forskellige formler. Også før QBism fik sit navn, vidste vi naturligvis, hvordan man teoretisk redegør for vores viden om et kvantesystem under målinger og også, at resultatet er afhængigt af, om man får de korrekte måleresultater oplyst. På det punkt føjer QBism altså ikke meget til Bohrs fortolkning, men QBism samler de forskellige aspekter af teorien på en opdateret og mere systematisk måde, og QBism kan siges at have en mere markant betoning af viden som noget subjektivt.

Det er praktisk, minimalistisk og helt fri for en række paradokser at lade formalismen beskrive vores viden og ikke bekymre sig om, hvad der sker i virkeligheden. Men det kan forekomme unødvendigt verdensfjernt. Er det ikke muligt at klemme bare en smule fysisk virkelighed ind sammen med kvantemekanikkens formalisme? Lad os se på to oplagte muligheder: (1) partikler er lokaliserede og er faktisk lige der, hvor vi ser dem i eksperimenter – tilsyneladende tilfældige steder, men det er kun fordi, vi ikke ved, hvor de er. (2) fysiske objekter er bølger, der løser Schrödingers ligning, og i virkeligheden er flere steder på samme tid, ikke som udsurte ladnings- og massefordelinger, men som samtidige realisationer af at være både det ene og alle de andre steder.

De Brogle-Bohm-teori

Der er en forbløffende simpel måde at genindføre partikler i fortolkningen af bølgefunktionen. Louis de Broglie foreslog tidligt, at bølgefunktionen ikke er partiklen, men kan opfattes ligesom radarbølger, der afsøger et farvand og rådgiver kaptajnerne om, hvor de skal styre skibene hen. Schrödingers ligning kan omskrives til en såkaldt kontinuitetsligning, som viser,

at ændringer i lokale værdier af sandsynlighedstætheden $|\psi|^2$ fører til lokale strømtætheder, som kunne svare til en fordeling af partikler, der følger bestemte baner, ligesom de enkelte molekyler i en luftstrøm. Den teoretiske fysiker David Bohm genopdagede de Broglies ide, og udbyggede den i 1950'erne i modstand mod det, han opfattede som et "shut up and calculate" forbud mod at diskutere kvantemekanikkens fortolkning. Schrödingers ligning skal stadig løses for at beregne partikelbanernes form, men der er tale om en virkelig partikelbevægelse, og når vi måler en partikels position, ser vi altså bare, hvor den allerede er. Partiklerne er i deres baner udsat for både de mekaniske kræfter, som i den klassiske fysik, og en ekstra kvantekraft, der beregnes ud fra bølgefunktionen. Kvantekraften er svag for makroskopiske objekter, men i den mikroskopiske verden udgør den en vigtig korrektion til Newtons mekanik, der skaber interferensstriber og "løfter" partikler over potentialbarrierer ved tunneleffekten, så man opnår samme rumlige fordelinger af partikler som Schrödingers ligning forudsiger for $|\psi|^2$.



Figur 2. I Bohrs fortolkning er kvantemekanikkens formål ikke at beskrive mikroskopiske partiklers eller bølgers bevægelse, men måleapparats signaler – John Archibald Wheeler foreslog humoristisk, at det kunne være en røgdrage (smoky dragon), der får detektor til at "klikke".

Det er mange indvendinger imod Bohms partikelbaner: elektroner og de fleste atomkerner har en indre frihedsgrad, der hedder spin, som ikke har en naturlig banebeskrivelse, og entangled tilstande af flere partikler har så specielle baner, at de i højere grad forvirrer end forklarer den kvantemekaniske opførsel. For tilhængerne af Bohms baner er specielle korrelationer i Bohms baner, når de entangled partikler er langt fra hinanden, en acceptabel pris at betale for en beskrivelse, hvor måleresultater reflekterer en underliggende fysisk virkelighed. Hvad angår spin, har nogle tilhængere af Bohms baner det synspunkt, at kun stedkoordinater er virkelige fysiske egenskaber, og bølgefunktionens spin-frihedsgrader er derfor en del af de Broglies "radarbølge" og ikke af den mikroskopiske virkelighed. Den opfattelse passer med det berømte Stern-Gerlacheksperiment, der påviste kvantiseringen af spin uden at måle selve spinnets, men ved netop at detektere den

rumlige opsplitning af en atomar stråle på grund af vekselvirkningen mellem spinnet og et magnetfelt.

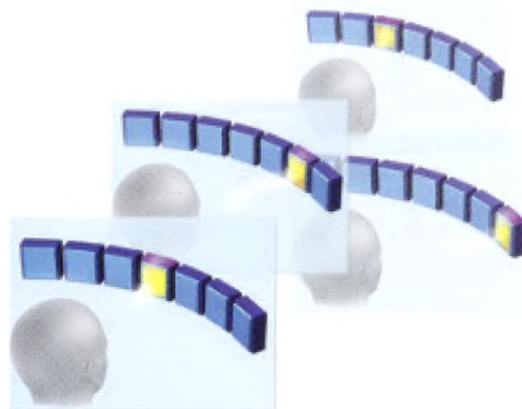
I et bachelorprojekt i min gruppe har vi vist, hvordan Bohm-banerne i Stern-Gerlach-magneterne perfekt reproducerer den kvantemekaniske forudsigelse af hvor mange partikler, der udsendes i hver retning for vilkårlige kvantetilstande af spinnet. Vi kunne også vise, at bølgefunktionen for to partikler i spin-entangled tilstande giver kvantekæfter, der dirigerer begge partiklers baner i retninger, der afhænger af begge magneter. Her blev det sjovt, for orienteringen af magneterne i laboratoriet bestemmer hvilken spinkoordinat, der afgør opsplitningen, og dermed måles i forsøget. John Bell viste i 1966 en matematisk ulighed, der altid gælder for korrelationer mellem par af målinger, hvis de målte resultater har givne (men ukendte) værdier, før de måles. David Bohm havde foreslået en analyse af EPR-paradokset for par af partikler med særlige spintilstande, og for dem forudsiger kvantemekanikken et brud med Bells ulighed, som er bekræftet i eksperimenter med fotoner. Ved valg af forskellige retninger for magneterne fordelte vores baner sig med eksakt samme fordelinger, som kvantemekanikkens forudsigelse. Selvom Bohm-banerne til alle tider repræsenterer partikler, der er bestemte steder, er deres bevægelse styret af den totale spin- og rumbølgefunktion, så begge partiklers baner afhænger vitterligt af den valgte orientering af begge magneter, og det er den mangel på lokalitet, der sikrer bruddet med Bells ulighed. At banerne opfører sig, som de gør, er naturligvis svært at forstå – Bohm kaldte det universets “indfoldede orden” – men Bohm giver i det mindste et bud på, at det er noget, der virkeligt sker.

Mange-verden-fortolkningen

Det er en ligeså naturlig tanke at gå den stik modsatte vej og insistere på, at bølgefunktionen er udtryk for, at mikroskopiske partikler er bølgefænomener ligesom lyd og lys. Den umiddelbare indvending imod en så bogstavelig forståelse af bølgefunktionen er, at vi aldrig ser partikler optræde flere steder på samme tid, men i 1957 foreslog amerikaneren Hugh Everett, at det gør vi måske alligevel – vi har bare ikke opdaget det. Det førte til den radikale mange-verdensfortolkning af kvantemekanikken.

I Everetts arbejde blev det ganske simpelt foreslået, at fysiksystemer virkeligt er flere steder på samme tid, og når vi måler på dem, bruger vi apparater, som også skal beskrives med kvantemekanikken, og derfor også kan være i rumligt udbredte tilstande. Vekselvirkningen mellem kvantesystem og måleapparat, får ikke viseren på måleapparatet til at vælge en tilfældig position, svarende til en tilfældigt målt talværdi efter Borns regel. Viseren vælger i stedet, ligesom de mikroskopiske partikler, alle tilgængelige værdier. Som eksperimentator kigger jeg på måleapparatet og, da jeg også er en del af kvantevirkeligheden, ser jeg ikke bare en værdi, men mange værdier, og min kollega, som står ved siden af, ser også mange værdier. Faktisk kan vi finde vores resultater så interessante, at vi vælger at følge op på dem i en lang række yderligere forsøg, sød musik opstår, og vi bliver gift og får børn, og samtidigt finder vi dem

så uinteressante, at vi i stedet skifter forskningsfelt og aldrig ses igen.



Figur 3. I mange-verdensfortolkningen opnås alle mulige måleresultater, da både de mikroskopiske partikler, måleapparaterne og vi selv er beskrevet ved bølgefunktioner, og kan være i flere tilstande på samme tid. Hver af disse tilstande udgør sin egen verden med tilsyneladende klassiske apparater, der registrerer et enkelt tilfældigt resultat.

Everetts indsigt var, at den samtidige realisering af disse vilde hændelsesforløb ikke er det fjerneste i modstrid med, at vi aldrig ser flere ting ske på samme tid i vores dagligdags oplevelse af verden. Everetts simple argument er, at bølgefunktionen ganske vist består af mange forskellige komponenter eller muligheder på samme tid, men ligesom i EPR-paradokset, hvor to entangled elektroner har deres bevægelse synkroniseret, er også måleapparatet, mine og min kollegas sanser og hukommelsesceller og vores computere og notater kvantemekaniske, og de er entangled med hinanden. Registreringen af et bestemt måleresultat er ledsaget af bestemte tilstande af apparatets komponenter, og når resultatet når min hjerne, kopieres det til flere hukommelsesceller, og de samme informationer registreres og kopieres måske hos min kollega, der iagttager samme apparat. Fordi vi alle er kvantemekaniske, og kan være i flere tilstande på samme tid, er det sådan, at den mange gange kopierede information måske nok antager forskellige værdier på samme tid, men sammenligner man min og min kollegas opfattelse, er vi helt enige om en værdi – og samtidig om en anden, og om en tredje og en fjerde. . . værdi – mens det ikke vil forekomme, at vi holder på forskellige værdier for den målte fysiske størrelse. I den verden, hvor jeg ikke blev gift med min kollega, skal vi heller ikke finde ud af at deles om børnene.

Beskrivelsen kaldes mange-verden-fortolkningen, fordi ikke kun et mikroskopisk system men næsten hele verden splittes op i parallelle underverdener med hver sin del, eller historie, af virkeligheden. Uden kommunikation mellem de forskellige verdener ser vores dagligdag helt almindelig og klassisk ud i hver underverden, og vi har ingen adgang til de andre parallelle verdener, hvor andre mulige resultater forekommer af kvantemålingerne. Og en lille bonus: alle muligheder forekommer i forskellige verdener, og ingen bliver derfor trukket ved en tilfældighed.

Der kan fremsættes flere indvendinger mod mange-verden fortolkningen. En er, at den er "dyr" i verdener, men den kvantemekaniske beskrivelse skal under alle omstændigheder håndtere flere mulige tilstande/steder for hver enkelt partikel, og ligesom elektronbølgefunktionen ikke beskriver flere elektroner, men en enkelt elektron flere steder, er der ikke tale om, at der skabes flere mennesker, Rundetårne og jordkloder, men om, at alt det, der allerede er i vores verden, kan være i flere tilstande på samme tid. Mange-verdensfortolkningen har et mere kvantitativt og praktisk problem, idet den ikke opererer med sandsynligheder, men lader alt ske, og derfor ikke umiddelbart kan forklare, hvorfor vores verden er "typisk", og har ladt os udføre forsøg og måle resultater, som er i overensstemmelse med Borns regel – det er jo på den baggrund, at vi i den af de parallelle verdener, hvor du læser denne artikel, synes det er vigtigt at diskutere kvanteteoriens kvantitative forudsigelser. Tilhængere af mange-verdensfortolkningen anerkender denne mangel ved teorien og har forskellige ideer om "light" versioner af teorien, der inkorporerer elementer af tilfældighed og sandsynligheder med en mere objektiv mening, end de har hos Bohr.

Dekohærens og spontant kollaps

Den måde, bølger udvikler sig over tid, gør, at bølgens amplitude ψ på flere steder i rummet til et tidspunkt kan bidrage til værdien på et enkelt sted til senere tider, idet de både kan forstærke og udslukke hinanden. Det kendes i optikken som diffraktion og interferens, og det samme sker med den kvantemekaniske bølgefunktion, hvor ikke kun sandsynlighedstætheden, $|\psi|^2$, men også den stedafhængige komplekse fase af ψ har betydning for den senere konstruktive eller destruktive interferens i mønsteret af detekterede partikler. Man kan sagtens inden for kvanteformalismen finde mekanismer, der udviser interferens. Fx vil vekselvirkning med andre kvantemekaniske partikler skabe forstyrrelser i de andre partiklers bølgefunktioner svarende til, at man får ubestemte faser af ψ . Det kaldes dekohærens, og er særligt udtalt for makroskopiske objekter, og det er en ukontroversiel del af forklaringen på, at vi ikke ser kvantefænomener i den klassiske fysik. Med Everetts sammenkobling af de mikroskopiske partikler og de makroskopiske detektorer og eksperimentatorer i store fælles kvantetilstande, er dekohærens med til at sikre, at de forskellige adskilte "verdener" ikke senere interfererer med hinanden, og derfor opleves hver verden som om, at de målte værdier er klassiske og velbestemte. Mens dekohærens af faser af ψ uden videre kan forklare, at vi ikke ser interferens, ændrer den ikke på sandsynlighedstætheden, $|\psi|^2$, og dekohærens løser ikke kvantemekanikkens egentlige måleproblem, idet den ikke forklarer, hvorfor vi registrerer bestemte, tilfældige måleresultater. Her er Everetts radikale svar, at det gør vi også kun tilsyneladende.

Som et forsøg på at forene en mikroskopisk kvante-verden, hvor bølgefunktionen repræsenterer noget fysisk, med den erfaring, at makroskopiske klassiske apparater kun måler tilfældige klassiske værdier, foreslog teoretikerne Ghirardi, Rimini og Weber i 1980'erne, at man kunne tilføje ekstra, tilfældige kræfter til Schrö-

dingers bølgeligning, som var så små, at de ikke ville få konsekvenser for elektroner eller de øvrige atomare partikler, men som ville føre til lokalisering af bølgefunktionerne, ligeså snart man indsætter måleapparaterne tungere objekter i ligningen. Schrödingers ligning indeholder allerede de fysisk kendte kræfter i form af den potentielle energifunktion, og på samme sted i ligningen er det muligt at tilføje svage tilfældige variationer i tid og rum. I forhold til Everetts mange verdener ville de tilfældige kræfter få måleapparatets viser til at lokaliseres tilfældigt på klassisk vis og dermed være skyld i det tilfældige måleresultat. Med den etablerede teori for målinger i kvantefysikken har vi faktisk også en teori for kontinuerte svage vekselvirkninger med måleapparater, hvor Borns regel, tilfældige måleresultater, og de små medfølgende kollaps af bølgefunktion fører til en lignende dynamik, men i stedet for at henvise til postulatet om fundamentalt tilfældige resultater af målinger og Bohrs fortolkning, fører en påstået ydre forstyrrelse altså til det samme resultat.

Hvem har ret?

Det har ikke været formålet med denne artikel at opstille en konkurrence og udpege en vinder blandt forskellige fortolkninger af kvantemekanikken. Niels Bohr fandt det, efter eget udsagn, hverken nyttigt eller nødvendigt at tale om det, der "virkeligt" sker i den mikroskopiske verden i form af en partikel- eller bølgeopførsel, så længe han bare kunne redegøre for de målte resultater. Dermed udelukker hans fortolkning ikke, at vi alle er del af Everetts større kvantetilstand, eller at alle partikler i virkeligheden følger Bohms baner. De forskellige fortolkninger kommer ikke med forskellige kvantitative forudsigelser, og deres relevans skal snarere bedømmes på, om "vi kan lide dem" – et vidunderligt subjektivt kriterium. Et århundredes lidenskabelige diskussioner er en fin påmindelse om, at fysikere også er mennesker.

Litteratur

- [1] C.K. Andersen og A.C.J. Wade (2013) Bohr vs. Einstein: Fortolkning af kvantemekanikken, Kvant, bind 24, nr. 1, side 27–31.
- [2] B. Juelsgaard og K. Mølmer (2013) Hundrede år efter Bohr: Nobelprisen for fysik under gennemsnittet, Kvant, bind 24, nr. 1, side 14–18.
- [3] K. Mølmer (2010) Kvantemekanik – Atomernes vilde verden, Aarhus Universitetsforlag.
- [4] en.wikipedia.org/wiki/Interpretations_of_quantum_mechanics



Klaus Mølmer er professor i fysik ved Aarhus Universitet og beskæftiger sig med kvanteoptik, teori for målinger i kvantemekanikken og anvendelser af kvantefysikkens særeste egenskaber i kvante-computere og kvantesensorer.