

De troende og de alvorlige – to fortolkninger af kvantemekanik

Af

HENRIK DAHL

Henrik Dahl læser fysik og matematik på Københavns Universitet.

Email: hdahl@tdc-broadband.dk

Introduktion

Denne indlæg er motiveret af et citat af Bob Wald: ”Hvis man virkelig tror på kvantemekanik, så kan man ikke tage den alvorligt”¹. Citatet lægger op til en inddeling i to holdninger til kvantemekanik - herefter QM - nemlig på den ene side dem, der tror på teorien, og på den anden side dem, der tager den alvorligt.

I klassisk fysik, er der ingen grund til en sådan sondring. Selv om vi ikke præcist ved, hvad en kraft eller et felt eller energi er, volder det kun sjældent kvaler at overbevise sig om, at sådanne størrelser er virkelige, kan beskrives og manipuleres og skal tages alvorligt.

Inden for QM er situationen anderledes. Der er på den ene side tale om så små systemer, at vi ikke uden videre kan blive fortrolige med dem. På den anden side er mange af teoriens resultater så sære, at de intuitivt er nærmest latterlige. Men QM virker, så man tvinges til at acceptere de sære resultater.

Spørgsmålet er bare hvilken form for accept, der er tale om. Den ene mulighed er, at man opfatter QM som et redskab, der virker, men hvor

¹[1]. Her som overalt i det følgende er oversættelserne foretaget af mig selv. Indlægget er i øvrigt baseret på min opgave i NatF.

begreberne ikke tillægges nogen ægte virkelighed. De er bare bekvemme konstruktioner, der tillader os at komme frem til de rigtige resultater. I Wald-citatet er denne fortolkning repræsenteret ved de *troende*, som bl.a. omfatter Feynman [8], [9] og Hawking [10]. Alternativet er, at man tager teorien *alvorligt*, dvs. accepterer, at de fænomener der beskrives, er virkelige, ikke bare i deres endelige eksperimentelle manifestation, men også i den latente form, de iflg. teorien har. En central repræsentant for denne holdning er Penrose [1], [6], [7].

Disse filosofiske spørgsmål berøres næppe i undervisningen i QM. F.eks. sagde A.D.Jackson ved indledningsforelæsningsen til fysik 22, at vi studerende lige så godt på forhånd kunne glemme at forstå QM. Vi skulle bare acceptere den og lære den. Dernæst blev vi præsenteret for teoriens postulater i form af udsagn som ”Enhver observerbar størrelse har en tilknyttet operator”, etc. Efter forskellige lærebøger cf. [2], [3], [4], [5], at dømme vist nok en ret almindelig indgang til, hvordan teorien kan læres. Jeg synes, det er en skam, at de filosofiske aspekter forbigås, for jeg tror, at de kunne være med til at gøre teorien mere spændende og levende, og derved perspektivere den matematiske formalisme.

I det følgende vil først kort nævne nogle af de sære fænomener, QM kan forklare, og så belyse de to fortolkninger af QM. Som tredje punkt vil jeg kort diskutere, hvad der adskiller QM fra klassisk fysik, et spørgsmål, det tilsyneladende ikke er helt let at få et svar på, men som kan være med til kaste lys over, hvorfor vi har så divergerende holdninger til teorien. Derefter bruges tankeeksperimentet om Schrödingers kat som illustration af de to fortolkninger. Endelig forsøger jeg at konkludere. Mit hovedsynspunkt - som vist vil skinne igennem hele vejen - er, at mens den troende holdning nok repræsenterer en videnskabeligt produktiv vinkel, så er den alvorlige holdning mere interessant.

Kvantemekaniske resultater

Vi kender vel alle nogle af de sære fænomener, der kan forklares af QM:

- Bølge-partikel-dualiteten: Er lys bølger eller partikler eller begge dele eller ingen af delene?² Svaret afhænger af vores forsøgsopstilling.
- Heissenbergs usikkerhedsprincip giver en fundamental og ikke bare praktisk grænse for, hvor nøjagtigt vi kan måle visse størrelser. Det giver også forklaring på fænomener som vacuumfluktuationer.
- Vi kan ikke med bestemthed sige, hvad der vil ske i et eksperiment, men kun forudsige sandsynligheder. Determinismen er død.
- For spin-1/2-partikler vendes spin på hovedet ved en fuld rotation. Den bedste klassiske analogi, jeg har hørt, er en sammenligning med Möbiusbåndet.
- Det såkaldte EPR-paradox (Einstein-Podolsky-Rosen) viser, at vi ikke kan opfatte en partikel som isoleret, men at der kan ske øjeblikkelige påvirkninger over meget store afstande. Det er eksperimentelt bekræftet, vist også af det kvanteteleportationseksperiment, der foregår i kælderens under NBI.
- En ikke-måling kan udgøre en måling³.

Hvis ikke disse og mange andre resultater var eksperimentelt bekræftet i en helt fantastisk grad, ville man vel ryste på hovedet og straks forkaste det som tåbeligheder. Men virkeligheden *er* kvantemekanisk, og som vi ved kan klassisk fysik udledes af QM men ikke omvendt.

Fortolkningerne

Bohr skal have sagt, at enhver, som ikke er chokeret over kvanteteorien, ikke forstår den [14, s.244]. Eller hør Feynman: ”Jeg mener, at jeg med sikkerhed kan sige, at der ikke er nogen, der forstår kvantemekanik... lad være med at blive ved med at sige til dig selv, ”Jamen, hvordan kan det

²Måske burde man indføre Eddingtons udtryk ”wavicle” for at undgå dette problem, for det forekommer mig, at vores normale sprogbrug hæmmer for forståelsen af dette fænomen. Ikke desto mindre vil jeg ofte henvise til partikler i det følgende.

³Se f.eks. [1] for et eksempel på, hvordan man kan afsløre en bombe uden at måle på den.

lade sig gøre?”, fordi du vil blive trukket ind i en blindgyde, hvorfra ingen endnu er undsluppet. Ingen ved, hvordan det kan lade sig gøre.” [8, s.129].

En egentlig forståelse af QM er måske for meget at forlange. Men skal vi tro på den eller tage den alvorligt? Lad os se på fortolkningerne.

De troende

Lad os tage de troende først. Hawking [10, s.169] går lige på og hårdt: ”Jeg ... er en positivist som tror, at fysiske teorier bare er matematiske modeller, som vi konstruerer, og at det er meningsløst at spørge om de er i overensstemmelse med virkeligheden, bare de forudsiger observationer”.

Samme synspunkt fremsættes af Feynman [8, s.164] i forbindelse med en diskussion af Heissenbergs synspunkt, at man ikke skal udtale sig om, hvad der ikke kan måles: ”... man beregner ikke en konsekvens som ’en moo er lig med tre goos’, når ingen ved, hvad en moo eller en goo er.... Men hvis konsekvensen kan sammenlignes med eksperimenter, så er det alt hvad der skal til. Det spiller ingen rolle, at der optræder moos og goos i gættet. Man kan have lige så meget skidt i gættet, som man har lyst til, bare konsekvensen kan sammenlignes med et eksperiment”.

QM virker altså, og det er alt, hvad der skal til. Det er ikke den underliggende beskrivelse, der er interessant, i hvert fald ikke som beskrivelse af virkeligheden. Kun forudsigelserne tæller.

I denne fortolkning er QM tilsyneladende bare nogle matematiske formler. Hvad der foregår, før vi måler, er bare noget, vi bekvemt forestiller os, altså noget rent subjektivt, men som gør det nemt at komme frem til resultater, der passer. En pendant hertil kan vi vist også finde hos Dirac, der afviser, at vi kan finde klassiske billeder på, hvad der foregår på atomart plan. Han siger: ”Man kan udvide betydningen af ordet ’billede’ til at omfatte en vilkårlig måde at se på de fundamentale love, som gør deres indre overensstemmelse åbenbar. Med denne udvidelse kan man få et billede af de atomare fænomener ved at blive bekendt med de kvantemekaniske love” [12, s.10].

Under dette synspunkt er vanskeligheden ved at forestille sig partikelbølge-dualiteten løst ved f.eks. at tage de Broglies formel $\lambda = h/p$. Ligningen beskriver en bølgelængde, men der indgår impuls, og dermed (som

regel) noget med masse, altså noget partikel-agtigt. Ligningen giver ingen mening, hvis man ikke opfatter bølger og partikler som noget sammenhængende. På den måde er ligningen i Diracs forstand netop et billede af partikel-bølge-dualiteten, og jeg tror, at hans synspunkt er, at vi ikke kommer det nærmere.

De alvorlige

Dem, der tager QM alvorligt, har sværere ved at sove om natten. De benægter ikke, at et matematisk udsagn kan være et godt billede, men måske er deres tro på matematikken stærkere end hos de troende. Det er vist ikke mindst tilfældet for Penrose. For ham⁴ forekommer det som om al matematik beskriver virkelighed. Som en konsekvens er han nødt til at acceptere hele QM. Den er ikke bare en bekvem formalisme, men noget, der principielt eksisterer objektivt. Den er der, også selv om der ikke var mennesker, der kan forestille sig den.

At partikler og bølger er to sider af samme sag, og at "wavicles" eksisterer, må vi under dette synspunkt acceptere, hvor svært det end kan være. Også det forhold, at en partikel, der ikke vekselvirker med noget andet, eksisterer som en overlejring af egentilstande, er et virkeligt fænomen.

Penrose ser de ovennævnte resultater som gådefulde, men de har såvel eksperimentelt som matematisk belæg og dermed er sande, på trods af, at vores dagligdags erfaring gør det svært at forholde sig til dem.

Det forekommer mig, at Penrose her er enig med f.eks. Heisenberg. Hvor de troende måske vil påstå, at en partikel i virkeligheden har en bestemt position og impuls, som vi så ganske vist ikke kan måle præcist, så siger Heisenberg, at noget sådant overhovedet ikke giver nogen mening: enhver brug af ordene position og hastighed med en nøjagtighed, der overskrider usikkerhedsrelationen er lige meningsløs som brugen af ord, hvis mening ikke er defineret [15]. Vi er nødt til at forholde os til virkeligheden, og hvis den dikterer noget, som er kontraintuitivt, så er det vores intuition, den er gal med.

Under det alvorlige synspunkt er QM-postulaterne ikke bare et sæt aksiomer men en beskrivelse af virkeligheden. De har en mening, der er

⁴I såvel [6],[7] og [1].

endnu dybere end Newtons 2. lov, $\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt}$. Som Newtons ligning står, kan den opfattes som en definition af, hvad en kraft er, og det forekommer mig, at de troende har denne tilgang til de kvantemekaniske ligninger (man behøver ikke tænke over, hvad der står, man skal bare kunne bruge formlerne). Men i det Newtonske verdensbillede er ligningen en kausal beskrivelse: en kraft forårsager en ændring af impulsen. Det giver en levende beskrivelse af virkeligheden, og det samme gælder for de alvorlige også QM-postulaterne. Vi er bare meget dårlige til at få dem til at virke levende og virkelige.

Klassisk og kvantemekanik

På diskussionssiden for Fysik 22 stillede jeg på et tidspunkt et spørgsmål om hvad det er, der adskiller QM fra klassisk mekanik. Jeg brugte en harmonisk oscillator som eksempel, for den føler alle fysikere sig tryk ved. Hvad præcis er det, der gør, at klassisk mekanik giver mulighed for et kontinuum af energier og at QM giver et diskret spektrum?

Blandt svarene var, at vi i klassisk mekanik ikke bruger operatorer. Selv om det nok er en del af svaret, så føler jeg ikke, at det er tilfredsstillende, for efter min bedste vurdering kan vi opfatte en Hamiltonoperator virkende på en funktion som en Hamiltonfunktion. Et andet svar var, at vi i QM opererer med komplekse sandsynlighedsamplituder, og ikke med reelle generaliserede koordinater. Dette svar er vist tættere på, men det er stadig meget formelt og svært at forholde sig til.

Min fysikordbog [13] definerer klassisk mekanik således: ”Den del af naturvidenskaben, inddelt i dynamik, statik og kinematik, der beskæftiger sig med bevægelse og ligevægt af legemer i en særlig referenceramme”. QM defineres således: ”En matematisk fysisk teori, som voksende ud af Plancks kvanteteori og beskæftiger sig med atomare og relaterede systemer i form af størrelser, der kan måles. Emnet udviklede sig i forskellige matematiske former, herunder bølgemekanik (Schrödinger) og matrixmekanik (Born og Heisenberg), som alle er ækvivalente”. Hvis disse definitioner skal tages for pålydende er forskellen altså, at klassisk mekanik handler om bevægelse og ligevægt, mens kvantemekanik er matematisk,

næppe en frugtbar sontring.

Jeg tror, at hvis vi skal nærme os et bedre svar, må vi se på den helt centrale ingrediens i QM, som er fraværende i klassisk mekanik, nemlig at en kvantetilstand rummer samtlige mulige, potentielle, tilstande. En kvantetilstand er en lineær (kompleks) overlejring af alle de muligheder systemet har, i modsætning til den klassiske tilstand, som er fuldstændig beskrevet ved et sæt faktiske (generaliserede) koordinater, og ikke ved hvad disse også kunne have været.

Bemærk, at hvor vi i klassisk mekanik har et sæt deterministiske love, som beskriver, hvordan tilstanden ændres, så gælder nøjagtig det samme for QM. Den tidsafhængige Schrödingerligning er nemlig fuldstændig deterministisk og rummer absolut intet element af tilfældighed. I Penroses terminologi kaldes denne forskrift for **U**-proceduren, hvor **U** står for den Unitære operator, et andet navn for tidsudviklingsoperatoren.

Hvordan hænger denne determinisme sammen med stokastikken? Svaret ligger i den anden halvdel af de kvantemekaniske procedurer, nemlig i det som Penrose kalder **R**-proceduren. **R** står for tilstandsvektor-Reduktion, eller det vi også kalder bølgefunktionens kollaps. **R**-proceduren tages i brug, når der foretages en måling på systemet. Når det måler, sker der et spring fra en overlejring af alle mulige tilstande til netop en enkelt. Præcis hvilken, der springes til, er stokastisk med sandsynligheder, der opnås ved at finde kvadratet på sandsynlighedsamplituden.

Jeg mener, at denne dikotomi er aldeles central for at forstå forskellen på klassisk og kvantemekanik. På den ene side har vi **U**-proceduren, der er fuldstændig deterministisk - og altså minder om Newtons 2. lov - og på den anden har vi **R**-proceduren, som introducerer tilfældighed. Bemærk i øvrigt, at det er **R**-proceduren, der virkeliggør systemet, i den forstand, at vi kan se et konkret resultat af en måling. Når dette sker, får vi en tilstand, som kan karakteriseres helt på klassisk vis i form af generaliserede koordinater. Men lige efter, at **R**-proceduren på tilfældig vis har forstørret tingene til klassisk niveau, overtager **U**-proceduren, og indtil der igen måles, udvikler tilstanden sig deterministisk som en (måske mindre) overlejring af kvantetilstande.

Bemærk, at disse procedurer tilsammen - i modsætning til klassisk mekanik - ikke er tidssymmetriske. Det diskuteres bl.a. af Penrose [6,

s.458-65] og hovedpointen kan let forklares. Antag nemlig, at vi har et isoleret system bestående af en lampe, der kan udsende en foton ad gangen, og en fotocelle, der kan registrere, om en foton rammer den. Imellem disse er et halvforsølvet spejl. Hvad er sandsynligheden for, at fotonen rammer fotocellen, givet at der faktisk udsendes en foton fra lampen? Svaret er 50 pct. Men det modsatte spørgsmål: ”Hvad er sandsynligheden for, at lampen har udsendt en foton, givet at fotocellen har registreret en foton?”, giver derimod sandsynligheden 100 pct. Der er altså en stor forskel på, om vi kører systemet fremad eller tilbage i tid, og kvantemekanikken giver kun det rigtige svar, når vi kører fremad i tid. Anvender vi nemlig den rene formalisme på andet spørgsmål får vi svaret 50 pct. som er forkert.

Schrödingers kat

Lad os nu se på Schrödingers berømte tankeeksperiment fra 1935 med katten i æsken, hvor radioaktive henfaldssandsynligheder afgør kattens skæbne. Udefra spørger vi ”er katten død eller levende?” De fleste vil sige: enten eller, vi skal bare se efter. Men i QM er det fuldkommen berettiget at sige, at katten både er død og levende. Den eksisterer som en overlejring af de to egentilstande, død og levende. Der er tale om en kvantetilstand, som udvikler sig i overensstemmelse med Schrödingerligningen. Først når vi foretager en måling, dvs. åbner kassen, anvendes **R**-proceduren, bølgefunktionen kollapser, og katten viser sig at være enten død eller levende.

Tankeeksperimentet rejser dels spørgsmålet om, hvad der præcis udgør en måling. Det er jo ikke umuligt, at katten selv har foretaget en måling, inden vi åbner kassen, og derfor netop enten er død eller levende, eller at geigertælleren måler og afgør kattens skæbne. Kun meget få fysikere vil påstå, at der skal mennesker til at foretage en måling.

Derudover er det naturligt at spørge, hvad det præcist er, der gør, at målingen udløser **R**-proceduren. QM giver i sig selv intet svar på dette spørgsmål, hvilket er utilfredsstillende. Skal vi nemlig opfatte udløsningen af **R**-proceduren, som noget der foregår uden for QM? Så har vi noget, der er helt uforklaret, hvilket ikke kan være rigtigt eftersom selve

måleapparatet vel adlyder de kvantemekaniske love.

Det er således ikke spor oplagt, hvordan vi skal forholde os til Schrödingers paradoks, men igen afhænger det af, om man er troende eller alvorlig. Hvis man er troende, er spørgsmålet simpelthen irrelevant. QM er bare en bekvem matematisk formalisme, der virker. Målingen finder sted, vi får et resultat med præcis den sandsynlighed, vi kan beregne, punktum.

Hvis man er alvorlig, er der tale om et ægte paradoks. Der er givet mange fantasifulde bud på, hvordan problemet kan løses⁵ En efter min mening troværdig vinkel tages af Penrose, som konkluderer, at QM enten er forkert eller ufuldstændig. Han henviser til, at også Einstein, Schrödinger, de Broglie og Dirac anså teorien som foreløbig [6, s.385]. Der mangler nemlig noget inden for teorien, der kan forklare, hvad det er, der udløser **R**-proceduren og giver anledning til stokastiske resultater. Hans eget bud er, at vi vil finde svaret i en eller anden form for ulinearitet. Penrose drager en parallel til, at Newtons mekanik også er lineær, men at det kun er en tilnærmelse, som løses i relativitetsteorien, som er ulineær. På samme måde mener han, at kvantemekanikkens linearitet er en tilnærmelse til en mere korrekt ulineær teori.

Linearitet giver anledning til matematisk elegance, men hvorfor skulle virkeligheden være lineær. Kaosteori fortæller os, at ulineære deterministiske systemer kan give resultater, der ikke kan skelnes fra stokastik. Penrose selv nævner ikke denne sammenhæng, men for mig virker den tiltrækkende. Kan man ikke forestille sig, at vi kan droppe tilfældigheden og rykke tilbage til et deterministisk verdensbillede (med stærkt begrænset forudsigelsesevne), hvis der introduceres ulinearitet i QM?

Afsluttende bemærkninger

Atomare processer er dybt underlige (synes jeg) og de kan nok ikke forstås ud fra vore dagligdags erfaringer. På dette punkt er der heller ingen forskel på de to synspunkter: Fysik behøver ikke at passe med almindelige forestillinger, og har vel næppe nogensinde gjort det siden Kopernikus.

⁵F.eks. teorien om parallelle verdener, som jeg personligt finder helt ufysisk.

Virkelige observationer kan tvinge os til at tænke anderledes, og fysik skal passe med observationer. Alle er enige om, at QM stemmer ekstremt godt overens med faktiske observationer, så den er i alle tilfælde et godt redskab.

Her hører enigheden mellem de to fortolkninger imidlertid op. De troende vil ikke lade sig stoppe af filosofiske spørgsmål om, hvorvidt QM beskriver noget virkeligt. Den virker for alle praktiske formål, og dens forudsigelser er perfekte. Jeg tror, at repræsentanterne for denne fortolkning fortsat vil være uhyre produktive, både i løsningen af teknologiske problemer og i opdagelsen og udforskningen af nye fænomener. Hvis vi skal forsøge at sætte synspunktet ind i en filosofisk ramme, kan vi måske sige, at det repræsenterer Kuhns normalvidenskab. Vi kan vel også sige, at holdningen generelt er stærkt repræsenteret i pædagogikken her på KU.

De alvorlige mener, at QM faktisk beskriver virkeligheden. Det er ikke kun selve forudsigelserne der er sande, men også det bagvedliggende billede. Dette synspunkt fører imidlertid til, at man må tage paradokser som Schrödingers kat alvorligt og stille ubehagelige spørgsmål om, hvad en måling er, og hvad der forårsager bølgefunktionens kollaps. Konsekvensen bliver, at QM på en eller anden måde er ufuldstændig. For mig at se, vil en løsning af problemet, give anledning til et kvantespring (sic!) i den fysiske teori, altså i Kuhnsk forstand repræsentere en revolution.

At insistere på målelighed forekommer mig at være en essentiel afgrænsning af fysik fra andre videnskaber, men jeg finder det tankevækkende, at fysikere undgår spørgsmålet om, hvad der er en måling. Det synes implicit forstået, at en måling er det, der sker, når vi måler. Men paradokset med Schrödingers kat er efter min mening belastende for denne tankegang. Hvem eller hvad måler, hvornår, hvordan, og hvad sker der i den forbindelse? Mon ikke det er det, man kalder et godt spørgsmål?

Litteratur

- [1] Penrose, Roger (2000): "The Mysteries of Quantum Physics", s.50-92 i: Malcolm Longhair (ed.): *The Large, the Small and the Human Mind*, Cambridge University Press, Canto Edition.

- [2] Liboff, Richard L. (2003): *Introductory Quantum Mechanics, 4. ed.*, Addison Wesley.
- [3] Sakurai, J.J. (1994): *Modern Quantum Mechanics, Rev. ed.*, Addison Wesley Longman.
- [4] Zettili, Nouredine (2001): *Quantum Mechanics - Concepts and Applications*, Wiley.
- [5] Phillips, A.C. (2003): *Introduction to Quantum Mechanics*, Wiley.
- [6] Penrose, Roger (1990): *The Emperor's new mind*, Vintage.
- [7] Penrose, Roger (1995): *Shadows of the Mind*, Vintage.
- [8] Feynman, Richard P.(1992): *The Character of Physical Law*, Penguin.
- [9] Feynman, Richard P., Robert B. Leighton og Matthew Sands (1965): *The Feynman Lectures on Physics*, bd. 3, Quantum Mechanics, Addison-Wesley.
- [10] Hawking, Stephen R. (2000): "The Objections of an Unashamed Reductionist", s. 169-72 i: Malcolm Longhair (ed.): *The Large, the Small and the Human Mind*, Cambridge University Press, Canto Edition.
- [11] Gribbin, John (1984): *In Search of Schrödinger's Cat*, Bantam Books.
- [12] Dirac, P.A.M.: *Principles of Quantum Mechanics, 3.rd ed.*, Oxford University Press.
- [13] *The Penguin Dictionary of Physics, 3.rd ed.*, Penguin, 2000.
- [14] Gaither C.C. og A.E.Cavazos-Gaither (eds.) (1997): *Physically Speaking - a Dictionary of Quotations on Physics and Astronomy*, IOP Publishing Ltd.
- [15] Heissenberg, W. (1949): *Physical Principles of the Quantum Theory*, Dover.