

Bohr vs. Einstein: Fortolkning af kvantemekanikken

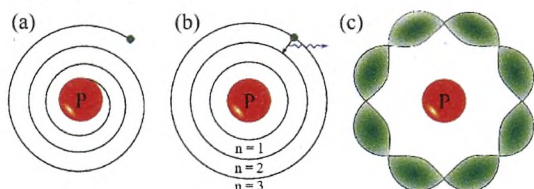
Af Christian Kraglund Andersen og Andrew C.J. Wade, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

Siden 1913, da Bohr fremlagde sin kvantemekaniske model for atomet, har fysikere diskuteret, hvordan kvantemekanikken skal fortolkes. Specielt aktive i denne diskussion var Bohr og Einstein, som havde modstridende opfattelser af, hvordan kvantemekanikken skulle forstås. Kan katte være både levende og døde på samme tid? Kan vi teleportere partikler mellem Månen og Jorden? Disse spørgsmål, og mange flere, forsøgte Bohr og Einstein at besvare, og det vil vi ligeledes i denne artikel.

Beskrivelsen af meget små ting

I starten af 1900-tallet beskæftigede en del fysikere sig med beskrivelsen af den atomare verden, det vil sige ting, der er på størrelse med et enkelt atom, ca. 0,000001 mm. Blandt disse fysikere var danske Niels Bohr, der i 1913 lavede en model for atomet, der bestod af en positivt elektrisk ladet kerne med negativt ladede elektroner kredsende herom.

Ideen byggede på en model lavet af newzealænderen Ernest Rutherford i 1909, som fik ideen til denne model fra målinger lavet af hans assistenter Geiger og Marsden [1]. Rutherford fastslog, at atomerne måtte have en positiv kerne, men ifølge klassisk elektromagnetisme ville denne form for atomer ikke kunne eksistere, da elektronerne ville falde ind i kernen. Bohr foreslog derfor, at elektronerne bevægede sig i baner med bestemte energier og kun kunne gå fra en bane til en anden ved udsendelse af en lysbølge med en veldefineret frekvens – det, der senere blev fortolket som et lyskvant, partikler af lys, som Einstein i 1905 havde brugt til at forklare den fotoelektriske effekt². Dermed postulerede Bohr en model, hvor atomer er stabile, og han kunne samtidig forklare, ved hvilke bølgelængder lys blev absorberet af brint.



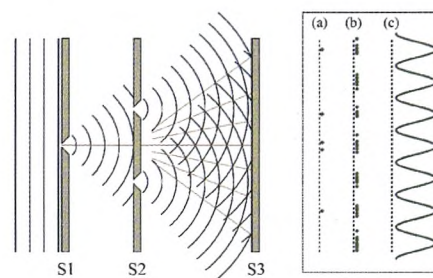
Figur 1. Modeller af atomet. I (a) ser vi, hvordan klassisk elektromagnetisme vil få atomet til at bryde sammen. I (b) ser vi hvordan Bohr rettede modellen, så den virkede, mens vi i (c) ser de Broglies fortolkning af Bohrs model.

Bohrs atommodel havde vidtrækkende konsekvenser. Einsteins oprindelige idé om, at lys kunne betragtes som partikler, selvom en bølgebeskrivelse af lys var velkendt på daværende tidspunkt, førte i 1924 franskmænd Louis de Broglie til at foreslå, at lys både kunne betragtes som bølger og partikler. Delvist inspireret af Bohrs model, foreslog de Broglie endvidere at alt, både lys og stof, kunne beskrives som værende både bølger og partikler. Vi ser dog ikke stof opføre sig som bølger til dagligt, da vi kun kan observere bølgeopførsel for enkelte partikler eller ved *meget* lav temperatur.

²Dette gav Einstein en Nobelpris i 1921.

³Ikke at forveksle med zombie-katte.

Ud fra denne hypotese fremlagde Erwin Schrödinger i 1926 en bølgeligning, som med præcision forudsiger, hvordan den atomare verden opfører sig. Men denne bølgebeskrivelse af stof førte straks til en større diskussion blandt datidens fysikere, specielt mellem Bohr og Einstein, om hvordan kvantemekanikken skulle fortolkes. Disse diskussioner danner selv i dag grundlaget for fortolkningen af kvantemekanikken. For hvis alting kan beskrives ved hjælp af bølger, kan man måske have katte, der både er døde og levende på samme tid³, og måske teleportere information mellem Jorden og Månen. Dette vil blive forklaret i denne artikel.



Figur 2. Illustration af dobbeltspalteeksperimentet som Bohr og Einstein diskuterede. En bølge bliver sendt ind og kun en lille del kommer igennem den første plade, S1. Ved den midterste plade, S2, ryger der en lille del gennem det øverste hul og en del gennem det nederste hul. Ved den sidste plade, S3, måler man intensiteten af bølgen. I (a-c) ser man, hvad der sker når enkeltpartikler sendes igennem, og vi ser ikke nogen bølgeegenskaber (interferens). Når vi sender flere partikler igennem, (b), så begynder der at komme et mønster, som tilsidst giver bølgemønstret i (c), svarende til at vi har sendt rigtig mange partikler igennem. Mønstret i (c) vil ikke fremkomme, hvis partiklerne ikke har bølgeegenskaber.

Dobbeltspalte-eksperimenter

En af de første slagmarker for fortolkningen af denne nye teori var det velkendte dobbeltspalteeksperiment. Dette eksperiment kommer oprindeligt fra klassisk bølgemekanik, men på grund af Bohr og Einsteins debat vedrørende dette eksperiment, er det selv i dag et grundlag for diskussioner om kvantemekanikken. Ved hjælp af Schrödingers bølgemekanik kunne fysikere forudsige præcist, hvordan bølger af lys eller stof ville opføre sig, når de blev sendt gennem de to spalter, men hvad

ville der ske, hvis man kun sendte én partikel igennem? Svaret blev givet, kort tid efter Schrödinger fremlagde sin ligning, af tyskeren Max Born, der postulerede en statistisk fortolkning af Schrödingers bølgemekanik.

Når man løser Schrödingers ligning, får man en bølgefunktion, $\psi(x, t)$, der afhænger af position x og tid t . Born foreslog, at når man lavede forsøg med enkelte partikler, vil normkvadratet på bølgefunktionen være sandsynligheden for at finde partiklen, dvs:

$$|\psi(x, t)|^2 = \text{Sandsynlighed i } x \text{ til tiden } t. \quad (1)$$

Nu skulle man tro, at alle var glade, da man havde svaret på, hvad der ville ske, hvis man sendte én partikel igennem de to spalter. Først ville partiklen opføre sig som en bølge og bevæge sig gennem begge spalter, og efterfølgende kan man måle den som en enkeltpartikel ved en tilfældig position x , hvor sandsynligheden for at finde partiklen her er givet ud fra $|\psi|^2$. Vi kalder $|\psi|^2$ for sandsynlighedstætheden, og dette giver et bølgelignende interferensmønster – dette mønster ville kun fremkomme, hvis stof opførte sig som bølger, når det gik gennem de to spalter.

Borns forslag blev selvfølgelig testet og man så, at hvis man sendte enkelte partikler igennem de to spalter én af gangen, så ville de til sidst skabe et mønster svarende til, at man sendte en bølge gennem de to spalter. Alt giver med andre ord mening. Næsten...

Albert Einstein var en mand med stærke holdninger, og han kunne ikke lide forklaringen givet af Born. Først og fremmest kunne han ikke lide, at det var "tilfældigt", hvor partiklen dukkede op. For det andet kunne han ikke lide, at partiklen først var en bølge og derefter en partikel.

Niels Bohr kunne dog godt lide denne fortolkning af kvantemekanikken og mente, at bølgefunktionen var en fin beskrivelse af kvantemekaniske fænomener. Målinger derimod skulle beskrives ved hjælp af klassiske begreber som bølger og partikler, og i en enkelt måling ville man ikke kunne se både bølge- og partikelopførsel. I 1927 skrev Bohr bl.a. følgende til Einstein⁴:

... Denne vigtige pointe medfører, at det er umuligt at skelne skarpt mellem atomare objekter og deres vekselvirkning med et instrument, der søger at definere de betingelser, hvorunder fænomenet finder sted. Konsekvensen heraf er, at målinger opnået under forskellige betingelser ikke kan forstås inden for et enkelt forsøg, men skal betragtes *komplementært* i den forstand, at kun summen af hele fænomenet giver den mulige information af objektet.

Bohrs idé var med andre ord, at ville man opnå den fulde information om f.eks. en elektron⁵, så skulle man gennemføre komplementære, det vil sige indbyrdes forskellige og hinanden udelukkende, forsøg. Derfor er

et lyskvant en partikel, når vi laver et eksperiment, der kigger på den som en partikel, og en bølge, når vi laver eksperimenter, der måler på den som en bølge.

Matematisk følger dette af tyskeren Werner Heisenbergs usikkerhedsprincip, der siger, at der i et enkelt eksperiment er en grænse for, hvor godt vi kan kende både en partikels sted og impuls (eller bevægelsesmængde). Mere kvantitativt viste Heisenberg, at hvis Δx er usikkerheden i position og Δp er usikkerheden i impuls, har vi:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}, \quad (2)$$

hvor $\hbar$ kaldes Plancks konstant, og er en meget lille størrelse, der dog er stor nok til at have betydning for meget små objekter.

Einstein foreslog, i et forsøg på at modbevise dette, at man lavede et eksperiment som vist i figur 2. Når en partikel kommer gennem den første plade, vil denne plade flytte sig en lille smule, da der *skal* være bevarelse af impuls. Hvis man måler denne flytning ultra-præcist, så argumenterede Einstein for, at man herudfra ville vide om partiklen gik opad eller nedad, og herfra kan man bestemme hvilken spalte, ens partikel gik igennem, hvilket vil medføre partikelopførsel. Einstein argumenterede dernæst, at dette ikke vil ændre på, hvordan partiklen rammer den sidste skærm. Gentages forsøget derfor mange gange, vil man, for hvert forsøg kunne se hvilken vej, partiklen tog, og efterfølgende ende med det mønster, som Bohr før forklarede med, at partiklen gik igennem begge spalter som en bølge.

Bohr lod sig dog ikke snyde og argumenterede straks, at hvis man kendte impulsen af den første skærm perfekt, så kan man ikke kende dens position. Dette betyder, at der for hver mulig position vil blive dannet et bølgemønster, så vi får en masse bølgemønstre oven i hinanden, hvilket blot giver resultater, som var det enkelte partikler uden bølgeegenskaber, vi sendte igennem. Dette argument beviser, at kvantemekanikken giver konsistente resultater, og Bohr vandt derfor denne første runde af kampen mellem Bohr og Einstein. Ét lille men er dog, at man i dag ved hjælp af såkaldte "svage målinger"⁶ rent faktisk godt kan bestemme, hvor partiklen *sandsynligvis* var mellem dobbeltspalten og den endelige skærm. Dette ændrer dog ikke ved, at Einstein tog fejl, men om Bohrs fortolkning er korrekt eller ej, er et helt andet spørgsmål, og er selv i dag til debat.

Kaster Gud med terninger?

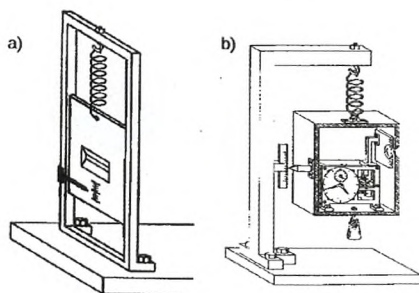
Så Bohr vandt, men Einstein nægtede at give op. Efter sit nederlag ved dobbeltspalteeksperimentet forsøgte Einstein adskillige mere og mere sofistikerede og briljante tankeeksperimenter (se f.eks. figur 3 fra 1930) i håbet om at finde en modstrid i Bohrs fortolkning af kvantemekanikken. Selvom Bohr til tider måtte arbejde hårdt for at modbevise Einstein, så endte Bohr med at vinde hver gang.

⁴Oversat af forfatterne.

⁵Her menes forskellige, men identisk fremstillede, elektroner.

⁶Begrebet "svage målinger" stammer fra Y. Aharonov i 1988 [5].

Einstein accepterede derfor, at Bohr nok havde ret – til en vis grad. Einstein gjorde et stort nummer ud af at understrege at, ja, der var et usikkerhedsprincip, men dette princip var kun af praktisk betydning og ikke den fulde sandhed. Borns statistiske fortolkning gjorde stadig Einstein utryg, og Einstein insisterede på, at kvantemekaniske sandsynligheder var et spørgsmål om viden og ikke et spørgsmål om grundlæggende ”sandhed” i naturen. Det vil sige, at usikkerheder og sandsynligheder kun kommer fra praktiske forsøg. Teoretisk set vil der ikke være usikkerheder og sandsynligheder på et fundamentalt niveau – ”Gud kaster *ikke* med terninger”⁷. Derfor mente Einstein, at kvantemekanikken nødvendigvis måtte være en utilstrækkelig beskrivelse af virkeligheden.



Figur 3. a) Forsøgsopstilling der kan måle, hvilken vej en plade bevæger sig. Det, at man kan måle bevægelsen af pladen medfører, at pladen ikke har en veldefineret position, hvilket ødelægger bølgemønstret fra figur 2.

b) Tegning der viser Einsteins boks, anvendt af Niels Bohr i 1930. Einstein forsøgte her at argumentere for, at når lys blev sendt ud af kassen, så kunne man veje kassen og dermed finde ud af energien af partiklen, samtidig med man kunne måle, hvornår den blev udsendt. Dette burde være forbudt, ifølge kvantemekanikken, og ud fra figuren overbeviste Bohr resten af verdens fysikere om, at sådan var det også.

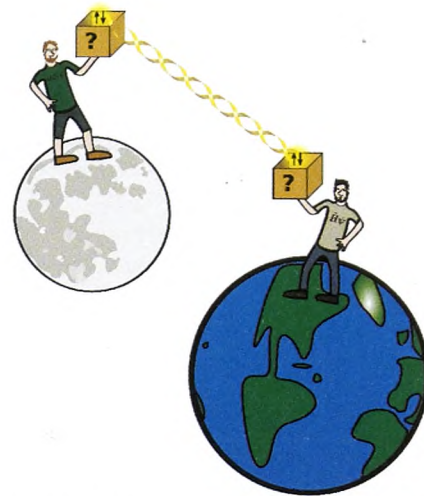
Med udgangspunkt i dette synspunkt formulerede Einstein grundlaget for det, der i dag kaldes ”skjulte variable”, det vil sige, at en partikel *har* både veldefineret position og impuls, selvom vi ikke kan se, hvad de er. Konsekvenserne af dette rækker ret vidt. Sandsynligvis også mere vidtrækkende end Einstein oprindeligt havde forestillet sig. Vi ved f.eks. i dag, at under bestemte betingelser vil de ”skjulte variable” i en ”skjult variabel”-teori nødvendigvis afhænge af, hvad man måler på systemet — med andre ord, så svarer det til, at nogle ting kunne være enten grønne eller røde, afhængig af om vi kigger på dem fra højre eller venstre [2]. Et andet eksempel vil blive gennemgået i næste afsnit.

Sammenfiltring

Det næste springende punkt i debatten mellem Bohr og Einstein kom i 1935. Her fremlagde Einstein et paradoks sammen med russeren Boris Podolsky og den amerikansk-israelske Nathan Rosen, der i daglig tale blot kaldes EPR-paradokset.

⁷Citat af Einstein fra 1926 i et brev til Born.

⁸Følgende version er en omformulering af EPRs oprindelige forslag lavet af D.J. Bohm og Y. Aharonov i 1957.



Figur 4. Vi har et EPR-par (to partikler i en EPR tilstand). Den ene partikel er på Jorden og den anden på Månen. Man kan ved at måle på partiklen på Jorden vide, hvilken vej partiklen på Månen peger, så hvis vi målte en af partiklerne til at pege op, vil den anden pege ned. Ifølge Einstein vil målingen på den første partikel have ændret på den anden partikel. Bohr mente dog, at før vi målte, kunne vi ikke sige om partiklen pegede op eller ned, så derfor ændrede vi ikke på den anden partikel.

Dette paradoks bygger på to antagelser. For det første antog Einstein, Podolsky og Rosen (EPR), at der findes ”elementer af fysisk virkelighed”, hvilket blot betyder, at hvis vi ser noget pege til højre, så vil det pege til højre både lige før, mens og lige efter, at vi kiggede på det. Det vil sige, at der eksisterer fysiske egenskaber uafhængig af målingen. Den anden antagelse bygger på princippet om lokalitet. Det vil sige, at hvis vi ændrer på et system, vi har i hånden, så vil det ikke med det samme ændre de fysiske egenskaber af et system på Månen (eller nogle andre steder).

Begge disse antagelser lyder meget tilforladelige, men EPR viste, at, givet et bestemt fysisk system, gav kvantemekanikken forudsigelser, der ikke stemte overens med disse antagelser. Resultatet blev publiceret i en artikel under overskriften ”Kan en kvantemekanisk beskrivelse af den fysiske virkelighed betragtes som fuldstændig?” [3], og i artiklen argumenterede EPR for, at svaret på dette spørgsmål er ”nej”. Vi vil nu gennemgå EPRs argument⁸.

Før vi forklarer mere, bliver vi dog nødt til at introducere begrebet *superposition*, der kort fortalt betyder, at partikler kan være i to forskellige tilstande på én gang. Det betyder f.eks., at vi har en mønt der både er plad og krone på én og samme tid. Det er i virkeligheden ikke så mærkeligt, som det lyder, for det er præcis det samme, der gør sig gældende i dobbeltspalteeksperimentet, når partiklen tog begge veje på én og samme tid.

Forestil dig nu to partikler, der hver kan være i to tilstande, op ($|\uparrow\rangle$) og ned ($|\downarrow\rangle$). Det svarer igen til f.eks. en mønt, der kan være plad eller krone. De to partikler beskrives nu i den kvantemekaniske tilstand:

$$|\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 + |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2. \quad (3)$$

Vi vælger her at have enten den ene partikel til at pege op og den anden til at pege ned eller også det modsatte. Tricket er nu, at vi vælger vores partikler til at være en superposition af disse to muligheder, så vi har begge på samme tid.

I dobbeltspalteforsøget havde vi som sagt en superposition af en partikel, der bevægede sig gennem begge spalter, men efterfølgende kunne man kun måle partiklen ét sted. Det samme princip gør sig gældende i EPR-forsøget. Hvis vi måler på den ene partikel, så vil vi finde den til enten at pege op eller ned. Men på grund af den specielle tilstand, vi har, så ved vi, at hvis den første partikel peger op, så må den anden partikel pege ned. Det samme gør sig gældende den anden vej rundt. Ifølge Born og Bohrs fortolkning så vil en måling på den ene partikel give enten op eller ned, og derfor ved vi *med det samme* hvilken vej den anden partikel peger, så vi har her ændret på *den kvantemekaniske tilstand* af partiklerne. Vi siger, at partiklerne er sammenfiltret. EPR antog nu, at den ene partikel var på Månen og den anden partikel her på Jorden. Ved at måle på partiklen her på Jorden mente EPR derfor, at de rent faktisk ændrede på *de fysiske egenskaber* af partiklen på Månen, hvilket strider imod antagelsen om lokalitet. Det vil sige, at vi ifølge Bohrs kvantemekanik kan bryde EPRs antagelser, ergo ifølge EPR må kvantemekanikken være forkert.

Modsvaret fra Bohr kom fem måneder senere i en artikel i samme tidsskrift med samme navn. Her angreb Bohr specielt EPRs antagelse om, at der måtte være elementer af fysisk virkelighed, men selve antagelsen om lokalitet åbnede Bohr op for måske ikke var gyldig. Dette førte Bohr til at konkludere, at EPRs argumenter "ikke retfærdiggør deres konklusion om, at en kvantemekanisk beskrivelse nødvendigvis fører til ufuldstændighed". Desuden skriver Bohr også, at nøglen til problemet ligger i EPRs behandling af måleprocessen, og i dag bliver målingsproblemet betragtet som et nøglepunkt i debatten om fortolkningen af kvantemekanikken.

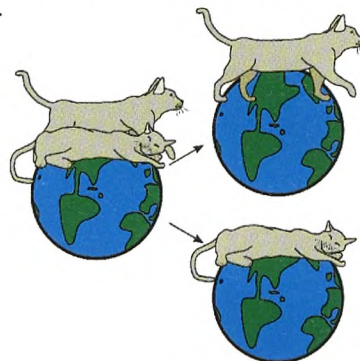
Efter Bohrs svar stagnerede debatten mellem Bohr og Einstein, og den generelle opfattelse var, at Bohr havde vundet, men ikke alle var tilfredse. En af de fysikere, der ikke var tilfreds, var den irske fysiker John Bell, der i 1964 fremlagde en simpel ulighed på baggrund af EPRs antagelse. Hvis man kan lave et forsøg, der brød Bells ulighed, så må mindst én af EPRs antagelser være forkerte. Er dette lykkedes? Ja! Første gang, et eksperiment påviste brud på Bells ulighed var i 1972 og så igen 1981 og siden mange gange. Uheldigvis var både Einstein og Bohr døde i 1972, så hvordan de ville reagere på dette, er også et åbent spørgsmål.

En af konsekvenserne er derfor nu, at man ikke kan have både lokalitet og elementer af fysisk virkelighed. Bohrs svar var som sagt primært, at vi ikke har en fysisk virkelighed. Vi kan med andre ord spørge "Hvilken vej pegede partiklen før vi målte?". Til dette vil Bohr svare at den pegede ikke nogen vej, hvilket for nogen

er et højst utilfredsstillende svar. Problemet er, at hvis man gerne vil have elementer af fysisk realitet, så vil det, at vi ændrer på partiklen her på Jorden, ændre på partiklen på Månen, hvilket for mange vil være meget mere uacceptabelt.

Målinger

Selvom mange anså Einsteins argumenter som skudt ned af Bohr, så formåede Bohr aldrig at svare fyldestgørende på spørgsmålet om målingers betydning i kvantemekanikken. Ifølge Bohr skulle kvantemekanikken kun bruges, når en kvantemekanisk beskrivelse var passende, hvilket vil sige for meget små systemer. Målinger skulle, ifølge Bohr, kun bruges til at oversætte kvantemekanik til klassiske begreber, som vi kan forholde os til.



Figur 5. Hvad sker der med en kat, der er i en superposition af at være død og levende? Ifølge Københavnerfortolkningen vil en måling tilfældigt vælge enten en verden med en død kat eller en verden med en levende kat. I mangeverdensfortolkningen sker begge dele, så vi har to verdener.

Denne forklaring er dog på mange måder ikke tilfredsstillende, for hvor går grænsen for, hvornår noget er småt, og hvornår noget er stort? Et af de mest illustrative eksempler på denne problemstilling blev fremlagt af Schrödinger i 1935. Schrödinger foreslog, at man tog en kasse. Inde i denne kasse placerede man så en kat, og et radioaktivt atom, og en Geigertæller, og så noget blåsyre⁹. Herefter kan man lave et system, så en måling af et radioaktivt henfald vil udsende blåsyren i kassen. Efter et kort stykke tid vil det radioaktive atom være i en superposition mellem at have udsendt radioaktiv stråling eller ej. Det betyder, at Geigertælleren efterfølgende vil være i en superposition af at have målt et radioaktivt henfald eller ej. Nu vil blåsyren så være i en superposition af at være udsendt eller ej. Til sidst vil katten så enten indånde gassen eller ej, dvs vi har en kat i en superposition mellem at være levende og død:

$$|\text{Kat}\rangle = |\text{Levende}\rangle + |\text{Død}\rangle. \quad (4)$$

Rent faktisk vil det hele være en superposition af, at enten er det hele sket, eller også er intet sket. Katten ville derfor være både levende og død på én og samme tid, på samme måde som en partikel i dobbeltspalteeksperimentet tog begge veje på én og samme tid. Dette kaldte Schrödinger selv for en latterlig tanke.

Bohr anså, som nævnt, denne problematik for mindre relevant. En kat er et stort system og derfor skal

⁹En meget lille mængde blåsyre kan dræbe en kat på ganske få minutter.

det ikke beskrives ved hjælp af kvantemekanik. Bohrs fortolkning, kendt som Københavnerfortolkningen, postulerer at når vi går fra små systemer til store systemer, så vil det store system måle på det mindre og så skal vi kollapse bølgefunktionen, dvs. vi skal tilfældigt finde ud af, om katten er død eller levende. For Bohr var en Geigertæller et stort nok system til at kollapse bølgefunktionen. Andre variationer af Bohrs fortolkning siger dog, at katten rent faktisk er både levende og død, men når kassen åbnes, så kolliderer bølgefunktionen, og vi ser enten en død eller levende kat.

Man kan også gradbøje Bohrs fortolkning, så kollapsedet sker som en naturlig proces og ikke som en tilfældig begivenhed, når et stort system måler på et mindre. Dette kan udtrykkes som, at katten måler på sig selv. Dette kaldes for objektiv kollapsesteori, men selvom ideen kan lyde tiltalende, så er der ingen eksperimentel indikation af, at denne form for proces skulle finde sted, ligesom der heller ikke er noget, der taler imod det.

Endelig vil nogle foreslå det, der populært kaldes for mange-verdensfortolkningen. Denne fortolkning går i sin enkelthed ud på, at man ignorerer spørgsmålet om, hvornår man måler. Målinger finder med andre ord ikke sted. I stedet sker der det, at når en person kigger ind i kassen, så vil han enten se en død eller levende kat, og efterfølgende vil personen være i en superposition af at have set en død kat og af at have set en levende kat. Fortsætter man denne kæde af observatører, vil man til slut ende med hele universet i en superposition af at indeholde en død kat og indeholde en levende kat. Med andre ord har vi nu to universer.

Denne fortolkning er meget kontroversiel, men det kan ses som den mest "naturlige" udvidelse af den kvantematiske formalisme. Mange fysikere holder sig derfor til Bohrs fortolkning, men den efterlader selvfølgelig det åbne spørgsmål om, hvornår man laver målinger, og hvornår man laver nye kvantemekaniske superpositioner? Et spørgsmål vi selv ikke i dag kan svare på, men der er folk, der aktivt prøver på det.

Fra dengang til nu

Det er som sagt muligt at fortolke kvantemekanikken på mange måder, men Bohrs Københavnerfortolkning er traditionelt set den mest populære fortolkning¹⁰, hvilket betyder, at målinger, dvs. kollapse af bølgefunktionen, spiller en essentiel rolle for nutidens kvantefysikere. Det betyder også, at fysikere har fundet på mange spændende måder at udnytte målinger på.

Et af de mest spændende forsøg, der udnytter målingens natur i kvantemekanikken, er såkaldt kvanteteleportation. Her udnytter man et EPR-lignende system ikke bare til at vide, om den anden person har en partikel, der peger op eller ned, men i stedet til at teleportere præcis den kvantemekaniske information af sted man har lyst til. Det kan lyde som science-fiction, men det er faktisk lykkedes at lave kvanteteleportation

i virkeligheden [4]. Så vi kan have en partikel, som vi måler på. Dette kolliderer som bekendt bølgefunktionen for partiklen, dvs. vi har ødelagt vores kvantetilstand, men under de rigtige EPR-lignende betingelser kan man gøre således, at partiklens information dukker op et andet sted. Vi har med andre ord effektivt teleporteret partiklen! Betyder det så, at man kan sende ting hurtigere end lysets hastighed? Nej, desværre ikke. Kvanteteleportation virker kun, hvis man foruden sit EPR-system sender et helt normalt elektrisk signal ved siden af, der som bekendt ikke bevæger sig hurtigere end lyset.

Andre forsøg, der prøver at udfordre vores fortolkning af kvantemekanikken, går efter at lave så store Schrödingers kat-tilstande som muligt¹¹. Indtil videre er det ikke lykkedes folk at finde en veldefineret grænse mellem kvantemekanik og klassisk mekanik, men alle eksperimenter kan alligevel nemt forstås inden for Bohrs fortolkning, mens Einsteins ideer ikke holder i længden. Derfor kan man slutte, at Bohr var vinderen af kampen mellem Bohr og Einstein.

Litteratur

- [1] Helge Kragh (2011), Opdagelsen af atomkernen: Et 100-årsjubilæum. KVANT nr. 2, april 2011.
- [2] N. David Mermin (1993), Hidden variables and the two theorems of John Bell. *Rev. Mod. Phys.* **65**, 803-815.
- [3] A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen (1935), Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete? *Phys. Rev.* **47**, 777-780
- [4] Spooky action and beyond. Interview med Anton Zeilinger, www.signandsight.com/features/614.html
- [5] Y. Aharonov, D.Z. Albert, L. Vaidman (1988), How the result of a measurement of a component of the spin of a spin-1/2 particle can turn out to be 100. *Physical Review Letters* **60**, 1351-1354.



Andrew C.J. Wade er fra New Zealand og er ph.d.-studerende ved Aarhus Universitet og forsker i teoretisk kvantemekanik med kolde gasser.



Christian Kraglund Andersen er ph.d.-studerende ved Aarhus Universitet og beskæftiger sig med teoretisk kvantemekanik implementeret i faststofsyste-mer.

¹⁰Murray Gell-Mann hævder, at Mangeverdenfortolkningen er mere populær i USA, blandt kosmologer og kvantefeltteoretikere.

¹¹Læs artiklen af Brian Julsgaard og Klaus Mølmer i nærværende blad for flere detaljer om dette emne.