

# Hvad er en Realistisk Forståelse af Kvantemekanikken?\*

Af

JENS HEBOR

*Jens Hebor, Lektor, Center for Filosofi, Sdu., Odense Universitet arbejder pt. med færdiggørelsen af en større afhandling med titlen En Realistisk Forståelse af Kvantemekanikken. Det centrale forskningsmæssige område er således videnskabsfilosofi, nærmere bestemt fysikkens filosofi. Da problemstillingerne her hænger nært sammen med en række grundlæggende problemstillinger indenfor metafysik, erkendelsesteori, sprogfilosofi/filosofisk logik og matematikkens filosofi, falder JH's forskningmæssige interesser også indenfor disse områder.*

I de fortløbende diskussioner om forståelsen af kvantemekanikken hævdes det ofte, at standard-formuleringen af kvantemekanikken (dvs. uden skjulte variable eller lignende kunstfærdigheder) ikke er "realistisk". Derfor, mener man så også, må Niels Bohrs forståelse af kvantemekanikken nødvendigvis være udtryk for én eller anden form for anti-realisme.<sup>i</sup>

Dette er baggrunden for at mange fysikere og filosoffer idag forkaster Bohrs komplementaritetsoptagelse og i stedet forsøger at modificere kvantemekanikken for at opnå, hvad man opfatter som en realistisk beskrivelse af kvante-verdenen.

Vi skal her tilbagevise grundlaget for disse bestræbelser. Hverken kvantemekanikken eller Bohrs redegørelse for kvantefænomenernes beskrivelsesbetingelser medfører anti-realisme. Vi ønsker i stedet at påpege, at misforståelsen af kvantemekanikken som anti-realistisk og de dermed forbundne forsøg på at ændre den i s.k. "realistisk" retning i virkeligheden bygger på et klassisk-fysisk realismebegreb, som ikke hører hjemme på kvantemekanikkens område. Beklagelserne over, at kvantemekanikken

ikke er ”realistisk”, er derfor simpelthen en beklagelse over, at kvantemekanik ikke er klassisk fysik.

Forsøgene på at forstå kvantemekanikken ud fra den type realistisk ontologi, som vi kender fra klassisk fysik, rejser alle mulige paradokser. Bohrs pointe var, meget kort udtrykt, at kvantemekanikken beskriver virkeligheden, men at den fysiske virkelighed der beskrives på kvanteni-veauet ikke kan begribes ud fra de samme principper, som når vi taler om fysisk virkelighed indenfor rammerne af klassisk fysik.

# 1 Kvantemekanikkens ikke-klassiske karakter - og kvante anti-realismen

## 1.1 Den kvantemekaniske beskrivelse

Den kvantemekaniske beskrivelse er givetvis radikalt uklassisk. Kvantetilstande repræsenteres generelt ved en uanskelig tilstandsvektor, som ikke er en funktion af observable størrelser såsom sted, impuls osv. Sådanne størrelser bliver derimod repræsenteret ved matematiske operatorer, som ikke har nogen isoleret mening. Ikke desto mindre er det disse operatorer, der formidler forbindelsen mellem tilstande og målelige størrelser (eigen-værdier, sandsynligheder og forventningsværdier). Forbindelsen mellem tilstande og observable størrelser er således uhyre indirekte sammenlignet med situationen i klassisk fysik, hvor tilstande simpelthen er funktioner af (bestemte) observable.

Det er en konsekvens af den kvantemekaniske tilstandsbeskrivelse, at kvantesystemer i almindelighed ikke har velbestemte værdier for observable som steder, impulser og spin-komponenter uafhængigt af målinger. Dette betyder blandt andet, at tidsudviklingen for et kvantesystem ikke kan beskrives gennem kontinuerte partikelbaner i fysisk rum og tid eller på anden anskuelig vis. En kvantetilstand svarer i almindelighed til en superposition af klassisk-fysisk uforenelige størrelser (e.g. forskellige steder, impulser osv.). En måling af en given observabel resulterer imidlertid altid i en (ideelt set) velbestemt værdi. Men forbundet hermed medfører målingen generelt en uundgåelig, diskontinuert tilstandsændring for sys-

temet (reduktionen eller ”kollapsen” af tilstandsvektoren eller superpositionen), som betyder at den målte værdi ikke kan tilskrives systemet ”i sig selv”, dvs. som umålt (e.g. før måle-vekselvirkningen eller - i kontrafaktuelle ræsonnementer - uafhængigt af målingen).<sup>ii</sup> Kort sagt, kvanteformalismen tillader i almindelighed kun probabilistiske forudsigelser vedrørende resultaterne af forskellige mulige målinger. Og hele måleopstillingen indgår her på en ikke-triviell måde og afgør f. eks. om systemet opfører sig partikelagtigt eller bølgeagtigt, lokaliseret eller non-lokaliseret.<sup>iii</sup>

## 1.2 Kvante anti-realismen

Disse træk har fået mange til at mene, at kvantemekanikken, når den forstås således (dvs. som en principielt fuldstændig beskrivelse), ikke kan beskrive en iagttagelses-uafhængig virkelighed. For det første fordi ikke-målte størrelser ikke har velbestemte værdier.<sup>iv</sup> For det andet fordi målebegrebet er en integreret del af kvantemekanikkens og for det tredje fordi vi ikke kan danne os et sammenhængende billede af kvante-verdenen, dens struktur og tidsudvikling, uafhængigt af en henvisning til målinger. Vi Ifølge disse kritikere indebærer realisme, at ikke-målte størrelser nødvendigvis må have velbestemte (omend måske ukendte) værdier eller - egentlig det samme formuleret på en anden måde - at målebegrebet ikke kan spille den rolle som det gør i kvantemekanikken.

Derfor, slutter man så, må kvantemekanikken ses som en blot instrumentalistisk teori. Der er kun tale om et sæt af regne-regler, som tillader fysikeren at forudsige diverse måleresultater i form af data aflæst på makroskopiske instrumenter. Kvantemekanikken, hævdes det, ikke blot kan men må forstås antirealistisk. Den er en iboende anti-realistisk teori.<sup>vii</sup>

## 2 EPR-argumentet og Bell's Uligheder

### 2.1 EPR-argumentet

Langtfra alle har stillet sig tilfreds med en sådan konklusion - f. eks. Einstein. Men også Einstein mente, at realisme krævede opretholdelse af prin-

cippet om velbestemte værdier for ikke-målte størrelser. I den berømte EPR-artikel mente han omsider at kunne vise, at kvantemekanikken selv forudsætter eksistensen af sådanne værdier - selv om kvantemekanikken ikke indeholder information om selve værdierne og derfor (iflg. EPR) er ufuldstændig. Artiklen gør essentiel brug af det berømte kriterium for fysisk virkelighed, [14] p. 777:

If, without in any way disturbing a system, we can predict with certainty.... the value of a physical quantity, then there exists an element of physical reality corresponding to this physical quantity.

Det er gennem anvendelsen af dette kriterium på den kvantemekaniske beskrivelse af et korreleret to-partikel system, at EPR konkluderer at de enkelte partikler har velbestemte værdier for de relevante observable uafhængigt af målingen (e.g. før målingen) - selv om disse værdier ikke kan inkluderes i den kvantemekaniske beskrivelse (der kan være tale om kvantemekanisk uforenelige observable).<sup>viii</sup> I EPR-artiklen er argumentationen baseret på et tankeeksperiment, hvor to partikler i en entangled tilstand - dvs. en tilstand, hvor nogle af partiklernes observable ikke er uafhængige men derimod korrelerede - bevæger sig i forskellige retninger og derfor på et tidspunkt er vilkårlig langt fra hinanden. I EPR-eksemplet gælder, at en impulsmåling på én af partiklerne ifølge kvantemekanikken umiddelbart vil informere os om impulsen for den anden partikel, selv om de enkelte partikler før målingen ikke kan tilskrives individuelle, bestemte impulser (kun den samlede impuls er iflg. kvantemekanikken defineret for den relevante to-partikel tilstand<sup>ix</sup>). EPR slutter imidlertid fra den rumlige adskillelse af partiklerne, at de på måletidspunktet udgør to uafhængige systemer, og følgelig videre, i overensstemmelse med virkelighedskriteriet, at impulsværdien for den anden partikel eksisterer uafhængigt af målingen på den første partikel. Derfor er kvantemekanikken, som jo ikke indeholder nogen værdi for denne impuls før målingen, ufuldstændig iflg. EPR. (Denne fremstilling er meget forenklet, men tilstrækkelig i denne forbindelse)

Imidlertid forudsætter hele argumentationen, at to-partikel systemet er separabelt, dvs. at de to partikler allerede før målingen har uafhængigt

definerede tilstande - i modsat fald ville virkelighedskriteriet ikke finde anvendelse. Man da korrelerede kvantesystemer netop er non-separable falder hele argumentationen til jorden: I stedet for at vise, at kvantemekanikken ikke er fuldstændig beror argumentet i virkeligheden i selve udgangspunktet på en forkastelse af den kvantemekaniske beskrivelse.

EPR's implicitte separabilitetsantagelse er uforenelig med kvantemekanikken.<sup>2</sup> Det er netop denne uforenelighed, som kommer til udtryk i Bell's uligheder og som således kan afgøres eksperimentelt [16]. Og, som det sikkert er velkendt, var de eksperimentelle resultater i fin overensstemmelse med kvantemekanikken - og Bohrs svar til EPR [17] - og i modstrid med EPR's antagelser [18].

## 2.2 Forvirring omkring Bell's Uligheder

Uheldigvis bliver Bell's uligheder ofte formuleret som en restriktion på s.k. lokale skjulte-variable teorier, dvs. teorier der opererer med skjulte variable svarende til EPR's "elements of physical reality" og endvidere ikke tillader non-lokale effekter eller fjernvirkninger. Sådanne teorier kaldes ofte *lokalt realistiske teorier*,<sup>xi</sup> og man skal være opmærksom på at "realisme" her betyder eksistensen af skjulte variable, som er klassiske, dvs. ikke opfylder superpositionsprincippet (og derfor også er separable), m.a.o. skjulte klassiske variable - hverken mere eller mindre. Al dette er yderst uheldigt, da det betyder at Aspect-eksperimenterne af mange filosoffer (og nogle fysikere) opfattes som en eksperimentel falsifikation af kombinationen af lokalitet og realisme. Man slutter heraf, at kvantemekanikken må være enten non-lokal eller non-realistisk.

Når man benægter, at kvantemekanikken er realistisk, forstår man således med realisme typisk eksistensen af skjulte variable, som er separable og har måleafhængige værdier, dvs. som essentielt er klassiske. Vi kan kalde dette realismebegreb for EPR-realisme eller simpelthen klassisk fysisk realisme, eftersom separabilitet er grundlæggende i al klassisk fysik men i modstrid med superpositionsprincippet, som er grundlæggende i kvantemekanikken. Klassisk fysisk realisme er imidlertid ikke nødvendigvis identisk med fysisk realisme som sådan.

I virkeligheden forekommer hele situationen temmelig grotesk. EPR

forsøgte at påvise kvantemekanikkens ufuldstændighed ved hjælp af et argument, som forudsatte gyldigheden af klassisk fysisk realisme på kvantemekanikkens område. Hvis nu Aspect-eksperimenterne havde bekræftet Bell's uligheder, så ville EPR have haft ret. Der ville i så fald være elementer i den fysiske virkelighed, som ikke er inkluderet i den kvantemekaniske beskrivelse. Imidlertid bekræftede eksperimenterne kvantemekanikken og gendrev antagelserne bag EPR's virkelighedskriterium - så EPR havde ikke ret. Den naturlige reaktion ville så være at forkaste EPR's klassisk fysiske realisme. Mærkeligt nok ser vi, at mange i stedet konkluderer at kvantemekanikken virkelig er anti-realistisk, dvs. man fastholder simpelthen EPR's virkelighedskriterium selv om dette er baseret på separabilitet, dvs. en klassisk fysisk ontologi.<sup>xii</sup>

Her bør man imidlertid, som overalt i filosofi og videnskab, passe på med ikke at sammenblende realisme med gyldigheden af bestemte ontologiske teser, dvs. teorier eller opfattelser vedrørende virkelighedens nærmere indretning og indhold.<sup>xiii</sup> Denne type begrebsforvirring kan kaldes ontologi-realisme fejlen.

### 3 Realisme, klassisk ontologi og kvante-realisme

#### 3.1 Realisme, klassisk ontologi og klassisk realisme

Alligevel er der som nævnt mange, der accepterer EPR-argumentet og forsøger at undgå alle problemer ved blot at erklære kvantemekanikken for en ren instrumentalistisk teori (cf. note vii ovenfor). Dette er imidlertid ligeså problematisk som den slags anti-realistiske konstruktioner er i almindelighed. Kvantemekanikken kan ikke forstås rent instrumentalistisk, og det er derfor også forkert at tro at anti-realismen er indbygget i teorien. For eksempel er selve kvantemekanikkens udgangspunkt det universelle virkningskvante. Virkningskvantet er ikke blot en menneskelig konstruktion, men må forstås som et træk ved naturen, som er blevet opdaget og udforsket gennem møjsommeligt eksperimentelt arbejde.

Alternativet til kvante-instrumentalisme og klassisk realisme er at se

lidt nærmere på selve realismebegrebet. Blot at hævde ”jeg er realist, for jeg mener at noget eksisterer” er en fuldstændig tom påstand. Realisme må altid være realisme med hensyn til noget, mht. til visse entiteter, størrelser, strukturer etc. Allerede i den klassiske fysiks udvikling opstod der ontologisk forvirring da elektrodynamikken tog form. Gennem mange år havde man vænnet sig til at kun materielle partikler var fysisk virkelige, og det blev derfor hævdet at elektrodynamikken skulle forklares gennem en mekanisk æter. I sidste instans måtte man imidlertid acceptere felter som fysiske systemer sui generis og dermed erkende eksistensen af en ny type fysisk virkelighed. Dette gav så på sin side anledning til nye problemer, idet vekselvirkningen mellem partikler og felter var uforklarlig på basis af de klassiske teorier og førte til teoretiske absurditeter som den s.k. ultravioletkatastrofe. Løsningen på dette problem var Planck’s strålingslov, som netop indførte Planck’s konstant  $h$  som en fysisk realitet i form af en restriktion på vekselvirkningen mellem fysiske systemer.

Idag vil få formodentlig hævde, at elektrodynamikken ikke er realistisk hvis den ikke kan reduceres til klassisk partikelmekanik. Men mange mener derimod, at kvantemekanikken ikke er realistisk hvis den ikke kan reduceres til klassisk fysik. Imidlertid synes både den gamle kritik af feltbegrebet og den moderne kritik af kvantemekanikken at være baseret på en sammenblanding af spørgsmålet om realisme med spørgsmålet om gyldigheden af en bestemt fysisk ontologi, dvs. ontologi-realisme fejltagelsen. M.a.o. man sammenblander fysisk realisme som sådan med klassisk fysisk realisme eller klassisk realisme, dvs. realisme m.h.t. klassisk fysisk ontologi.

I klassisk fysik kan vi karakterisere genstandsområdet som partikler og/eller felter med tilstande, der entydigt fastlægger velbestemte værdier for alle observable størrelser, og som selv er funktioner af principielt observable størrelser, s.k. tilstandsvariable (den grundlæggende rum-tidslige eller anskuelige karakter af klassiske fysik). Tilstanden til et tidspunkt fastlægger principielt tidsudviklingen (determinisme), som en rum-tidslig kontinuert følge af tilstande. Alle tilstandsfunktioner er separable - i sidste instans fordi de beror på en veldefineret fordeling af bestemte værdier for tilstandsvariable i det fysiske 3-rum (til ethvert givet tidspunkt): her gælder altså EPR’s forudsætning, at rumlig adskillelse be-

tyder uafhængighed - og selv om målevekselvirkninger er uundgåelige, så kan de altid enten kontrolleres eller elimineres tilstrækkeligt til at de ikke påvirker resultatet (kontinuitet eller fravær af  $h$ ). Disse træk tillader os på dette område at tale om måleuafhængige, velbestemte værdier for alle observable og at anskueliggøre den klassisk fysiske virkelighed som den er "i sig selv", dvs. hvad enten den iagttages eller ej.

### 3.2 Kvanterealisme

Intet af dette gælder i kvantemekanikken. På grund af Planck's konstant beror enhver ikke-triviel iagttagelse på en principielt ukontrollerbar vekselvirkning mellem måleapparatet og det undersøgte system.<sup>xiv</sup> Vi kan karakterisere kvantemekanikkens genstandsområde som kvantepartikler for at undgå forveksling med det klassiske partikelbegreb (vi taler her om non-relativistisk kvantemekanik). Sådanne kvantepartikler har ikke samtidig velbestemt sted og impuls og derfor heller ikke bestemte rumtidslige baner. I to-spalte eksperimentet vil en elektron vekselvirke med to-spalte skærmen som en bølge men med den fotografiske plade som en partikel. Fra et klassisk fysisk synspunkt er dette et uløseligt paradoks - men det er ikke desto mindre en eksperimentel kendsgerning.

Kvantemekanikken blev udviklet for at kunne give en konsistent beskrivelse af stabile kvantesystemer såsom atomer, forskellige vekselvirkninger mellem kvantepartikler (systemer) samt vekselvirkninger mellem kvantepartikler og makroskopiske systemer. Kvantemekanikken tillader os at beregne og forudsige tidsudviklingen af kvantesystemer og oven i købet i høj grad at manipulere dem - dette er baggrunden for en stor del af moderne teknologi fra fjernsyn til laserteknik. Selv enkelte atomer kan idag iagttages og manipuleres. Ved hjælp af egnede instrumenter kan alle elementarpartikler detekteres. Hvis man vil benægte den fysiske eksistens af kvantepartikler, så må man konsekvent benægte eksistensen af alt der ikke kan iagttages med det blotte øje. Atomer, elektroner og neutroner eksisterer i nøjagtig samme forstand som gener, vira og bakterier.

Selve håndteringen af den kvantemekaniske formalisme bygger på den objektive eksistens af kvantesystemer. For et givet system er den Schrödingerligningen en funktion af antallet og arten af de konstituerende



partikler samt de relevante energifunktioner. Schrödingerligningen for brintatomet beskriver et to-partikel system, der vekselvirker gennem et Coulomb-potential. Den adskiller sig fra ligningen for heliumatomet, som er et tre-partikel system. Partikeltallet er et iboende element i Schrödingerligningen og derfor også en irreducibel, objektiv faktor i den (ikke-relativistiske) kvantemekaniske beskrivelse. Derfor er den kvantemekaniske non-separabilitet også fuldt forenelig med den objektive eksistens af e.g. to uafhængige partikler (som det også eksplicit fremgår af de relevante tilstandsfunktioner, cf. note viii og ix). Hvad angår det forhold, at kvantepartikler er underkastet ubestemthedsrelationerne, så illustrerer dette blot at der jo ikke er tale om klassiske partikler i klassiske tilstande - ikke at disse partikler ikke eksisterer. I kontekst af kvantemekanikken giver det netop mening at tale om kvantepartikler som eksisterende, selv om de ikke er vellokaliserede i rummet uafhængigt af stedsmålinger. For eksempel repræsenterer

$$|\Psi(\mathbf{r}, t)|^2 d\mathbf{r}$$

kun sandsynligheden for at finde partiklen i det infinitesimale område omkring  $\mathbf{r}$  til tidspunkt  $t$ . Men normaliseringsbetingelsen

$$\int_{(R)} |\Psi(\mathbf{r}, t)|^2 d\mathbf{r} = 1$$

hvor  $(R)$  symboliserer integrationsområdet som kan være hele rummet eller en del af rummet, udsiger simpelthen at der er en partikel.<sup>xv</sup>

Det er en hyppig misforståelse - også blandt folk der burde vide bedre - at kvantesystemer ikke har måleafhængige egenskaber overhovedet.<sup>xvi</sup> Tværtimod gælder, at vi nødvendigvis må tage sådanne egenskaber i betragtning i vore beregninger. I ligningerne må vi forudsætte at elektronen er en spin-1/2 partikel med en bestemt masse og elektrisk ladning, at brintatomet er et elektron-proton system osv. De strukturer der repræsenteres er, f. eks. for brints vedkommende, grundlaget for forklaringen af stoffets fysiske og kemiske egenskaber og eksisterer naturligvis hvad enten de måles eller ej. Der er kort sagt intet i kvantemekanikken, som skulle foranledige os til at tro at molekyler, atomer og elementarpartikler ikke eksisterer.

## 4 Bohr 's kvante-realisme

Dette var også Bohrs opfattelse. For det første understregede Bohr igen og igen det vigtige punkt, at virkningskvantet er en fysisk realitet, en kendsgerning som udgør en betingelse for beskrivelsen af kvantefænomenerne:

A new epoch in physical science was inaugurated, however, by Planck 's discovery of the elementary quantum of action which revealed a feature of wholeness inherent in atomic processes [1] p. 2.

Virkningskvantet er udtryk for "a limit, which nature herself has thus imposed upon us"[27] p. 115, ligesom Bohr understregede, at "every doubt regarding the reality of atoms has been removed"(27] p. 103. Endvidere påpegede Bohr påpegede igen og igen, at makroskopiske ting såsom måleinstrumenter får deres karakteristiske stabilitet p. gr. a. eksistensen af kvantiserede atomare systemer, f. eks. [1] p. 51. Bohr var ikke anti-realist på mikrofysikkens område men tværtimod realist. Hvad der forvirrer folk er blot, at Bohr ikke var klassisk realist, fordi han simpelthen havde lært (på den hårde måde: ved at slås med disse problemer) at klassisk fysisk ontologi ikke har gyldighed på kvanteområdet.

Det kan her tilføjes at de filosoffer, som mener man kan tale om realisme i forbindelse med en makrofysisk verden men ikke i forbindelse med mikrofysikken, løber ind i uløselige problemer. Elasticitet er for eksempel en makroskopisk kendsgerning, men den kan ikke forklares indenfor den klassiske fysiks rammer. Vekselvirkningen mellem lys og stof, f. eks. når solen varmer en sten, er en makrofysisk kendsgerning men ligeledes uforklarlig på klassisk fysisk grundlag. Sådanne velkendte fænomener får deres forklaring fra kvantefysikken, og når vi undersøger sådanne forklaringer kan vi ikke finde et punkt, hvor anti-realisme (i mikrofysikken) pludselig går over i realisme (i makrofysikken).

De der opfatter Bohr som anti-realist mht. kvantefysikken citerer ofte en - efterhånden berømt - passage fra en artikel af Aage Petersen. Bohr citeres her for udtalelsen: "There is no quantum world." Men dette udsagn må forstås i dets kontekst, som man i almindelighed glemmer at citere. Bohr 's udsagn er et svar på spørgsmålet "whether the algorithm of quan-

tum mechanics could be considered as somehow mirroring an underlying quantum world” [28] p. 12. Hvad Bohr her benægter er, at vi kan tale om en kvante-verden med en ontologisk struktur som simpelthen afbildes i kvanteformalismen - på samme måde som man kan sige, at den klassiske fysiks ontologi afbildes direkte i de klassiske formalismer, uafhængigt af enhver vekselvirkning. Noget sådant ville være absurd, alene af den grund at selve vekselvirkningen mellem måleinstrumenter og kvantesystemer er en integreret del af kvanteformalismen (jfr. f. eks. selve operator-vektor strukturen, som er kernen i hele formalismen, og virkningen af en operator på en tilstandsvektor). Hertil kommer naturligvis, at tilstandsvektorer i almindelighed er komplekse og mange-dimensionale og ikke kan opfattes som en afbildning af strukturer i fysisk rum-tid.

Tidsudviklingen for tilstandsfunktioner bestemmes af den relevante Hamilton-operator og involverer derfor i sig selv en reference til observable størrelser. Alle dynamiske observable i kvantemekanikken repræsenteres ved hermitiske operatører, og det er kun via disse operatører formalismen får forbindelse med mulige erfaringer, dvs. bliver en fysisk teori. Men for at få konkret empirisk indhold må disse operatører i hver enkelt tilfælde implementeres fysisk, hvilket sket gennem faktiske måleopstillinger. Enhver fysisk anvendelse af formalismen involverer en reference til operatører, enten implicit i selve valget af en repræsentation eller eksplicit i udvinding af empirisk information. I konkrete situationer repræsenterer operatørerne måleopstillinger, som kan beskrives klassisk fysisk, men som vekselvirker med det relevante kvantesystem.

Dette er indholdet af Bohrs begreb om et fænomen. Et kvantefænomen er en vekselvirkning mellem et kvantesystem og en fuldtstændig specificeret eksperimentel opstilling. Det er ifølge Bohr afgørende at

....the interaction between the measuring instruments and the object under observation.... represents in quantum physics an integral part of the phenomena, for which no separate account can be given if the instruments shall serve the purpose of defining the conditions under which the observations are obtained [1] pp. 91-2.

Enver realistisk forståelse af kvantemekanikken må acceptere eksistensen af kvantetilstande. Vi har f. eks. stationære tilstande for atomer og vi har kvantetilstande som superpositioner mellem klassisk uforenelige alternativer (jfr. f. eks. to-spalte eksperimentet). Sådanne tilstande er ikke klassiske tilstande og de kan ikke anskueliggøres, de kan ikke afbildes i fysisk rum-tid. Derfor omtalte Bohr  $\Psi$ -funktionen som en symbolsk repræsentation.<sup>xvii</sup> Der er noget, der repræsenteres, men vi kan ikke danne os et klassisk rum-tidsligt billede af det. Repræsentationen er derfor symbolsk, men der er ikke desto mindre tale om en repræsentation af noget fysisk virkeligt.

At denne virkelighed ikke kan beskrives i klassiske, anskuelige begreber - som så smukt er tilpasset det makroskopiske område - bør ikke forveksles med anti-realisme. Faktisk burde det heller ikke være særlig overraskende, at den fysiske verden ikke fremviser den samme ontologiske struktur hele vejen ned ad skalaen. Tværtimod må noget sådant snarere være at forvente fra et realistisk synspunkt.

## 5 Konklusion

En mindstebetingelse for realisme på fysikkens område er respekten for naturens autonomi: Vores opgave er ikke at foreskrive, hvordan naturen skal være indrettet, men at lære, hvordan den er indrettet og forsøge at tilpasse vore begreber og forestillinger herefter. Derfor må enhver fysisk realisme også være indstillet på at skulle modificere selv grundlæggende begreber og antagelser i lyset af erfaringer på nye områder. Det var netop i den forstand Bohr mente, at fremkomsten af kvantemekanikken var udtryk for en erkendelsesteoretisk lektie, [1] p. v. En del af denne lektie er, at vi ikke uden videre må sammenblende fysisk realisme med bestemte, overleverede begreber om det virkelige, dvs. med klassisk realisme.

Erkendelsen af dette er en betingelse for en ægte kvante-realisme - til forskel fra diverse former for forklædt klassisk realisme på kvantemekanikkens område. Vi har søgt at antyde - uden her at kunne gå i detaljer - at en sådan kvante-realisme, som involverer realisme m.h.t. virkningskvantet, kvantesystemer og kvantetilstande, er en betingelse for

overhovedet at forstå kvantemekanikken. I den forstand gives der en realistisk forståelse af kvantemekanikken - det er blot ikke en klassisk realisme eller en klassisk forståelse.

## 6 Appendiks

I tillæg til det ovenfor sagte kan det måske være relevant at påpege, at selvbestaltede versioner af såkaldt kvante-realisme såsom Bohm'sk mekanik eller Relative State/Mange-verdens teorier hverken er så forståelige eller så realistiske, som tilhængerne hævder. Lad os meget kort minde om nogle træk ved sådanne konstruktioner, som er indbygget i selve konceptet og ikke har at gøre med de mere tekniske vanskeligheder, som også findes.

I Bohm'sk mekanik antages at vi har at gøre med partikler i klassiske tilstande af velbestemt sted og impuls, som imidlertid styres af et "kvante-potential" som er en matematisk konstruktion på basis af  $\Psi$ -funktionen i stedsrummet. Når vi skal overbevises om, at Bohm'sk mekanik er forståelig og realistisk peger tilhængerne altid på det (tilsyneladende) pæne partikelbillede. Den afgørende faktor er imidlertid "kvante-potentialet", som skal sikre tilslutningen til de kvantemekaniske erfaringer, og her er der alvorlige problemer.

For det første: Enten er dette "kvante-potential" fysisk virkeligt eller også er det ikke. I det sidste tilfælde er hele teorien instrumentalistisk og ikke realistisk. I det første tilfælde må man acceptere at det konfigurationsrum, hvori "kvante-potentialet" er defineret, også er fysisk virkeligt. Dette konfigurationsrum er imidlertid i almindelighed  $n$ -dimensionalt med  $n \gg 3$ . Så en realistisk forståelse af Bohm'sk mekanik kræver en realistisk forståelse af dette konfigurationsrum, men dette er hvad tilhængerne aldrig giver os. I stedet får vi vage metafysiske metaforer om "den indfoldede orden" eller den illusoriske status af vor almindelige verden i rum og tid (se f. eks. [9] ch. 15, [10] pp. 277, 463).

Helt bortset herfra så gælder for det andet, at dette "kvante-potential" er en yderst besynderlig størrelse som på ingen måde svarer til et almindeligt fysisk potential eller felt. Det virker instantant og afstandsuaafhængigt,

styrer partiklerne uden selv at påvirkes (det vekselvirker i den forstand ikke, hvad der jo med ét slag "løser" de problemer der førte til kvantefysikken - ultravioletkatastrofen mm.), og dets virkning er uafhængig af dets størrelse, så virkningen sker ikke via dets egen energi eller ikke på sædvanlig måde via udveksling af feltkvanter, hvad der formentlig også ville medføre en nydelig uendelig regres. "Kvante-potentialet" er med andre ord en temmelig spøgelsesagtig størrelse. Bohm selv kalder det faktisk et felt af "active information", [9] p. 35 - hvilket lyder som animisme snarere end fysisk realisme. Og forklaringen, at e.g. en elektron kan modtage og behandle denne "information" fordi elektronen "has a complex and subtle inner structure (perhaps even comparable to that of a radio)", [9] p. 37, er ren metafysik. (Hvis vi overhovedet skal begynde at tage metaforen alvorligt, så må udgangspunktet være at en radiomodtager er et kompliceret makroskopisk legeme, hvis struktur og funktionsmåde kræver henvisning til kvantemekanik) Vi blev lovet en forståelig og realistisk fortolkning af kvantemekanikken, men får nu blot at vide at "nature is far more subtle and strange than previously thought" (ibid.).

For det tredje så lykkes det ikke engang at reintrodere klassiske partikeltilstande på en forståelig måde. Bohm'sk mekanik må operere med uendelige kræfter og uendelige partikelhastigheder, cf. f. eks. [10] p. 70f., men uendelig hastighed betyder at partiklen netop ikke kan tilskrives en velbestemt position til et givet tidspunkt.

For det fjerde skylder tilhængere af Bohm'sk mekanik os en forklaring på universaliteten og konstansen af h. Nogle har tydeligvis ikke tænkt over dette [30]. Andre forsøger en forklaring på basis af et "subkvante" medium eller felt, og alle vanskelighederne overføres så til dette felts mærkelige og ukendte egenskaber. Undertiden ser man oven i købet, at dette felt antages at være et kvante-felt, så vi blot har en ond cirkel [32]. Men igen gælder, at al dette er spekulativ metafysik, ikke forståelig fysik. Så Bohm'sk mekanik synes faktisk hverken at være særlig forståelig eller særlig realistisk.

Hvor Bohm'sk mekanik kan siges at forsøge at genindføre en klassisk ontologi på kvanteområdet, så kan s.k. Relative State/Mange-verdens teorier siges at forsøge at genindføre en klassisk beskrivelsessituation. Fælles for denne klasse af teorier - der er af gode grunde mange varianter,

for ingen af dem er rigtig forståelige eller formår at redegøre for eksistensen af elementære, objektive fysiske erfaringer - er at man benægter eksistensen af et målekollaps. Alle dele af en superposition ikke blot forbliver eksisterende, men forplanter sig oven i købet til instrumentet, iagttageren og i sidste instans resten af universet under en måling. Så mangeverdens teoretikeren beskriver hele universet som en stadig forgrening af alternativer, der alle er realiserede (omend i forskellige "verdener", "grene", "bevidstheder" osv., se [33] for en oversigt). Idealet er den klassiske beskrivelsessituation uden diskontinuitet eller kollaps,<sup>xviii</sup> og teoretikeren tænkes at stå helt udenfor - hævet over - det univers han/hun beskriver fra ét eller andet guddommeligt perspektiv. I virkeligheden er teoretikeren naturligvis ikke hævet over universet - eller sin egen beskrivelse af det - han/hun befinder sig selv i én af "grenene". Resten er en konstruktion teoretikeren indfører, fordi han/hun ikke bryder sig om kollaps - selv om kollaps faktisk er, hvad vi iagttager.

Det virkelige problem er imidlertid, at Mange-verdens teoretikeren ikke kan redegøre for eksistensen af objektive erfaringer og dermed for fysikken som en erfaringsvidenskab. Når vi måler på tilstanden  $\frac{1}{\sqrt{2}}[|x+ \rangle + |x- \rangle]$  og finder f. eks.  $x+$ , så er dette resultat i virkeligheden en art illusion, for i virkeligheden er alle alternativer altid realiserede - omend i forskellige "verdener" eller forskellige "grene". Dvs. i virkeligheden - fra evighedens synspunkt - er der intet resultat men kun den fortsatte superposition, hvor ingen erfaringer er velbestemte eller mulige.<sup>xix</sup> Den eneste mulighed for at redde fysikken som en erfaringsvidenskab er at privilegere vore faktiske erfaringer (f. eks.  $x+$ ) som de virkelige, de der tæller og som vi bygger fysik på.<sup>xx</sup> Men i samme udstrækning, som Mange-verdens teoretikeren forsøger dette kommer man uvilkårligt til at genindføre noget i retning af kollaps, symmetrien mellem de mange "verdener" forsvinder ( $x+$  er virkelig,  $x-$  er ikke) - og hele snakken om andre "verdener" reduceres til en misvisende metafor for dét vi almindeligvis kalder andre (ikke-realiserede!) muligheder.

Så Relative State/Mange-verdens teorierne synes faktisk hverken at være særligt forståelige eller særligt realistiske.

## Noter

\* Dette er essentielt manuskript versionen af et fælles foredrag holdt sammen med David Favrholdt på 11th International Congress of Logic, Methodology and Philosophy of Science 1999, Cracow, Poland, Sections 10. Det præsenteres her med nogle få ændringer, da de diskuterede spørgsmål kan være af interesse for læsere af Gamma. Jeg takker David Favrholdt for samarbejde omkring foredraget og tilladelse til at anvende manuskriptet her.

---

<sup>i</sup> Udtrykket anti-realisme bruges blandt filosoffer som paraplybetegnelse for forskellige former for benægtelse af realisme såsom instrumentalisme, positivisme, operationalisme, pragmatisme, konventionalisme, konstruktivisme m.v. Blandt andet tilhængere af skjulte variable som f. eks. Bohm, Vigier og Holland ynder at hævde noget sådant, cf. nærmere note xvi nedenfor.

<sup>ii</sup> Et er det velkendte to-spalte eksperiment. I en symmetrisk standard-opstilling med en enkelt partikel er sandsynligheden for ved en stedsmåling ved spalteåbning nr. 1 at finde partiklen  $= 1/2$ . Men dette er ikke ensbetydende med at partiklen uafhængigt af nogen måling passerer spalteåbning nr. 1 med sandsynligheden  $1/2$ . Tværtimod er en sådan antagelse uforenelig med det interferensmønster, der opbygges gennem mange identiske eksperimenter uden måleindgreb af nævnte type.

<sup>iii</sup> Dette træk fremgår på mange måder, måske mest spektakulært i såkaldte delayed-choice situationer. I to-spalte eksperimentet (i en egnet opstilling) kan man i princippet udskyde undersøgelsen af, hvilken spalteåbning partiklen passerer, til partiklen allerede har passeret to-spalte skærmen. Hvis man vælger at foretage en sådan (efterfølgende!) måling, så vil man få et bestemt resultat: Partiklen vil med en bestemt sandsynlighed have passeret én af spalteåbningerne og bidrager dermed ikke til interferensmønsteret: vi har et lokaliseret og partikelagtigt fænomen. Hvis vi imidlertid ikke foretager en sådan måling opretholdes interferensmønsteret, og partiklen må siges at have passeret begge spalteåbninger: Den opfører sig dislokaliseret og bølgeagtigt i vekselvirkningen med to-spalteskærmen. Eksemplet findes allerede hos Bohr (og er altså ikke opfundet af Wheeler!) cf. [1] p. 57 og [2] p. 545-6. Meget spektakulære eksempler på delayed-choice eksperimenter kan opnås ved anvendelsen af et Mach-Zehnder interferometer: En beamsplitter præparerer en enkelt foton i en superposition af makroskopisk forskellige baner. Ved hjælp af et passende arrangement af spejle kombineres de to baner ved en anden beamsplitter, som tillader fotonen at interferere med sig selv før detektion. Den enkelte foton må således have gennemløbet begge optiske baner, dvs. den opfører sig som en bølge og er radikalt dislokaliseret. Hvis vi imidlertid placerer en detektor i én af banerne vil den enten klikke eller ikke klikke. Og hvis vi placerer en detektor i begge baner vil kun én af dem klikke. I denne opstilling opfører fotonen sig partikelagtigt, den vælger én af banerne og fremtræder som en ret vel-lokaliseret størrelse. Sagen er nu, at vi kan udskyde valget om vi skal indsætte en detektor eller ej til efter fotonen første beamsplitter og derfor (klassisk set) burde være i enten én eller begge baner. Varianter af dette eksperiment er faktisk blevet udført og bekræfter de kvantemekaniske forudsigelser, cf. f. eks. [3]. Det kan tilføjes, at sådanne fænomener er ligeså non-lokaliserede som de meget diskuterede EPR-korrelationer, cf. f. eks. [38]. Hvad vi vælger at måle på et sted påvirker hele situationen.



Men deciderede paradokser opstår kun, hvis man forsøger at ræsonnere klassisk, dvs. (1) opfatter tilstandsfunktionen som en art rum-tidsligt felt, som (2) begrebsligt kan separeres fra den konkrete måleopstilling (cf. p. 8 nedenfor).

<sup>iv</sup> At eksistensen af måle-uafhængige, velbestemte værdier for observable er en betingelse for fysisk realisme ligger bag udtalelser som: "In quantum mechanics.... there are serious reasons for questioning the validity of the realist's assumption that the measured quantity has, at any time, a definite (even if unknown) value"[4] p. 30, kurs. i orig. "The Bohr-Einstein debate is.... specifically a dispute about the intrinsic-properties theory, i.e. about the scope of a realist interpretation of quantum mechanics"[5] p. 235. Med "intrinsic values" mener Murdoch at alle observable altid har velbestemte værdier. Disse udtalelser er typiske for mange andre.

<sup>v</sup> "More importantly, in my opinion, the subjectivity of the orthodox version, the necessary reference to the "observer" could be eliminated [i Bohm's teori]"[6] p. 160. Bell ønskede generelt "to exclude the notion of "observable" in favour of the notion of "beable (op. cit., p. 41) og blev aldrig træt af at polemisere mod målebegrebet: "Why this aversion to "being" and insisting on "finding"? The founding fathers were unable to form a clear picture of things on the remote atomic scale. They became very aware of the intervening apparatus, and of the need for a "classical" base from which to intervene on the quantum system and so the shifty split"[7] p. 29. Igen er dette kun en mange lignende udtalelser i litteraturen. Det bør bemærkes, at Bell's brug af ordet subjektiv desværre er typisk for mange af disse diskussioner. Der er intet belæg for at opfatte måle-vekselvirkninger som "subjektive", medmindre man accepterer von Neumann's måleteori, cf. [8] pp. 418-20, hvilket f. eks. Bohr ikke gjorde og som der heller ikke er nogen grund til.

<sup>vi</sup> "... quantum theory is concerned with our knowledge of reality and especially of how to predict and control the behaviour of this reality.... It follows from this that quantum mechanics can say little or nothing about reality itself. In philosophical terminology, it does not give what can be called an ontology for a quantum system"[9] p. 2. Tilsvarende formuleringer kan findes mange andre steder. <sup>vii</sup> "Quantum mechanics appears essentially as a set of working rules for computing the likely outcome of certain as yet undefined processes called "measurements".... There are no "electrons" or "atoms" in the sense of distinct localized entities beyond the act of observation. These are simply names attributed to the mathematical symbol  $a$  to distinguish one functional form from another."[10] p. 6. "Standard quantum mechanics.... is most conveniently and neatly expressed by means of a set of basic rules of calculation that enable physicists to make predictions concerning what will be observed."[4] p. 42. "In a strict sense, quantum theory is a set of rules allowing the computation of probabilities for the outcomes of tests which follow specified preparations."[11] p. 13, kurs. i orig. "Quantum mechanics is most easily interpreted antirealistically, that is, as a theory which, though it works, does not describe the way the world is. Therefore, philosophers go out of their way to interpret it realistically. Realism in the philosophy of quantum mechanics means the idea that quantum systems are really like classical particles."[12] p. ix, kurs. i orig. "It is precisely with quantum effects, such as the Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm (EPRB) correlations, that this becomes especially clear.... At this level, the theory is most suitably (although not necessarily) given an instrumentalist interpretation."[13] p. 11, kurs. i orig. Igen er dette kun et lille udpluk af typiske formuleringer.

<sup>viii</sup> Et elementært (senere) eksempel er singlet-tilstanden for spin-1/2 partikler,  $\frac{1}{\sqrt{2}}[|1+ \rangle |2- \rangle - |1- \rangle |2+ \rangle]$ , som udtrykker rotationsinvariant anti-korrelation mellem partiklerne, så resultatet  $z+$  ( $x-$ ) for partikel 1 tillader "forudsigelsen"  $z-$  ( $x+$ ) for partikel 2, osv.

<sup>ix</sup> Som e.g. er af formen  $\Psi(x_1, x_2) = \int \exp[ik(x_1 - x_2)] dk$ , så den samlede impuls i hvilesystemet

= 0, og de to partikler har lige store, modsatrettede impulser. EPR gør brug af en mere generel tilstandsfunktion, som også involverer stedskorrelation, hvilket imidlertid medfører nogle komplikationer, da der ikke er nogen bevarelsessætning for afstand. Det principielle argument kan udmærket forstås ud fra impulskorrelation alene.

<sup>x</sup> Dette blev faktisk påvist allerede i 1936 af Furry, som også gjorde opmærksom på, at problemet principielt var eksperimentelt afgørbart, cf. [15].

<sup>xi</sup> Cf. f. eks. indflydelsesrige artikler som [18] og [19] og hele artikelsamlinger som f. eks. [36].

<sup>xii</sup> Således hedder det i Clauser og Shimony's tekniske oversigtsartikel [19], at "either the thesis of realism or that of locality must be abandoned" (p. 1882), samt at "...we are forced to abandon either the strong version of EPR's criterion of reality - which is tantamount to abandoning a realistic view of the physical world (perhaps an unheard tree falling in forrest makes no sound after all - or else to accept some kind of action-at-a-distance" (p. 1921). I populære og halvpopulære præsentationer har vi fået at vide, at den opfattelse "that the world is made up of objects whose existence is independent of human consciousness turns out to be in conflict with quantum mechanics", [20] p. 128, samt at "we now know that the moon is demonstrably not there when nobody looks" [21] p. 940.

<sup>xiii</sup> Uden her at gå i detaljer kan erindres om f. eks. de fysikere, der enten modsatte sig feltbegrebets indførelse som en fundamental størrelse i fysikken eller som opfattede felter som ikke-fysiske, åndelige størrelse, fordi fysisk virkelighed blev identificeret med partikler i bevægelse, dvs. med en mekanisk ontologi. Eller de fysikere og filosoffer, der opfattede speciel relativitetsteori som anti-realistisk eller "subjektivistisk", fordi e.g. virkelige længder måtte være transformation-sinvariante, dvs. de forvekslede fysisk realisme med Galileisk rum-tid, mao. med en bestemt, præ-relativistiskrum-tids ontologi.

<sup>xiv</sup> Ikke-trivielt skal blot udelukke måling af observable, der allerede er i egentilstande for den relevante operator, dvs. hvis tilstand allerede er kendt. Forskellige forsøg på at undgå målekollaps, f. eks. gennem s.k. protective målinger [24], er i denne forstand trivielle, cf. [25], [26].

<sup>xv</sup> At sige at sandsynligheden for at finde en partikel i en given del af rummet er lig 1 er det samme som at sige, at der er en partikel i den pågældende del af rummet. Bemærk også at normaliseringsbetingelsen gælder hvad enten der måles eller ej. Selv om partiklen ikke kan tilskrives f. eks. stedskoordinater uafhængigt af måling, så er partiklens eksistens grundlag for hele beskrivelsen.

<sup>xvi</sup> "In the usual interpretation of quantum theory, an atom has no properties at all when it is not obsed [22] p. 92. "Bohr would never allow the type of language that admitted the independent existence of any object which could be said to be in a certain state. That is to say, he would not regard it as meaningful to talk about, for example, a particle existing between quantum measurements" [9] p. 18. "... going further still, some asserted that atomic and subatomic particles do not have any definite properties in advance of observation.... indeed even the particles are not really there" [6] p. 142. "For Bohr the concept of the interphenomena cannot be unambiguously applied.... The neutron has no independent existence and hence does not exist as a particle in space and time in the interferometer" [37] p. 656. "On this view, which was strongly expressed by Bohr, one should not attempt to interpret the state vector in order to extract information about quantum objects; one should not even speak of quantum objects" [23] p. 213. Sådanne udtalelser, som desværre er typiske, udmærker sig ved allerede fra starten at sammenblande (mindst) tre forskellige spørgsmål: (1) værdi-ubestemtheden af ikke-målte dynamiske variable i standard kvantemekanik, (2) spørgsmålet om kvantepartikler overhovedet tilkommer måleuafhængige egenskaber (iflg. standard kvantemekanikken er e.g. elektronen måle-uafhængigt

karakteriseret ved masse, ladning og spin-1/2), (3) spørgsmålet om selve partiklernes eksistens. De nævnte forfattere kan heller ikke have læst Bohr ordentligt. Bohr påpegede igen og igen at atomare objekter og størrelser ikke blev "skabt" af målinger, f. eks.: "Meanwhile, the discussion of the epistemological problems in atomic physics attracted as much attention as ever and, in commenting on Einstein's views as regards the incompleteness of the quantum-mechanical mode of description, I entered more directly on questions of terminology. In this connection I warned especially against phrases, often found in the physical literature, such as "disturbing of phenomena by observation" or "creating physical attributes to atomic objects by measurements" [1] p. 64-5.

<sup>xvii</sup> [17] p. 697, hvor  $\Psi$ -funktionen omtales som "the symbolic representation of its [i.e. partiklens] state." M.a.o., der er kvantetilstande og disse repræsenteres ved  $\Psi$ -funktionen. Repræsentationen er imidlertid symbolsk, hvilket for Bohr simpelthen betyder ikke-billedlig eller ikke-anskuelig. Med Bohrs egne ord: "It is emphasized in the article that the symbolic garb of the methods in question closely corresponds to the fundamentally unvisualizable character of the problems concerned" [27] p. 12. Ikke desto mindre ligger i selve ordet repræsentation at ikke blot er et matematisk symbol i et rent formelt skema.

<sup>xviii</sup> DeWitt og Graham taler nostalgisk om en tilbagevenden til en klassisk beskrivelsessituation, som de kalder naiv realisme: "...a return to naive realism and the old fashioned idea that there can be a direct correspondence between formalism and reality" [31] p. 736. Den formalisme de taler om, er naturligvis kun kvanteformalismen uden kollaps, hvad der i sig selv giver en masse problemer - valg og begrundelse af observable, repræsentation osv. Det er netop den slags forsøg på at opfatte virkeligheden som en ren afbildning af formalismen, som Bohr ønskede at tilbagevise i det famøse Aa. Petersen-citat ovenfor.

<sup>xix</sup> Nogle metafysisk indstillede teoretikere drager undertiden sådanne konklusioner: "[S]pace.... in any realistic understanding of quantum mechanics.... is configuration space. And whatever impression we have to the contrary (whatever impression we have, say, of living in a three-dimensional space, or in a four-dimensional space-time) is somehow flatly illusory" [34] p. 277. Tilsvarende hedder det hos Zeh [35], at den "globale bølgefunktion" beskriver virkeligheden (p. 190), medens klassiske begreber, der tilskriver velbestemte egenskaber til f. eks. visere på måleinstrumenter "describe mere shadows on the wall of Plato's cave in which we are living" (p. 192).

<sup>xx</sup> Det er en vigtig plathed, at det at erfare noget altid er at erfare noget bestemt, dvs. at noget er tilfældet og at noget andet derfor ikke er tilfældet (f. eks.  $x+$  i stedet for  $x-$ ). Derfor kræver enhver meningsfuld anvendelse af erfaringsbegrebet at noget udelukkes til fordel for noget andet - ellers erfarer vi netop ikke noget. Derfor er en påstand om, at alle muligheder "i virkeligheden" altid er realiserede (vi ved det blot ikke) ensbetydende med en de facto ophævelse af erfaringsbegrebet - uanset hvilke kunstgreb man indfører. Det er vor opfattelse, at netop elementære fysiske erfaringers nødvendige definte karakter ligger bag Bohrs insistering på anvendelsen af klassiske begreber i den ultimate redegørelse for fysiske erfaringer og eksperimenter, cf. f. eks. [1] p. 39.

## Litteratur

- [1] Bohr, N.: *Essays 1932-1957 on Atomic Physics and human Knowledge*, Woodbridge 1987: Ox Bow Press
- [2] Rüdinger, E.: "Bohr's Double-slit Experiment -Once Again", *Physica Scripta*, 39 (1989), pp. 545-46.
- [3] Hellmuth, H., Zajonc, A, Schleich, W.: "Delayed-choice experiments in quantum interference", *Phys. Rev.*, A 35 ((1987] pp. 2532-2541.
- [4] d'Espagnat, B.: *Veiled Reality*, reading (Mass.) (1995): Addison-Wesley.
- [5] Murdoch, D.: *Niels Bohr's Philosophy of Physics*, Cambridge (1987): Cambridge University Press.
- [6] Bell, J.: *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, Cambridge (1987): Cambridge University Press.
- [7] Bell, J.: "Against Measurement", pp. 17-31 i Miller, A. I. (ed.): *Sixty-two Years of Uncertainty*, New York (1990): Plenum Press.
- [8] von Neumann, J.: *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Princeton (1955): Princeton University Press.
- [9] Bohm, D. & Hiley, B.: *The Undivided Universe*, London (1993): Routledge.
- [10] Holland, P.: *The Quantum Theory of Motion*, Cambridge (1993): Cambridge University Press.
- [11] Peres, A.: *Quantum Theory. Concepts and Methods*, Dordrecht (1993): Kluwer.
- [12] Gibbins, P.: *Particles and Paradoxes*, Cambridge (1987): Cambridge University Press.
- [13] Cushing, J. T.: *Quantum Mechanics*, Chicago (1994): University of Chicago Press.
- [14] Einstein, A, Podolsky, B. Rosen, N.: "Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?", *Phys. Rev.*, 47 (1935), pp. 777-80.
- [15] Furry, W. H.: "Note on the quantum-mechanical theory of measurement", *Phys. Rev.*, 49 (1936), pp. 393-99.
- [16] Bell, J.: "On the Einstein Podolsky Rosen Paradox", *Physics*, 1 (1964) pp. 195-200. Genoptrykt som pp. 14-21 i [6].
- [17] Bohr, N.: "Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?", *Phys. Rev.*, 48 (1935), pp. 696-702.
- [18] Aspect, A., Grangier, P., Roger, G.: "Experimental Tests of Realistic Local Theories via Bell's Theorem", *Phys. Rev. Lett.*, 47 (1981) pp. 460-3.
- [19] Clauser, j. & Shimony, A.: "Bell's Theorem: Experimental Tests and Implications", *Phys. Rev.*, D 10 (1978), pp. 1881-1927.
- [20] d'Espagnat, B.: "The Quantum Theory and Reality", *Scientific American*, nov. 1979, pp. 128-40.
- [21] Mermin, N.: "Bringing Home the Atomic World: Quantum Mysteries for Anyone", *American Journal of Physics*, 49(1981), pp. 940-3.
- [22] Bohm, D.: *Causality and Change in Modern Physics*, Princeton (1957): Van Nostrand..

- [23] Sudbery, A.: *Quantum Mechanics and the Particles of Nature*, Cambridge (1986): Cambridge University Press.
- [24] Aharonov, Y. & Vaidman, L.: "Measurement of the Schrödinger Wave of a Single Particle", *Physics Letters*, 178 A (1993), pp. 38-42.
- [25] Unruh, W.: "Comment: Reality and Measurement of the Wave Function". *Phys. Rev.*, A 50 (1994) pp. 882-7.
- [26] Alter, O. & Yamamoto, Y.: "Protective Measurement of the Wavefunction of a Single Squeezed hamonic Oscillator State", *Phys. Rev.*, A 53 (1996) pp. R2911-14.
- [27] Bohr, N.: *Atomic Theory and the Description of Nature*, Woodbridge (1987): Ox Bow Press.
- [28] Petersen, Aa.: "The Philosophy of Niels Bohr", *Bulletin of the Atomic Scientist*, 19 (1963), pp. 8-14.
- [30] Interview med Basil Hiley, pp. 135-148 i Davies, P. C. W. & Brown, J. R. (eds): *The Ghost in the Atom*, Cambridge: Cambridge University Press, 1986.
- [31] Dewitt, B. & Graham, R.: "Resource Letter IQM-1 on the Interpretation of Quantum Mechanics", *American Journal of Physics*, 39 (1971) pp. 724-38.
- [32] Santos, E.: "Comment on "Source of vacuum electromagnetic zero-point energy, *Phys. Rev.*, A 44, 3383-4 (1991).
- [33] Barrett, J.: *The Quantum Mechanics of Minds and Worlds*, Oxford (1999): Oxford University Press.
- [34] Albert, D.: "Elementary Quantum Metaphysics", pp. 277-284 i Cushing, J. et al. (eds.): *Bohmian Mechanics and Quantum Theory: An Appraisal*, Dordrecht (1996): Klüwer.
- [35] Zeh, H. D.: "There are no Quantum Jumps, Nor are there Particles!", *Physics Letters*, 172 A (1993), pp. 189-92.
- [36] Selleri, F. (ed.): *Quantum Mechanics versus Local Realism*, New York (1988): Plenum Press.
- [37] Vigier, J.-P.: "Causal, Non-Local Interpretation of Neutron Interferometry Experiments", pp. 653-75 i Lahti, P. & Mittelstaedt, P. (eds.): *Symposium on the Foundations of Modern Physics*, Singapore (1985): World Scientific.
- [38] Franson, J. D. & Potocki, K. A.: "Single-Photon Interference Over Large distances", *Phys. Rev.*, A 37 (1988), pp. 2511-15.