

TEKST NR 202

1990

TEGN OG KVANTER

Foredrag og artikler, 1971-90.

Peder Voetmann Christiansen.



TEKSTER fra

IMFUFA

ROSKILDE UNIVERSITETSCENTER

INSTITUT FOR STUDIET AF MATEMATIK OG FYSIK SAMT DERES
FUNKTIONER I UNDERVISNING, FORSKNING OG ANVENDELSER

IMFUFA, Roskilde Universitetscenter, Postboks 269, 4000 Roskilde
TEGN OG KVANTER. Foredrag og artikler, 1971-90.

af: Peder Voetmann Christiansen

IMFUFA tekst nr. 202/90 220 sider

ISSN 0106-6242

ABSTRACT.

Denne samling af artikler og foredragsmanuskripter, nogle på engelsk, de fleste på dansk, rækker over et tidsrum på næsten tyve år, fra juni 71 til november 90. Emnet er kvantemekanikken og dens forståelighed, og det gennemgående synspunkt er, at den gængse teori er den simplest mulige logisk konsistente beskrivelse af de atomare fænomener. Dette skal dog ikke opfattes som en opfordring til at acceptere formalismen på dens glatte ansigt som noget der bare er rigtigt, uanset under hvilke omstændigheder. Efter min mening havde Einstein, Podolski og Rosen ret i, at kvantemekanikken er ufuldstændig, men ikke i, at den kan fuldstændiggøres ved brug af skjulte variable. Den københavnske fortolkning, som overleveret fra Bohr, gjorde ret i at pege på den eksperimentelle kontekst som afgørende for formalismens gyldighed, men dens nuværende fortalere synes at have glemt dette og tror, at nyere eksperimenter, som Aspects, der påviser tilsyneladende ikke-lokale korrelationer, blot bekræfter, hvad vi ved i forvejen. Efter min mening opnår vi ingen forståelse ved den slags formelrytteri. Lovmæssigheder er netop det, man skal prøve at forstå, som filosofen Peirce sagde. Med brug af hans metoder kan man skimte en ny grundlagsdisciplin, en "kvantesemiotik", som ud fra en forståelse af tegnene og deres væsen kan indse både kvantemekanikkens rimelighed og dens begrænsning. Disse artikler, som henvender sig til læsere på mange forskellige niveauer, kan betragtes som bidrag til kvantesemiotikken.

Forside tegning fra Ellinger, Naturen og dens kræfter, 1897.

Indhold

| | | |
|---|------|-----|
| 1. Indledning (november 90)..... | side | 2 |
| 2. Måleproblemer og kvantemekanisk formalisme (hh-klubben, juni 1971)..... | side | 15 |
| 3. Retur til virkeligheden (GAMMA 52, marts 1983)..... | side | 53 |
| 4. Kvantesemiotik og EPR-paradokset (hh-klubben, juni 1983)..... | side | 79 |
| 5. Quantum Non-Locality and Connectedness (submitted to Phys. Rev. Letters, august 1983, with referee's reports and author's comment)..... | side | 100 |
| 6. Springet fra København (kronik i Information på Bohrs 100 års fødselsdag, den 7. oktober 1985)..... | side | 113 |
| 7. Letter to the editors and reply from Mermin (Physics Today, november 1985)..... | side | 125 |
| 8. Aspects eksperimenter - hvad er det, som er så svært at forstå? (Statens Filmcentral, september 1986)..... | side | 130 |
| 9. Er fysikken realistisk? (GAMMA 65, december 1986)..... | side | 143 |
| 10. Kan kvantemekanikken forstås? (GAMMA 73-74, november-december 1988)..... | side | 148 |
| 11. Peirce as Participant in the Bohr-Einstein Discussion (Harvard, september 1989)..... | side | 186 |
| 12. Peircean Local Realism Does Not Imply Bell's Inequalities (Joensuu, august 1990)..... | side | 200 |

Indledning

Indledning

At udgive en samling gamle artikler for at redde dem fra glemsel i tidens strøm kan selvfølgelig være nyttigt for forfatteren. Man får bl.a. mulighed for at foretage små redaktionelle ændringer af formuleringer, man ved gensynet ikke er så glad for. Denne mulighed har jeg da også udnyttet i denne samling, men kun i begrænset omfang i de mest ustrukturerede manuskripter. Der er ikke ændret i de væsentlige synspunkter, selv om jeg i visse tilfælde kunne ønske, at jeg havde formuleret mig anderledes.

Jeg håber, at en sådan samling også kan være til gavn for de læsere, som søger en rimelig bred belysning af kvantemekanikkens grundlæggende problemer uden for meget formelgymnastik. Efter min mening kan det ikke nytte noget at gå for formalistisk til værks i denne sammenhæng, for det drejer sig om at forstå formalismens grundlag, og man kan ikke forklare formler med andre formler, med mindre disse formler etablerer en forbindelse til et mere velkendt felt. Til syvende og sidst må formalismen sættes i forbindelse til dagligsproget, hvilket man som fysiker kan være noget tøvende overfor. Det giver ikke nogen faglig prestige, hvis man insisterer på at udtrykke sig med ord, for det frister til retorik og digressioner, en fysikfremmed "usaglighed", og man kan ikke få sådanne artikler optaget i anerkendte internationale tidsskrifter, hvad jeg gentagne gange med en vis græmmelse har måttet erkende.

Det har for mig i disse år været en konstant udfordring at formulere disse problemer for en tværfagligt sammensat kreds. Denne udfordring har været holdt i live gennem min deltagelse i "hh-klubben", en filosofisk diskussionskreds, som i mange år holdt aftenmøder ca hver anden uge i Helmuth Hansens kontor på Filosofisk Institut i København. Kredsen

blev oprindeligt oprettet i foråret 1963 på initiativ af civ. ing. Erik Klug Andersen (EKA) med det formål at diskutere relativitetsteoriens og kvantemekanikkens erkendelsesteoretiske problemer. Initiativet var en udløber af det dengang eksisterende ATV-sponsorerede "Yngre Forskeres Kontaktnet". I begyndelsen havde kredsen ikke noget officielt navn, men blev spøgefuldt omtalt som "atomklubben" eller "paradoksklubben". Sit nuværende navn "hh-klubben" fik den først, da værtsskabet blev overtaget af Claus Emmeche på Institut for Biologisk Kemi B efter Helmuth Hansens død i 1987.

Den første artikel i denne samling måleproblemer og kvantemekanisk formalisme er resultatet af min første kontakt med hh-klubben som en af Helmuth Hansen inviteret oplægsholder i juni 1971. Der forelå ikke noget egentligt manuskript, men på Helmuth Hansens initiativ blev der produceret en afskrift af en båndoptagelse, som jeg så senere redigerede lidt i og fik trykt på Filosofisk Institut. Jeg har ikke forsøgt at ændre talesproget til en mere skriftvenlig form. De mange gentagelser og afstikkere i teksten er en afspejling af den direkte kontakt med opmærksomme tilhørere, og det kan vel have en vis værdi, selv når det er skrevet ned. Jeg har fået en del positive tilbagemeldinger fra læsere af den først trykte version, så derfor vover jeg at udsende den igen.

Den første artikel afviger noget fra de andre, dels fordi den er så tidlig, og dels fordi den ikke omhandler Einstein-Podolski-Rosen (EPR) problemet, som jeg på den tid, i lighed med de fleste københavnske fysikere, ikke anså for noget problem. I mange år anså jeg de kvantemekaniske grundlagsproblemer for en "sump", som man helst ikke skulle opholde sig for længe i. Det var først igennem min ven Dick Mattucks glødende interesse for denne diskussion, at jeg igen, omkring 1980, blev indfanget af problemerne. Medvir-

Indledning

kende hertil var også d'Espagnat's artikel i Scientific American fra november 1979, hvor jeg for første gang stiftede bekendtskab med Bell's uligheder, altså 15 år efter deres formulering. Omtrent på denne tid blev jeg også regulært medlem af hh-klubben og bragte der Bell's indsats på bane, hvilket bl.a. førte til, at EKA producerede et stort kompendium om EPR-problemerne, hvilket har været mig til megen hjælp.

I årene 1980-82 var der stor interesse for det mulige udfald af Aspect's "switching" eksperiment. Jeg indgik et væddemål om udfaldet med EKA, og først i begyndelsen af efteråret 1982 blev det klart, at jeg havde tabt en kasse røgede sild, som blev fortæret i hh-klubben med en vis festivitas. Det er på sin vis en stor gevinst at tabe et sådant væddemål, da det sætter nogle tanker i sving, og allerede inden gildet havde jeg min nye teori klar, som jeg ikke endnu har fundet nogen grund til at fravige. Det er selvfølgelig den eksperimentelle kontekst, som er ansvarlig for de mystiske kvantekorrelationer, lige som det altid er i kvantemekanikken, og i dette tilfælde må den påståede "ikke-lokalitet" være sat på forhånd i og med, at alle registreringerne finder sted i centralt placerede coincidentstøllere. Hvis eksperimentet blev lavet uden disse tællere, måtte man derfor satse på det modsatte resultat, at Bell-ulighederne var opfyldt. Denne opfattelse gjorde jeg første gang gældende i samtaler med Tom Juul Andersen, som jeg var specialevejleder for, og den kom første gang på tryk, da jeg blev interviewet af Tor Nørretranders til Information den 22. oktober 1982 i anledning af Aspect eksperimentet. Grunden til, at jeg ikke havde tænkt på coincidentstøllernes mulige rolle før da, var hovedsagelig, at de aldrig omtaltes i de mere filosofiske fremstillinger af EPR-problemet.

Den afgørende forskel på, om coincidentstøllingerne er

"forudsat" (som i de virkelige eksperimenter) eller "bagudsat" (som i de filosofiske og populære fremstillinger) bragte mig i kontakt med Søren Kierkegaards ideer om "det qualitative spring". Denne kontakt blev især formidlet af Mogens Asmussen, en anden af hh-klubbens faste støtter, som med sine højst originale ideer om almen sprog- og begrebslogik har været mig til stor inspiration. Det slog mig, at Niels Bohr jo også havde været optaget af Kierkegaard i sine unge dage, og ved en nærlæsning af "Philosophiske Smuler" og "Begrebet Angest" fik jeg et overvældende indtryk af parallelitet med Bohrs ideer om kvantespringet. Dette indtryk af nogle alment filosofiske forudsætninger for kvantemekanikken støttedes også ved min samtidige læsning af pragmatismens grundlægger Charles S. Peirce, hvis ideer, indirekte formidlet gennem William James og Harald Høffding har haft en vis indflydelse på den unge Niels Bohr og sat sit præg på den københavnske kvantemekanik.

Den næste artikel retur til virkeligheden, kom i Niels Bohr Instituttets udmærkede lille tidsskrift GAMMA i marts 1983. Titlen havde jeg hugget fra en artikel "The Aspect Experiment and the Return to Reality" af T. W. Marshall, en af lokalrealismens utrættelige forkæmpere. GAMMA-artiklen opsummerer mine tanker om en almen begrebslogik, der ligger til grund for kvantemekanikken, men som ikke er særlig kendt blandt fysikere. Det var jo egentlig den samme tankegang, der lå til grund for mit første foredrag i hh-klubben fra 71, men dengang holdt jeg mig stort set til de matematisk formulerede discipliner informationsteorien og termodynamikken; nu var jeg efterhånden ved at få den opfattelse, at grundlagsdiskussionen kunne hente nogle vigtige inspirationer fra Kierkegaard og fra Peirce i hans almene tegnteori, semiotikken.

Jeg havde på det tidspunkt i ca 10 år arbejdet med en

af Peirce's semiotik inspireret teknik til modelbygning, energibåndsteknikken (beskrevet i IMFUFA teksterne 8 og 22). Det blev efterhånden klart for mig, at grunden til, at jeg straks slog ned på coincidenstællerne som den afgørende faktor, men havde svært ved at overbevise andre om det, var at jeg altid tænkte i energibåndstermer, når andre tænkte i matematiske symboler. Resultatet af disse overvejelser blev et nyt oplæg til hh-klubben, kvantesemiotik og EPR-paradokset, som jeg har sammenfattet fra håndskrevne noter til denne samling. Det er den mest tekniske af artiklerne her og vil nok virke uforståelig for den læser, der ikke i forvejen har hørt om energibånd og fluktuations-dissipations teoremet. Desværre er den upræcis i anvendelsen af de semiotiske kategorier, men de fremhævede "teser" giver et koncentrat af synspunkter, som jeg stadig står ved. De væsentligste ideer fra dette manuskript og fra "retur til virkeligheden" blev senere formuleret i en større artikel "The Semiotics of Quantum-Non-Locality", IMFUFA tekst nr. 93 (1985).

Jeg forsøgte også at præsentere disse semiotik-ideer i en meget kondenseret form som en artikel til Physical Review Letters allerede i foråret 1983. Som svar fik jeg to referee rapporter, hvor den ene lakonisk anbefalede artiklen til optagelse, medens den anden argumenterede ret udførligt for, at artiklen var for teknisk og burde skrives om til en mere ekstensiv form til en bog eller en større artikel. Jeg kunne godt indse rimeligheden i dette synspunkt og gik i gang på to fronter, dels med den store artikel (IMFUFA tekst 93) og dels med en ny artikel til Physical Review Letters, Quantum Non-Locality and Connectedness, hvor jeg helt udelod de tekniske detaljer og holdt mig til en rent verbal argumentation. Resultatet af dette var to entydigt negative referee rapporter, som jeg har aftrykt i denne samling efter artiklen. Jeg har ikke kunnet nære mig for at servere en

lille kommentar til disse rapporter, som stadig forekommer mig ret rystende. Jeg mener, at der her er tale om en paradigmestrød, hvor jeg, som tilhænger af et "Peirce-paradigme" gør mig til talsmand for, at man skal forsøge at forstå den filosofiske baggrund for kvanteformalismen, medens de udvalgte, anonyme repræsentanter for "normal science" tager dette som et tegn på, at forfatteren altså ikke har forstået kvantemekanikken og derfor ikke kan få noget optaget i det ærværdige tidsskrift. Selvfølgelig er der også noget med stilen, mine lidt ironiske og spidse formuleringer, som f.x. "the least bizarre possibility" er åbenbart faldet den ene for brystet. Selve det, at artiklen er uden formler, har nok også bidraget til den næsten udtalte insinuation, at det her vist er noget, forfatteren har brygget sammen en sen aften på et værtshus. Selvfølgelig er et tidsskrift som Physical Review Letters nødt til at afvise mange artikler, det er der ikke noget underligt i, men for men med de anonyme referees virker som et lotterispil, hvor man let kan risikere at trække et par nitter, uden at det har ret meget at gøre med kvaliteten af artiklen, og jeg synes det er for dårligt af tidsskriftet at annoncere, at man optager artikler i kategorien "foundations of quantum mechanics, measurement theory, etc." og så benytte referees, som åbent (omend anonymt) erklærer, at de ikke er interesserede i andre udlægninger end den på bjerget herskende. Da jeg heldigvis ikke er tvunget til at publicere i tidsskrifter med anonyme referees, har jeg i konsekvens af denne historie for eftertiden undladt at publicere sådanne steder.

Jeg forsøgte dog at afsætte den store artikel, IMFUFA tekst 93, til Physica Scripta, da dette tidsskrift annoncerede efter artikler i grænseområdet mellem fysik og filosofi, og da de yderligere bekendtgjorde, at man selv kunne foreslå egnede referees. Jeg ved ikke, om de benyttede sig

Indledning ..

af et af mine forslag, men resultatet var en enkelt anonym rapport, som var lige så entydigt negativ og i øvrigt demonstrerede en efter min mening forkert udlægning af fluktuations-dissipationsteoremet uden at berøre de mere filosofiske sider af min afhandling:

Min anden artikel til Phys. Rev. Lett. (den her trykte) indeholdt foruden forslaget til et eksperiment uden coincidentstøllere også et forslag, hvor disse tællere var bibeholdt, men hvor kilden var placeret asymmetrisk. Dette forslag figurerer også i den større artikel (IMFUFA tekst '93), men kun som det lavest prioriterede blandt tre forslag. Jeg var hele tiden usikker på værdien af dette eksperiment, men mente, at det var det nemmeste at gennemføre, og at det burde undersøges, om asymmetri spillede en rolle, hvilket var antydnet af nogle tidligere udførte eksperimenter (Faraci et al.). Senere viste det sig, takket være Tor Nørretranders' kontakt med Aspect, at denne faktisk havde lavet et sådant eksperiment med en noget større asymmetri end den, jeg mente måtte være stor nok, og eksperimentet havde givet fin overensstemmelse med kvantemekanikken lige som alle de andre forsøg. Det var ikke omtalt i nogle af Aspects kendte artikler, men i hans disputats, trykt i Orsay. Tor opfattede det som et modbevis af mine ideer og omtalte det også sådan i sin bog. Jeg var dog ikke tilbøjelig til at tillægge det nogen større vægt; det var ment som et forslag til en nærmere undersøgelse af, hvordan coincidentstøllernes rolle kunne svækkes, men har ikke nogen betydning for min grundlæggende opfattelse af, at disse tællere har en vigtig rolle.

Som følge af mine mange diskussioner med Tor Nørretranders som faglig konsulent på hans bog "Det udelelige" kom jeg i kontakt med Ejvind Larsen på Information, som opfordrede mig til at skrive en udvidet kronik i anledning af Niels Bohrs 100 års fødselsdag den 7. oktober 1985. Det er

så den næste artikel i samlingen, Springet fra København, som jeg fik mange positive reaktioner på. Den skulle være rimelig let at gå til.

Da David Mermin, som jeg i forvejen havde hørt holde foredrag på Bohr Instituttet offentliggjorde sin eminent klare version af Bell-ulighederne og Aspect forsøget i Physics Today, skrev jeg et Letter to the Editor, hvor jeg kritiserede, at Mermin lod som om, at der slet ikke var nogen forbindelser mellem de adskilte dele af apparaturet, når enhver dog kunne se, at der var trukket ledninger hen til coincidenstællerne. Da det kom i novembernummeret, viste det sig, at der var mange andre læserbreve, og Mermin havde skrevet et udførligt svar. Jeg har her aftrykt den del af svaret, som vedrører mit eget brev. Mermin har puttet det i bås med specielt et brev fra Marshall og Santos, som gik ind for et af de såkaldte "loopholes" i afvisningen af lokale skjulte variable. Det kan man ikke bebrejde Mermin, for det fremgik ikke klart af mit brev, at det netop ikke var en skjult variabel teori, jeg havde i tankerne. Det er efter min mening en stor fordel for den videre diskussion, at forskellige teorier kan føre til samme eksperimentelle forslag, nemlig et eksperiment uden coincidenstællere; så er der vel større chance for, at det en gang bliver lavet, og Mermin's svar er et godt argument for dette.

I foråret 1984 havde jeg afholdt en foredragsrække på Folkeuniversitetet i København og var her kommet i kontakt med filminstruktøren Lars Becker Larsen, som havde planer om at lave en film "atomfysik og virkelighed" om Bohr-Einstein diskussionen og Aspect eksperimentet. Jeg var konsulent på filmen, og da den blev solgt til Statens Filmcentral efter at være vist i fjernsynet et par gange, blev jeg bedt om at skrive en artikel til introduktionshæftet. Det er den næste artikel Aspect's eksperimenter - hvad er det, som er så

Indledning

svært at forstå? . Her bygger jeg på Mermin's simple formulering af Bell-uligheden, men i en lidt ændret version, som ligger tættere på de rigtige eksperimenter og ikke forsøger at skjule tilstedeværelsen af coincidentstællerne. Artiklen er beregnet til læsere på et passende "gymnasieniveau", som er i stand til at løse ligninger. Jeg mener egentlig ikke, at en helt umatematisk fremstilling af Aspect eksperimentet er en tilstrækkelig baggrund for den i filmen anslåede stemning af mystik, som understreges af Anders Koppels musik. Det er for billigt blot at fryde sig over, at fysikerne nu har vist, at der er mere "mellem himmel og jord" eller "bag tiden og rummet", som den norske venstrepopulist Erik Damman siger i titlen på sin bog. Når sagen kan fremstilles så simpelt som i Mermins (og min) artikel, bør man lige gøre sig den ulejlighed at mobilisere lidt af skolematematikken for at indse, hvad det er for en slags "sund fornuft" som siges at være blevet modbevist. Jeg er i øvrigt glad for filmen, ikke mindst på grund af dens glimrende interviews med levende fysikere som Alain Aspect, John S. Bell, David Bohm, Holger Bech Nielsen, Abner Shimony og John A. Wheeler.

Jeg anser Bell for den største helt i denne historie, og vil gerne ved denne lejlighed mindes hans indsats kort tid efter den nedslående efterretning om hans død i dette efterår. Han åbnede med sine uligheder helt nye veje i den tilsyneladende så fastfrosne Bohr-Einstein diskussion. At metafysiske spørgsmål kan føre til falsificerbare udsagn var en af Peirces kongstanker, og Bell har leveret det klareste eksempel herpå. Da jeg havde sendt min IMFUFA tekst nr. 93 til adskillige fysikere, modtog jeg kun nogle få svar, bl.a. fra Bell og Shimony. I februar 1986 var jeg i Geneve og besøgte Bell på CERN, hvor vi havde en ca 4 timer lang samtale. Bell kendte ikke Peirce, men havde god kontakt med

Karl Popper, som ringede fra London under samtalen. Det er jo Popper, som er blevet kendt for falsifikationskravet, selv om Peirce var den første til at formulere det. Det viste sig under samtalen, at Bell var mere "Einsteinsk" i sin opfattelse af fysikken end jeg formoder, at Einstein selv har været. Han ville ikke anerkende tilfældighed og irreversibilitet som legitime fysiske begreber og mente ikke, at måleproblemer skulle diskuteres i sammenhæng med kvantemekanikkens grundlag. Emnet "semiotik" fik ham til at gyse, så jeg var noget handicappet i diskussionen. Ikke desto mindre fik jeg et meget sympatisk indtryk af en helstøbt fysiker, som på mange måder var den diametrale modsætning til Niels Bohr. Bell bestræbte sig på at formulere sig så klart som muligt og konfronterede derpå den kendsgerning, at hans ideer havde vist sig at være forkerte, selv om han dog ikke helt opgav jagten efter "smuthuller". Jeg mener, at fysikken har hårdt brug for både Bohr-typer og Bell-typer.

I efteråret 1986 skrev jeg den lille opsats er fysikken realistisk? til et nummer af GAMMA, der som tema havde fysikken på RUC. Jeg har taget den med her, fordi den er en slags programerklæring, der i en noget tilspidset form serverer mine ideer om baggrunden for de mange mærkelige skoledannelser på feltet. Efter hvad jeg har hørt fra en student på NBI, blev artiklen ikke vel modtaget der, især gav min lille historie om Einstein, der laver et afgørende eksperiment med en tobaksdåse og to bøjede søm, anledning til hovedrysten. Jeg håber imidlertid, at artiklen, sat ind i den større sammenhæng her, virker mere forståelig.

I august 1987 deltog jeg i det andet "Symposium on the Foundations of Modern Physics" i Joensuu, Finland. Symposiet havde undertitlen "The Copenhagen Interpretation 60 Years After the Como Lecture". Jeg var den eneste dansker, som bidrog aktivt, og det var med et foredrag "Context and Non-

Indledning

Locality" (IMFUFA tekst nr 144), hvori jeg bl.a. kom ind på den amerikanske pragmatisme, formidlet af William James via Harald Høffding og dens mulige indflydelse på den unge Niels Bohr. Pointen var selvfølgelig, at det var Peirces ideer, som spøjede i baggrunden, og at de burde inddrages mere aktivt for at påvise, at bruddet på Bells uligheder ikke behøvede at være ensbetydende med en opgivelse af den lokale realisme. Den filosofiske del af mit foredrag blev vel modtaget, men forslaget om et eksperiment uden coincidentstølle blev ikke forstået, så vidt jeg kunne bedømme.

En artikel af Erik Rüdinger i GAMMA om dobbeltspalteeksperimentet, i foråret 1988, blev anledningen til, at jeg skrev en længere artikel Kan kvantemekanikken forstås?, som kom i to på hinanden følgende numre af GAMMA i november og december 88. Rüdingers redegørelse var sådan set ikke ny, hvad han også gjorde helt klart, men jeg syntes, at den var god, og at det måtte være en passende anledning til at få startet en diskussion blandt GAMMAS læsere, som må formodes at have en særlig affinitet til den slags spørgsmål. Jeg gjorde mig megen umage med denne artikel og fik da også positive reaktioner på den, men en debat i GAMMA blev det ikke til. Ganske vist kom der et par "officielle afvisninger" af mine synspunkter fra Henrik Bohr og Rüdinger i bladet, men ikke noget, der bare mindede om argumenter.

Den 10. september 1989 var det 150 års fødselsdag for Charles S. Peirce, og den blev behørigt fejret med en international kongres på Harvard, hvortil jeg bidrog med foredraget Peirce as Participant in the Bohr-Einstein discussion. Det var en stor glæde at møde forståelse her, ikke mindst blandt de tilstedeværende fysikere. Jeg skrev også en dansk artikel om samme emne, som blev trykt i det første nummer af det nystartede tidsskrift Almen Semiotik fra Aarhus. Dette nummer var et temanummer om Peirce, som markerer en ny ud-

bredelse af den danske interesse for denne filosof, især dog blandt humanister.

Fra starten af 1988 var jeg kommet på den idé, at man skulle prøve at opstille nogle klassiske scenarier for at modbevise den udbredte opfattelse af Bells teorem, at det udelukker klassiske og lokalrealistiske modeller for kvantekorrelationerne. I marts 88 sammenskrev jeg en artikel "kvantelogik eller semiotik", som dog kun blev cirkuleret til en mindre kreds og aldrig søgt publiceret. Det gennemgående synspunkt er, at man ikke behøver nogen speciel kvantelogik, men at kvantemekanikken eksemplificerer en kontekstuel logik, som også kan være berettiget i klassiske sammenhænge og som er en klar konsekvens af Peirces syn på den formelle logik som et specialtilfælde af semiotikken. Efter at have vist, hvordan Bells uligheder følger af den klassiske, kontekstfrie logik uden antagelser om lokale skjulte variable opstillede jeg så et "klassisk scenario", en fiktiv historie fra det logiske paradis "Smullyana", hvor matematikerne Smullyans "knights" og "knaves" nu fik følgeskab af emsige sociologer, der udsurgte tvillinger om deres medlemskab af tre klubber. Eksemplet var konstrueret således, at det præcist svarede til det af Mermin beskrevne tankeeksperiment og den gennemgang af Aspect eksperimentet, jeg tidligere havde givet i hæftet til Lars Becker Larsens film, men det skulle selvfølgelig ikke opfattes som en "forklaring" af kvantemekanikken, hvilket jeg havde visse vanskeligheder ved at gøre klart, da jeg gennemgik det ved et IMFUFA seminar.

Da den næste Joensuu-kongres afholdtes i august 1990, medbragte jeg en poster-version af eksemplet. Ved den lejlighed kom jeg i diskussion med Anton Zeilinger fra Wien, som præsenterede et nyt tankeeksperiment, han havde udtænkt sammen med Greenberger og Horne (GHZ-eksperimentet). Mermin

Indledning

var også involveret i diskussionen, men ikke med ved kongressen, og det forlød, at han havde en ny artikel under opsejling til *Physics Today*. Jeg måtte hjem på hotelværelset og udtænke en ny Smullyana-historie, som kunne modbevise Zeilingers påstand om, at GHZ-korrelationerne ikke kunne findes i en klassisk model. Eksemplet er medtaget sammen med min poster i den sidste artikel i denne samling Peircean Local Realism Does Not Imply Bell's Inequalities. Denne underlige titel er lavet med den bagtanke, at pointen skulle nå frem til tilskueren ved selv et flygtigt blik på poster-sessionen. Eksemplet fra Smullyana fik et lys til at gå op for Zeilinger, som ved den foregående Joensuu-kongres havde vist sig meget uforstående over for min insisterende pegen på coincidenstællerne. Det var også glædeligt ved denne lejlighed at møde et par eksperimentalfysikere, Herbut fra Jugoslavien og de Baere fra Belgien, hvis tanker gik i samme retning og som gav mig spontan tilslutning, da de overværede min diskussion med Zeilinger.

Lokalrealismen er ikke afgået ved døden, men behøver en indsprøjtning af ikke-positivistisk filosofi for at redde fysikkens status som en logisk konsistent begrebsramme, der er i stand til at opstille falsificerbare hypoteser. Det er mit håb, at denne artikelsamling kan bidrage hertil. Jeg vil gerne udtrykke min taknemlighed over for de mange personer, som i tidens løb har givet mig inspiration og kritik, især hh-klubmedlemmerne Erik Klug Andersen, Mogens Asmussen og Erland Brun Hansen.

Roskilde, november 1990.

Peder Voetmann Christiansen.

Måleproblemer og kvantemekanisk formalisme

(Efter en båndafskrift af to foredrag i "hh-klubben", juni 1971).

1. Beskrivelsesapparatet

Man bruger ofte indenfor naturvidenskaberne ord som "objektivitet" og "saglighed" fortrinsvis til at slå folk i hovedet med og til at forhindre debat. Jeg vil gerne slå til lyd for, at den højt priste objektivitet, som man kører så meget frem med inden for naturvidenskaberne, for en stor del beror på en illusion, og at man måske kan lære noget og erkende den illusoriske karakter af dette objektivitetsbegreb ved at beskæftige sig med sådan noget som informationsteori og specielt måleproblematikken i kvantemekanikken, der i en informationsteoretisk beskrivelse ikke er noget specielt, men snarere et eksempel på meget generelle lovmæssigheder, som jeg mener i høj grad også kan være relevante for samfundsfagene.

Hvad består nu denne objektivitetsillusion i? Ja, meget kort kan man vel sige, at den består i at identificere objektet med beskrivelsen af objektet. Når jeg siger "objektivitetsillusion", betyder det altså ikke, at jeg ikke tror på, at der findes et objekt, for det fører jo i hvert tilfælde til nogle kedelige filosofiske vanskeligheder, hvis man ikke tror på det; men der er en tendens til, at man i en såkaldt objektiv beskrivelse regner med, at de begreber, man opererer med i beskrivelsen, på en eller anden måde er identiske med objektet. Det jeg gerne vil ind på er altså,

at det kan man ikke gøre. Det er måske nogle gange en opfattelse, som kan være berettiget, især når der ikke er nogen særlig vekselvirkning mellem beskrivelsessystemet og det objekt, man beskriver; men i almindelighed er der i høj grad en vekselvirkning mellem beskrivelses- og målesystemet og det objekt, man vil beskrive, og man kan ikke identificere de to ting. Så bør man snarere gøre det, at man indser, at selve beskrivelsesapparatet og målemetoderne er objekter. Det er beskrivelsesapparaterne, der er objekter for informationsteorien og adskillige mere humanistiske videnskaber, og det, man kan gøre sig håb om at forstå, er vekselvirkningen mellem beskrivelsesapparatet og objektet.

Vi kan godt gøre det lidt mere konkret. Jeg sagde noget om, at man ikke kan identificere objektet med det apparat, man bruger til at beskrive det med, og det kan man jo give adskillige eksempler på. Det er meget nemt at finde eksempler inden for de humanistiske fag, eller i hvert tilfælde indenfor hele det område, det har at gøre med - psyken. Det er velkendt, at hvis vi laver en måling af en eller anden psykisk egenskab, så er der tale om en påvirkning fra selve måle-forsøgsopstillingen til det, der skal måles, og det er slet ikke sikkert, det har mening at regne med, at det måleresultat, vi får frem, vil eksistere uafhængigt af beskrivelsen. Vi kan tage som eksempel; hvis jeg spørger en af jer: "hvilket tal tænker du på nu?", så er det helt klart, at den egenskab, jeg vil måle, kommer frem som følge af, at jeg stillede det spørgsmål. Jeg vil ikke regne med, at man normalt sidder og tænker på et tal, men i det øjeblik, jeg stiller spørgsmålet, så melder der sig formodentlig et eller andet tal i hovedet, i hvert tilfælde, hvis jeg kræver et svar. Eller hvis jeg bare spurgte: "hvad tænker du på nu?", så stiller jeg krav om, at det, der nu i øjeblikket befinder sig i hovedet hos den, der spørges - det

skal kunne udtrykkes verbalt, og det er jo normalt ikke meningen - det kræver en ekstra indsats at udtrykke det man har i hovedet verbalt. Det, at vi betjener os af et sprog, det sætter straks en grænse for, hvilke oplysninger, når vi stiller den slags spørgsmål. Det er kun en lille brøkdel af de tanker, man har i hovedet, der er sprogligt formulerede eller lader sig sprogligt formulere.

I enhver form for beskrivelse arbejder man med noget, man kalder variable og tilstande for det system, man beskriver. Jeg tror nok, at man kan tage det som noget ret alment, ligegyldigt hvilken slags måling, der er tale om, og ligegyldigt hvilken videnskab, vi bevæger os indenfor, så kan vi tale om variable og tilstande. Og de variable og tilstande, vi benytter os af, det er egenskaber ved beskrivelsesapparatet, det er ikke direkte egenskaber ved objektet, så det er et subjektivt valg, der fører frem til disse variable og til disse tilstande, som vi så beskriver systemet ved. Ja, her kunne vi nok springe ud i en længere diskussion om subjektivitet og objektivitet, men - min pointe er, at man meget tit er tilbøjelig til at opfatte disse variable, man bruger, som noget der er givet af naturen; men i virkeligheden er det jo noget, vi må aftale. Altså der kan højst blive tale om intersubjektivitet i første omgang, og hvis vi så kan blive enige om en bestemt måde at beskrive systemet på, et bestemt sæt variable, ud fra et eller andet kriterium særlig praktisk og særlig bekvemt, så får den beskrivelse et skær af objektivitet, og så er man tilbøjelig til at identificere det, man beskriver, med selve beskrivelsen.

Lad os se lidt på det her tilstandsbegreb. Vi kan tale om nogle variable - det kan være nogle størrelser, vi kalder x_1 , x_2 , x_3 , osv., og disse variable vil så have nogle værdier. Man kan tænke på disse værdier som nogle tal. Man

kan altid bruge tal til at identificere de forskellige størrelser, man arbejder med, altså hvad enten det nu er det man bruger i beskrivelsen eller ikke, så kan man altid tænke på det som værende tal, der repræsenterer alt i et system. Tilstanden beskrives således ved et sæt af variable værdier, - en tilstandsvektor. Med en vektor forstår vi her en ordnet samling (x_1, x_2, x_3, \dots) af variable værdier, og når vi har hele det skema fyldt ud med alle de variable, der kan være tale om, så kan vi snakke om, at vi kender tilstanden, så kan vi bruge et eller andet abstrakt symbol på den, f.x. det, der står her $|\{x\}\rangle$. Det er en tilstandsvektor - og det er altså noget, som vi har valgt, det er en del af beskrivelsesapparatet. Når vi har valgt vore variable og har indset hvilke værdier, disse variable kan have, så har vi defineret, hvad vi forstår ved systemets tilstande. Og så kan man begynde at snakke om, hvor meget man nu ved om systemet. Kender man tilstanden for systemet eller kender man ikke tilstanden.

Har man et vist begrænset kendskab til systemet, så kan det beskrives ved, at vi tilordner de forskellige tilstande $|\{x\}\rangle$ hver en sandsynlighed $P(\{x\})$, og når vi således ud fra vort kendskab til systemet har defineret en passende sandsynlighedsfordeling over mængden af tilstande, så kan vi i forbindelse med den sandsynlighedsfordeling definere noget, der hedder entropi - det er et mål for, hvor meget, vi mangler at vide om systemet; det vil jeg komme tilbage til senere. Men det afgørende er, at når vi har lagt os fast på en sådan beskrivelse med variable, værdier og tilstandsvektorer, og derpå taler om vores kendskab til systemet, så refererer det altid til denne beskrivelse. Altså, det er meningsløst at tale om kendskab til et system, hvis man ikke refererer til en eller anden bestemt beskrivelsesmetode, fordi man ikke kan identificere systemet med en beskrivel-

sesmetode. Og så kan man altså sige, at når vi har lagt os fast på et sådant beskrivelsessystem, så kan vi have et fuldstændigt eller et ufuldstændigt kendskab til systemet. Og et fuldstændigt kendskab til systemet, det vil altid sige, at vi er i stand til at sige med sikkerhed (sandsynlighed 1), at én bestemt tilstand foreligger. Så den eneste måde, hvorpå vi kan definere "fuldstændigt kendskab", det er ved at referere til beskrivelsessystemet. Hvis vi igen tænker på "tænk-på-et-tal-eksperimentet", så har jeg "fuldstændigt kendskab", når jeg har hørt svaret "17". Men så kan jeg selvfølgelig sige, (når man nu stadig holder sig til det med tallet), at det fuldstændige kendskab, jeg får til tilstanden ved en sådan måling, det kan ikke bruges til ret meget. Jeg kan f.x. ikke bruge det til at forudsige noget om, hvad der vil ske, når jeg næste gang stiller det samme spørgsmål. Det hjælper ikke spor med den måling, hvor jeg kun får oplyst den ene ting. Den giver altså ikke mulighed for at lave det, man kan kalde en deterministisk beskrivelse af systemet, hvilket ville give mig fuld kontrol over det objekt, jeg måler på, altså en person i dette her tilfælde. Og så vil man, når man er fysiker være tilbøjelig til at sige - nåh, jamen der er jo også mange skjulte variable i denne her situation. Der er en mængde ting, som man i virkeligheden ikke har fået rede på; der er en mængde andre ting, som bestemmer udviklingen, som er bestemmende for, hvilket resultat, vi kommer frem til næste gang. Men det er i hvert tilfælde noget, vi ikke refererer til i den beskrivelsessituation, vi har lagt os fast på, og hvis jeg skal have fat i de andre ting, så bliver jeg nødt til at definere en helt anden beskrivelsessituation, som betyder kendskab til noget helt andet.

2. Determinismen .

Lad os nu se på, hvordan det er i fysikken. Da jeg nævnte begrebet fuldstændigt eller ufuldstændigt kendskab til et system, førte det os ind på begrebet determinisme, som på en eller anden måde ligger bag ved det hele. Det er noget, vi gerne vil arbejde os hen imod. Determinisme er noget med at kontrollere objektet fuldstændigt, således at man er i stand til at forudsige tilstanden til ethvert tidspunkt, hvis man bare kender den på ét tidspunkt. Og det er jo strengt taget uopnåeligt i de fleste videnskaber. I psykologien, f.x., kan man ikke regne med, at det skulle være muligt at gennemføre en fuldstændig deterministisk beskrivelse - det ville jo i hvert fald udelukke, at der er personer, som er i besiddelse af egen fri vilje.

Streng determinisme er således nok noget specielt for fysikken. Jeg vil egentlig mene, at det er det eneste specielle - og det er endda specielt for kvantemekanikken, at det er muligt i princippet at gennemføre en deterministisk beskrivelse. Det lyder måske nok mærkeligt for jer, hvis I har hørt noget om kvantemekanikken før, fordi normalt plejer man at sige om kvantemekanikken, at den ikke giver nogen deterministisk beskrivelse, men den giver en beskrivelse, som man kan kalde statistisk kausalitet, i modsætning til den klassiske fysik, der giver en fuldkommen deterministisk beskrivelse. Det vil jeg dog vende om. I kvantemekanikken er det principielt muligt at lave en deterministisk beskrivelse (vi skal selvfølgelig først blive klar over, hvad det indebærer), hvorimod i den klassiske mekanik er det principielt umuligt at lave en fuldstændig deterministisk beskrivelse.

Lad os lige se lidt på den klassiske mekanik først. I den klassiske mekanik er det givet på forhånd, hvilket beskrivelsessystem, vi følger. Jeg tænker på en partikel.

Den har en vis masse, siger man, og vi kan tale om at måle dens sted og dens impuls. Og så siger man i den klassiske mekanik, at hvis vi kender stedet og impulsen til én tid for denne her partikel, og selvfølgelig dens masse og de kræfter der styrer systemets udvikling, så kan vi beregne stedet og impulsen til hver en tid. Det er altså de variable i dette tilfælde. Altså hvis vi kender værdierne af disse variable på ét tidspunkt, så kan vi sige alt om, hvad de skal være til enhver tid, både i al fremtid og i al fortid. Det er den klassiske deterministiske beskrivelse. Man må have nogle betingelser opfyldt, for at det kan gennemføres. Det er jo meget enkelt, at en deterministisk beskrivelse forudsætter kendskab til det, man kalder kræfterne. Eller man kan også sige systemets Hamiltonfunktion - energien udtrykt som funktion af stedet og impulsen for partiklen eller de partikler, der indgår i systemet. Normalt kender vi ikke de kræfter, der styrer udviklingen i systemet. Dette gør vi kun, hvis systemet er isoleret. Altså hvis det er fuldkommen ude af kontakt med andre dele af universet, så vi kan sige: dér har vi en kasse med en væg, som er fuldstændig uigennemtrængelig for alt, og inden i den kasse befinder systemet sig. Kun da kan vi sige, at vi kender kræfterne fuldstændigt, for hvis denne væg er gennemtrængelig for en eller anden forstyrrelse udefra, så er det klart, at vi ikke kan kende disse kræfter fuldstændigt - og så kan vi ikke løse vor bevægelsesligning; der kommer et ukendt element ind i den, således at vi ikke får mulighed for at gennemføre en deterministisk beskrivelse. Så det skal altså være fuldstændig isoleret, for det første, det system, og så kan man jo sige: nåh ja - så er det ikke så forfærdelig relevant måske - fordi hvis et system er fuldstændig isoleret fra alt, så kan vi jo aldrig nogen sinde få noget at vide om det. For at vi overhovedet skal få noget at vide om et system, så er det nødvendigt, at

vi måler på det - det vil altså sige, at vi bryder dets isolation - sætter os i kontakt med det ved en eller anden energistrøm, som passerer mellem systemet og os. Og så påvirker det altså systemet, og så er denne forudsætning om et fuldstændigt kendskab til de kræfter, der styrer udviklingen, i hvert fald ikke opfyldt, så længe vi måler. Nåh ja, siger man så i fysikken - men den måling, der er tale om, den kan gøres vilkårlig svag; altså den påvirkning, der er tale om når vi laver en måling, den kan gøres vilkårlig lille, og altså kan vi komme til at kende disse kræfter med vilkårlig god tilnærmelse. Det er den ene ting, der viser, at deterministisk beskrivelse kun kan opnås i grænsen i den klassiske fysik.

Men der er også en anden ting, fordi forudsætningen for at gennemføre en deterministisk beskrivelse, det er jo altså, at vi kender stedet og kender impulsen af en partikel til et bestemt tidspunkt. Lad os ikke diskutere tidsmåling, det regner vi med, at vi kan kontrollere - - men hvordan kan vi komme til at kende stedet og impulsen? Ja det kan vi altså gøre ved at lave en måling. Men hvor store krav skal vi stille til den måling i den klassiske fysik? Ja, der skal vi i virkeligheden stille uendelig store krav, hvis vi skal kunne gennemføre en deterministisk beskrivelse, fordi disse ting er kontinuerte. De variable, vi tænker på at måle, de er beskrevet ved reelle tal, og hvis vi skal angive et reelt tal, så skal vi principielt gøre det ved at angive en uendelig decimalbrøk, f.x. $\pi = 3.14159265\dots$. Hvis vi skal være sikre på, at dette reelle tal virkelig er π , så skal vi altså have mål på mægtig mange decimaler, dvs. det kan vi aldrig nogen sinde være sikre på; det har ikke nogen mening at tale om en fuldstændig bestemmelse af sådan en kontinuert variabel. Vi kan udtrykke det informationsteoretisk ved at sige, at en deterministisk beskrivelse i klassisk fysik

kræver en information på uendelig mange bits. Antallet af bits er det antal cifre, man skal bruge i et totals-system til at udtrykke sin information med.

Opskriften på en deterministisk beskrivelse er principielt uigennemførlig i den klassiske mekanik, fordi den for det første vil kræve et fuldstændig isoleret system, og for det andet fordi en fastlæggelse af begyndelsesbetingelserne vil kræve en uendelig stor information. Så det er altså kun noget, man kan tænke på som en grænse i en approximativt deterministisk beskrivelse.

I den klassiske fysiks tid fik man jo et meget mekanistisk billede af universet, fordi man hele tiden forestillede sig at nå til denne grænse. Man talte f.x. om et væsen, Laplaces dæmon, det var Vorherre eller sådan en. Han var i besiddelse af al information om universet på et eller andet tidspunkt - og så var han desuden så god til at regne, at han kunne løse bevægelsesligningerne på ingen tid, og han kunne derfor sige fuldkommen sikkert, hvordan universet ville udvikle sig - intet var skjult for ham. Og det er jo absurd af flere grunde. Først og fremmest fordi man kunne sige, hvad med ham der Laplaces dæmon, på hvilken måde indgår han i universet? Man kan måske forestille sig indenfor den klassiske fysik, at han sad uden for universet og kunne beskrive alt det, der er derinde med vilkårlig god tilnærmelse, men man kan ikke forestille sig denne dæmon indgå i en sluttet beskrivelse af universet. Fordi det, at han indsamler al den information om universet, det betyder jo, at den information må lagres et eller andet sted. Når vi gennemfører en eller anden beskrivelse af et system, så opretter vi i og for sig et nyt system, nemlig beskrivelses-systemet, som kræver nogle fysiske medier, hvortil denne information kan overføres.

Hvis vi taler om en reel "dæmon", så vil det f.x. være

de forskellige kodningsindretninger, vi har, eller det kan være en eller anden mægtig stor computer, som man bruger til at lagre sine resultater på. Og når vi nu taler om fysiske systemer, der jo som regel er ret små og simple i sammenligning med de systemer, man normalt studerer inden for samfundsvidenskaberne f.x., så er der det særlige forhold mellem objektet og beskrivelsesapparatet, at beskrivelsesapparatet er meget større end det, man studerer. Altså hvis vi skal beskrive en elektron f.x., så kræver det, at vi udtrykker informationen om denne her elektron på et eller andet medium, og dette medium det kræver i hvert fald, at en hel del flere elektroner bliver aktiveret på en eller anden måde. Altså, før vi prøver at gennemføre en beskrivelse, så behøver vi et andet system, som vi påvirker, og vi kan ikke tro på, at vi på en eller anden måde kan få kontrol over det hele og vide om alle mulige variable, hvilken værdi, de har til en bestemt tid, fordi det medium, som vi bruger til at udtrykke vor information på, det vil i hvert tilfælde altid være uden for beskrivelsen, og jo mere vi prøver på at gennemføre en sådan fuldkommen deterministisk beskrivelse, jo mere uorden laver vi omkring os, jo større og jo flere systemer vil det være nødvendigt for os at påvirke på en eller anden uforudsigelig måde. Så på den måde kan man altså sige, at Laplaces dæmon bliver udmanet. Og hele begrebet - et altomfattende deterministisk forløb - viser sig faktisk som en absurditet i den klassiske fysik; hvis man går så langt som til at indse, at beskrivelsesapparatet også er et gyldigt system, så kan man se, at bliver absurd at forestille sig, at man på en sådan måde kan skaffe sig kontrol over det hele. Tværtimod, kan man sige, hvis man virkelig vil have så god kontrol som muligt, så skal man i virkeligheden lade være med at foretage sig noget som helst - acceptere tingene, som de er, og lade være med at forsøge

at udtrykke informationer om dem i et andet sprog og på et andet medium. Jo flere bestræbelser, man udfolder af den art, jo mere uorden laver man i virkeligheden omkring sig. Så jeg vil gerne sige, at denne illusion, eller hvad man nu vil kalde Laplaces dæmon - tanken om et fuldkommen mekanisk univers, hvor man i princippet kan forudsige det hele, den hænger sammen med den illusion, som jeg nævnte før - nemlig objektivitets-illusionen, at man kan identificere objektet med det, man beskriver det med. Man ser altså bort fra, når man falder for denne mekanistiske tanke, at enhver beskrivelse af et system i sig selv definerer et nyt system, så kun ved at lave godt med uorden andre steder, kan man måske nok få kontrol et enkelt sted.

3. Information og determinisme i kvantemekanikken .

Nu vil jeg give en kort beskrivelse af, hvordan man laver en deterministisk beskrivelse i kvantemekanikken. Det er noget, som stadigvæk diskuteres temmelig meget, spørgsmålet om determinisme eller ikke-determinisme i kvantemekanikken. Nogle interpretationer forsøger sig med en opfattelse, som nærmest er inspireret af den klassiske fysik og i høj grad bygger på denne illusion, at objektet har nogle egenskaber, som i virkeligheden er egenskaber ved beskrivelsen. Da så statistiske elementer kommer ind i sammenhængen, arbejder disse interpretationer med nogle størrelser, man kan kalde skjulte variable. Jeg vil ikke komme ind på disse ting, men bare bruge det til at belyse den illusion, som jeg mener ligger til grund for sådan nogle spekulationer, som den om Laplaces dæmon. De trives i høj grad den dag i dag, og de trives måske mere, end de fleste fysikere vil være ved!

Den interpretation, som jeg vil gøre mig til talsmand for, det er nærmest københavner-interpretationen - en udvidet københavnerinterpretation, som forsøger at tage informationsteorien med, og den går nærmest tilbage til to ungarere, John v. Neumann og Leo Szilard, som begge gjorde sig bemærkede i tyverne med artikler om interpretation af kvantemekanikken. De blev ikke rigtig påskønnede - Neumann måske nok, men ikke så meget fordi disse interpretationer bygger på informationsteori, som var et fuldstændig ukendt begreb dengang. Der havde været nogle spekulationer før i tiden, der ligesom ledte op til informationsteorien, og det var først og fremmest spekulationer over denne Maxwells dæmon, altså spørgsmålet, om det er muligt at lave en evighedsmaskine af anden art, hvis man får passende informationer om systemet. Det var Maxwells dæmon, som tidligt viste, at beskrivelsessystemet og den information, vi var i besiddelse af, i høj grad var bestemmende for, hvad man egentlig kunne få ud af sådan et fysisk system. Hvis vi har passende informationer om en eller anden fluktuerende variabel i et glas vand, så kan vi udnytte disse tilfældige bevægelser til at lave ordnede bevægelser, så kan vi lave det, vi kalder en evighedsmaskine af anden art. Og sådanne ting havde man altså tænkt på før, men det var ligesom ikke rigtig trængt frem i frontlinjen, og artikler i tyverne, hvor man indførte Maxwells dæmon i forbindelse bl.a. med spekulationer om kvantemekanikkens målinger, de blev ikke rigtig kendt.

En evighedsmaskine af første art, det er jo det, de fleste evighedsmaskinekonstruktører prøver at lave. Det er sådan noget med vand, der løber rundt på nogle skovlhjul; den kører og kører og skal ikke have tilført nogen energi, men alligevel kan den udføre arbejde. Det er en evighedsmaskine af første art. Den er umulig at lave, hvis vel at

mærke energien er bevaret - og det tror vi, den er. Det er en af de mest grundlæggende sætninger i fysikken; den kan vi dårligt undvære, så altså en evighedsmaskine af første art, den er der ikke så meget ved at spekulere på. En evighedsmaskine af anden art er mere subtil - den omdanner varme til f.x. mekanisk energi uden bivirkninger. Vi ved jo, at varme er uordnede bevægelser af molekylerne. Hvis vi ser igennem et mikroskop på en bakteriekultur, så vil vi se, at bakterierne farer frem og tilbage på en ret tilfældig måde, som om de bliver ramt af en masse stød, hvad de altså også gør. Når man får øje på en bakterie, som udfører tilfældige bevægelser, så kan man sige: al den bevægelse, som ingen ser, kan vi ikke udnytte den til noget fornuftigt? Så kunne man f.x. få den idé, at man giver en af disse bakterier et selvoptrækkende armbåndsursur på; det er jo netop noget, som omdanner uordnede tilfældige bevægelser til mekanisk energi, og hvis vi giver alle bakterierne et selvoptrækkende armbåndsursur på, og så samler disse armbåndsursure sammen bagefter, så har vi en hel masse energi oplagret dér, som så kunne bruges til noget fornuftigt. Og der har vi altså en fuldkommen tilsvarende sætning i fysikken, som siger - sådan en evighedsmaskine kan man heller ikke lave. Princippet er jo godt nok, men der er jo det, at man ikke kan lave armbåndsursurene så små. Hvis man forsøgte at lave sådan et lille armbåndsursur, så ville man hurtigt opdage, at alle de forskellige dele, et armbåndsursur består af, som gerne skulle sidde på deres bestemte pladser, de ville også fare fuldkommen vildt frem og tilbage - og det ur ville altså ikke kunne fungere, hvis man forsøger at lave det så småt.

Ja, vi skulle jo snakke om kvantemekanikken. Og der er altså to ting, som er helt særlige for kvantemekanikken, som man ikke finder i samfundsvidenskaberne, vil jeg mene. Den ene ting er, at det er principielt muligt at lave en

fuldstændig måling for et isoleret system, uden at man skal komme i besiddelse af et uendeligt antal bits. Man kan få fuldstændig information om et isoleret system med et endeligt antal bits.

Den anden ting er, at det er muligt, når vi har foretaget en fuldstændig måling, at gennemføre en deterministisk beskrivelse for et isoleret system. Det er altså en helt anden form for determinisme end i den klassiske fysik. Denne form for determinisme er ikke nogen uopnåelig utopi. Vi skal bare have et vist nødvendigt antal bits, så får vi tilstanden for systemet. Når vi har lavet en fuldstændig måling, og hvis der ellers er tale om et isoleret system, så kan vi finde tilstanden til enhver tid ved at benytte os af en bevægelsesligning.

I det øjeblik vi måler på systemet, så bryder vi systemets isolation, men når vi har målt på systemet, så kan vi godt sige, nu er det isoleret, nu rører vi ikke mere ved det. Og det er kun muligt at gennemføre en deterministisk beskrivelse, så længe systemet er isoleret, altså når vi er færdige med at måle.

Lad os nu sige, at vi har lavet en sådan måling, og så berører vi ikke længere systemet. Så kan vi i hvert tilfælde tro på, at lige når målingen er forbi, så har vi det rigtige kendskab til systemets tilstand. Lige når den er forbi. Klokkeren nul. Lad os sige, at vi har lavet denne fuldstændige måling kl. nul, og så er vi interesserede i at finde tilstanden for systemet klokken t . Nu har jeg ikke talt om, hvordan de tilstande er definerede, men vi har altså noget, man kan kalde tilstande for systemet, og hvis vi har tilstanden til ét tidspunkt, hvilket vi altså kan få ved at lave en fuldstændig måling, så kan vi løse Schrödingerligningen, som er en differentiaalligning mht. tiden - den ser sådan ud, det kan være lige meget - men her står den:

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\Psi(t)\rangle = H |\Psi(t)\rangle$$

På højre side har vi den lineære Hamiltonoperator H , som repræsenterer energien og virker på tilstanden til tiden t , og det giver så i det væsentlige den tidsafledede differentialkvotient af tilstanden til samme tid. Når vi har sådan en første ordens differentiaalligning som bevægelsesligning og vi kender begyndelsestilstanden fuldstændig nøjagtigt, så har den ligning en entydig løsning til hver en tid. Den kan vi finde, og så har vi en deterministisk beskrivelse. Operatoren H indeholder al information om kræfter, der styrer udviklingen, lige som den klassiske Hamiltonfunktion, og det er systemets energi, som i denne formalisme repræsenteres ved en lineær operator. Men det er altså lige for at vise, at vi har en deterministisk beskrivelse, og så er spørgsmålet, hvad skal vi stille op med den? Hvad er denne tilstandsfunktion, hvad kan den bruges til?

Når vi taler om en fuldstændig måling, mener vi i almindelighed en måling, som sætter os i stand til at gennemføre en deterministisk beskrivelse. Kvantemekanikkens relevans for andre videnskaber består således i, at den peger på eksistensen af et elementært beskrivelsesniveau, som ligger under enhver anden beskrivelse. Kun i relation til det elementære beskrivelsesniveau har det mening at tale om mikro- og makro-beskrivelser.

Vi kan f.x. specificere en makrotilstand for et glas vand ved at sige: rumfang 1 dl., temperatur 20°C. Til en sådan makrotilstand svarer et uhyre stort antal kvantemekaniske mikrotilstande, så hvis vi vil udnævne én af mikrotilstandene til at være den faktisk foreliggende kl. nul, må vi ved en måling skaffe os en hel masse ekstra information, som ikke ligger i makrobeskrivelsen. Størrelsen

af denne ekstra information er netop det, vi kalder entropien af systemet. For vores glas vand er den ca 10^{25} bits. Vi har derved fået præciseret, at vores glas vand er et stort system i absolut forstand. Eksistensen af det deterministiske "gulv" for de mulige beskrivelser af samme system løser de paradokser, som i den klassiske fysik var knyttet til definitionen af entropien. En absolut entropidefinition er nødvendig for forståelsen af kemiske ligevægte, fordampning og strålingsligevægt. Det er derfor ganske logisk, at kvantemekanikken er opstået ud af en termodynamisk analyse af den elektromagnetiske hulrumsstråling (Planck); de atomfysiske overvejelser (Bohr, Heisenberg) kom først i anden omgang.

Nu vil vi lige tale lidt mere om denne fuldstændige måling, og hvordan vi foretager den. For det første har vi kun brug for at kende et endeligt antal bits. Måleresultatet kan udtrykkes i en endelig form; der er ingen grund til at spørge om mere nøjagtige værdier, end vi har fået, når der foreligger en fuldstændig måling. Og det hænger sammen med, at de måleresultater, der kan blive tale om for et isoleret system - de er altid diskrete. De er altså ikke kontinuerte. Hvis vi ser på en eller anden variabel, kald den A - og så ser på, hvilke værdier den kan antage (det er altså dens talværdi, vi vil kalde a), så er det ikke længere et kontinuum af værdier, der er tale om, men en diskret mængde. De ligger altså på en eller anden måde skelneligt fordelt på talaksen, a_1, a_2, a_3, \dots , sådan at det kun er nødvendigt at afgrænse et interval. Når som helst vi angiver en decimalbrøk, er der et tilhørende interval, svarende til usikkerheden på sidste decimal, og hvis det interval så omfatter netop én af de værdier, som den diskrete variabel kan have, så er vi klar over, at det er den værdi, der foreligger. Så det eneste krav, vi må stille til antallet af bits er, at

decimalbrøken skal være så lang, at usikkerhedsintervallet er mindre end afstanden mellem de diskrete værdier, den variable kan have. Det er således diskretheden, som er det afgørende for kvantemekanikken, som sætter os i stand til at lave en fuldstændig måling. Nu kan det godt være, at vi ikke har fuldstændigt kendskab til systemets tilstand, når vi har lavet én måling af denne størrelse. Men så kan vi måske måle flere størrelser på samme tid, flere A 'er - og for hver af dem får vi en værdi fuldkommen entydigt fastlagt, og ud fra disse værdier kan vi så konstruere tilstandsvektoren svarende til den måling, vi lige har lavet. Lad os nu bare tænke på, at vi på en eller anden måde skraber alle de egenskaber, vi har brug for at måle, sammen i én stor egenskab, som vi kalder A . Det er den egenskab, vi måler, og når vi har fået dens værdi, så har vi et fuldstændigt kendskab til systemets tilstand. Så kender vi tilstandsvektoren lige efter målingen. Denne kan altså karakteriseres ved, at vi opgiver måleresultatet ved den måling; så er den karakteriseret fuldstændigt. Så det vil bare sige, at når vi har udtrykt måleresultatet a_n , så kan vi symbolisere tilstanden med sådan en ting her $|a_n\rangle$ - sådan en slags klamme (en "ket"), hvor vi skriver måleresultatet inden i. Det er så tilstandsvektoren lige efter målingen. Og det vil altså sige, at når vi har måleresultatet, så fastlægger det entydigt denne tilstand. Men det tilstandsbegreb, man arbejder med ifølge den deterministiske beskrivelse med Schrödingerligningen er mere alment. For de tilstande, vi kan skrive op sådan her $|a_n\rangle$, de refererer kun til en situation lige efter, at vi har målt størrelsen A . I almindelighed kan vi selvfølgelig ikke uden videre tilskrive systemet sådan en egenskab som en bestemt værdi af denne observabel; så ville vi jo være faldet for denne objektivitetsillusion igen. Altså, vi må indrømme, i almindelighed, når vi ikke lige

netop har målt denne størrelse, så kan vi ikke uden videre beskrive systemet ved at sige, at det er i en af disse tilstande $|a_n\rangle$. Vi har altså brug for et mere abstrakt tilstandsbegreb - en form for tilstande, som vi kan beskrive systemet med, når det ikke lige netop har været i vekselvirkning med et måleapparat. Og da siger kvantemekanikken nu, at disse tilstande, som vil komme frem lige efter en måling, de danner et fuldstændigt sæt i den forstand, at en hvilken som helst tilstand kan skrives som en såkaldt superposition af disse tilstande. Altså at en hvilken som helst anden tilstand kan skrives som superposition af disse basistilstande $|a_n\rangle$, dvs. som en sum af led, som hver for sig er proportional med en af disse tilstande. Det skriver man på følgende måde:

$$|\psi\rangle = \sum_{n=1}^{\infty} c_n |a_n\rangle$$

Det betyder altså en sum over alle mulige n'er af et tal c_n gange en basis-tilstandsvektor. Det er altså fuldstændighed i kvantemekanikken. Tallene c_n er komplekse:

$$c_n = a_n + b_n i$$

hvor a og b er reelle tal, og $i = \sqrt{-1}$ er den imaginære enhed, som også indgår i Schrödingerligningen.

Når vi taler om en eller anden fuldstændig måling, så skal man først have fat i den variable, eller det sæt af variable, som definerer den fuldstændige måling, og det vil så altid - siger kvantemekanikken - ligegyldig hvilken egenskab det er, der er trukket frem, definere et fuldstændigt

sæt af basistilstande, som refererer til den bestemte type måling. Bølgefunktionen eller tilstandsvektoren kan så altid skrives på denne måde som en superposition.

Så kommer anden del af fortolkningen. Den siger noget om betydningen af talkoefficienten c_n . Den siger nemlig, når vi nu foretager en måling, efter at systemet har været overladt til sig selv et stykke tid, så vil disse koefficienter have noget at gøre med sandsynligheden for, at vi finder en bestemt basistilstand. Vi tænker nu på den situation, at vi kl. nul har lavet en måling af vores størrelse A. Så ved vi kl. nul, at systemet er i en sådan basistilstand $|a_n\rangle$, og det betyder så, at på det tidspunkt er én af disse koefficienter c_n lig med én, og alle de andre er nul. Og så kan vi altså sige, at nu ved vi, at systemet er i tilstanden $|a_n\rangle$, dvs. sandsynligheden er én for, at systemet er i denne tilstand, og alle de andre sandsynligheder er nul. Så på dette tidspunkt er det nemt nok. Men så siger reglen videre: Når vi nu har overladt systemet til sig selv et stykke tid og ladet det udvikle sig i overensstemmelse med Schrödingerligningen, så kommer vi frem til en tilstand, hvor disse talkoefficienter ikke længere har den egenskab, altså hvor der er en vis spredning, sådan at flere af dem er forskellige fra nul. De forskellige c_n er har så stadigvæk den betydning, at hvis vi tager den numeriske værdi af dette tal - komplekse tal - og opløfter det til anden potens, m.a.o. danner "absolutkvadratet" $|c_n|^2$, så får vi sandsynligheden for, ved en fornyet måling, at finde systemet i tilstanden $|a_n\rangle$. Vi kan antage, at i tiden fra kl. nul til kl. t har systemet passet sig selv. Når systemet er isoleret, kender vi fuldkommen de kræfter, der styrer udviklingen. Det gør vi ikke i almindelighed, men vi kan i hvert tilfælde tænke på situationer, hvor vi gør det. Altså nu tænker jeg på meget, meget simple systemer, f.x. en elektron, der kredser uden om

et atom. Der forestiller vi os, at vi kan kende de kræfter, der styrer systemets udvikling fuldkommen, så længe vi ikke piller ved det. Og det forudsætter bl.a., at vi ikke måler på det.

Så tager vi Schrödingerligningen og løser den, og finder tilstanden til tiden t , og den kan så på entydig måde skrives som en superposition, hvor talcoefficienterne c_n udviser en vis spredning. De svarer ikke længere til nogen fuldkommen skarp fordeling, men vi kan stadigvæk sige, at sandsynligheden for at finde måleresultatet a_n ved en ny måling kl. t er lig med absolutkvadratet $|c_n(t)|^2$.

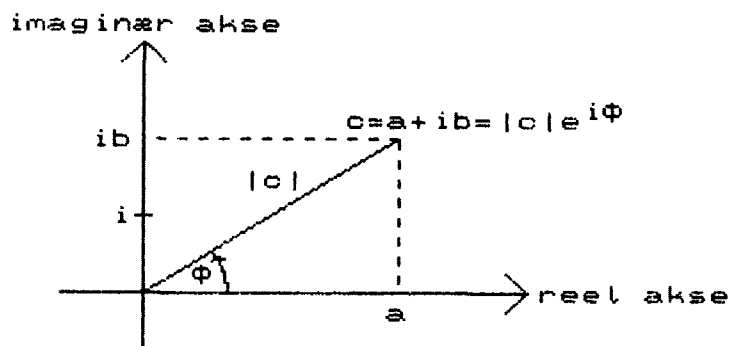
Hvis vi ikke havde løst Schrödingerligningen, så ville vi ikke have haft et så detailleret kendskab til situationen kl. t , det er klart, men nu ser vi altså på det optimale, det bedste vi overhovedet kan gøre for at komme i retning af en deterministisk beskrivelse. Ved den oprindelige måling har vi præpareret systemet til at være i en basistilstand. Det indgreb, vi har lavet, er af en sådan art, at det altid efterlader systemet i en af disse tilstande $|a_n\rangle$. Det måleapparat, vi bruger, kan sammenlignes med et net med nogle diskrete masker, og systemet havner efter indgrebet i en af disse masker. Vekselvirkningen mellem måleapparatet og systemet bevirker, at systemet bliver sat i bås; lige når vi har lavet målingen, så er systemet i en af båsene eller maskerne, men så holder vi op med at måle, og systemet passer sig selv, og så kan vi sige, at det kendskab, vi havde til systemet lige efter målingen, det bevares nu i kraft af Schrödingerligningen, som er mekanikken, der udvikler sig uforstyrret og deterministisk, til vi næste gang forsøger at lave en måling. Når vi så laver en ny måling, så putter vi igen systemet i en af båsene, og så kan vi ikke længere bruge en deterministisk beskrivelse. Vi kan altså ikke sige, at når vi laver den måling, så får vi det og det bestemte

resultat, men vi kan sige noget mere ubestemt ifølge kvantemekanikkens regel. Vi kan opgive nogle sandsynligheder for at få de forskellige mulige udfald, og disse sandsynligheder er givet, hvis koefficienterne $c_n(t)$ er fundet ved løsning af Schrödingerligningen.

Vi arbejder således med et noget abstrakt tilstandsbegreb i kvantemekanikken. Når vi opgiver en tilstand på den måde, så lægger vi i og for sig en information ind i beskrivelsen, som ikke direkte har relevans til den måling, vi skal til at lave. For disse tal c_n er ikke fuldstændig bestemt ud fra sandsynligheder. Det, vi er interesserede i, er sandsynlighedsfordelingen for at få de forskellige værdier ud, men den beskrivelse, vi har nødvendig, fordrer faktisk noget mere information. Det er ikke nogen fuldkommen deterministisk beskrivelse, der er tale om her, fordi der kommer sandsynligheder ind i billedet, men det er heller ikke nogen fuldkommen statistisk beskrivelse, fordi vi har en forskrift, som for de tidsrum, hvor vi ikke rører ved systemet, giver os mulighed for at forudsige tilstanden af det. Der er for såvidt ikke noget særligt, der udmærker måleprocessen fremfor så mange andre måder, systemets isolation kan brydes på. Når som helst isolationen brydes, påvirkes systemet på en eller anden måde, som vi ikke kan beskrive med det begrebsapparat, vi har sat op fra starten. Og så kommer der altså et element af tilfældighed ind i billedet. Når vi kobler systemet til måleapparatet, så kender vi ikke længere de kræfter, som styrer udviklingen, fuldstændigt, og så er vi ude af stand til at gennemføre en deterministisk beskrivelse - i hvert fald med de rammer, vi fra starten har sat op. De rammer går ud på, at vi interesserer os for dette afgrænsede system. Vi har en beskrivelse, som går på dette specielle system, men vi har ikke taget måleapparatet med i vor beskrivelse på samme detaljerede måde. Og så er det jo

ikke så underligt, at der kommer sandsynligheder ind i billedet, og den proces, der sker når måleapparatet kommer til beskrives statistisk i stedet for deterministisk. Det er altså et logisk muligt tilstandsbegreb, vi arbejder med her. Disse tilstande refererer bare ikke alene til den målesituation, der er tale om. Det eneste, der refererer direkte til målesituationen, er sandsynlighedsfordelingen $P_n = |c_n|^2$. Tilstanden har altså noget at gøre med målesituationen, men den indeholder også noget information, som vi ikke direkte kan få ud med den måleproces. Den indeholder nemlig en ekstra information i kraft af, at disse koefficienter c_n er komplekse tal, men de sandsynligheder, der refererer til måleopstillingen, er reelle tal. Hvis vi kun kendte sandsynlighederne, ville vi ikke være i stand til at korrelere dem entydigt med tilstandene, m.a.o. vi kan konstruere mange forskellige tilstande, som giver den samme foreskrevne sandsynlighedsfordeling.

Man kan skrive disse komplekse tal på en anden måde. I ved godt, hvordan man afbilder komplekse tal - i en plan - og et komplekst tal c svarer så til en vektor i denne plan.



Vi skriver $c = a + ib$, hvor de reelle tal a og b kaldes hhv. realdelen og imaginærdelen af c . Længden af denne vektor er $\sqrt{a^2+b^2}$. Denne størrelse kaldes den numeriske værdi af tallet c og betegnes $|c|$. Hvis vi tænker på dette tal c som en af de koefficienter, der bestemmer tilstanden, så er dets numeriske værdi det eneste ved tallet, der har direkte relation til måleopstillingen, og den angiver kvadratroden af sandsynligheden. Derimod kan vi sige, at vinklen ϕ mellem tallet c og den reelle akse, den har ikke direkte noget at gøre med målesituationen, den er ekstra information, som vi putter ind i beskrivelsen for at kunne gøre den deterministisk. Denne vinkel kaldes normalt fasen for det komplekse tal, og selve tallet c kan skrives som numerisk værdi gange fasefaktor, som er $e^{i\phi}$: altså $c = |c|e^{i\phi}$, det er altså bare en måde at skrive sådan et komplekst tal på, som kan være lige så god som den anden måde, $c = a + ib$, svarende til, at et vilkårligt punkt i planen kan angives ved retvinklede eller polære koordinater, alt efter, hvad der er mest bekvemt til formålet. I denne situation er det bedst at satse på den polære beskrivelse i termer af numerisk værdi og fase, fordi de numeriske værdier af koefficienterne i tilstandens udvikling på basistilstande bestemmer den relevante sandsynlighedsfordeling, medens faserne er ekstra information.

Nu tænker vi os altså, at vi laver en måling. Vi laver den vekselvirkning mellem systemet og måleapparatet, som er karakteristisk for målingen, men for nu ikke at gøre det for indviklet, så forestiller vi os, at vi lader være med at aflæse måleapparatet. Der er håb om, at vi kan forstå, hvordan måleapparatet virker, men hvis vi skal have iagttageren med ind i billedet, så er problemet i hvert fald meget meget uoverskueligt. Det bedste, man kan gøre i første omgang, det er at sige. OK lad os nu bare se på, hvad der sker, når vi

laver denne vekselvirkning mellem måleapparatet og systemet, men iøvrigt holder iagttageren udenfor. Dvs. vi betragter systemet og måleapparatet som et stort sammensat system - og så kan vi jo i og for sig sige, at dette her er et fysisk system, et isoleret fysisk system ligesom det oprindelige, vi så på. Altså vi kan tænke på at udvide vor beskrivelse således, at vi beskriver, hvad der foregår i dette koblede system - det oprindelige system + måleapparatet. Hvis vi holder iagttageren udenfor! Men det er altså nødvendigt i første omgang at holde iagttageren udenfor - så kan man bagefter diskutere, hvad der sker, når iagttageren aflæser måleapparatet. Vi sætter altså først denne sammenkobling i stand og lader det hele være isoleret - ja så sker der altså en form for vekselvirkning, der ændrer tilstanden - sådan, at når målingen er færdig kl. t , så kan vi i princippet få fat i systemets tilstand, hvis vi kigger på måleapparatet, hvis viser vil vise os en bestemt af disse værdier a_n . Men hvis vi lader være med at kigge, så kan vi bare sige, at efter at processen er afsluttet, så må systemet være i en af disse basistilstande $|a_n\rangle$. Yderligere kan vi sige, at sandsynligheden for, at systemet er havnet i den bestemte tilstand $|a_n\rangle$, er $P_n = |c_n(t)|^2$, altså absolutkvadratet på udviklingskoefficienten for den pågældende basistilstand.

Så der er altså sket en afgørende ændring med vort kendskab til systemet ved den proces, der er foregået. Lige før målingen kl. t kunne vi sige, systemet er i tilstanden $|\Psi(t)\rangle$, som vi har bestemt ved at løse Schrödingerligningen - altså lige før målingen havde vi fuldstændigt kendskab til systemet - men lige efter, at den vekselvirkning har fundet sted, så har vi ikke længere noget fuldstændigt kendskab - vi kan ikke længere med bestemthed sige, hvilken tilstand, systemet befinder sig i, vi kan bare sige, at det befinder sig i en af disse basistilstande, og vi kan opgive sandsyn-

lighedsfordelingen for, hvilken tilstand, det befinder sig i. Så der er altså forsvundet noget information ved den måling - og den information, der er forsvundet, er netop den, der før måleprocessen lå i disse faser Φ_n . Der er sket det ved målingen, at vi får vor sandsynlighedsfordeling igen, men den skal nu fortolkes som sandsynlighed for, at systemet er i en bestemt tilstand, hvor den før målingen var sandsynligheden for at finde systemet i den bestemte tilstand, hvis man skulle få den idé at foretage en måling af størrelsen A og bagefter aflæse måleapparatet. Nu har vi altså kun målt, men ikke aflæst, og der er sket det, at den information, der lå i faserne lige før målingen, er forsvundet for os, og vi er altså ikke blevet klogere ved at foretage den måling, vi er tværtimod blevet dummere, fordi vi har mistet informationen. Man kan sige det på den måde, at entropien er vokset ved den måleproces. Entropien er jo et mål for - ja det er simpelthen den mængde information, vi mangler for at kende systemet fuldkomment. Situationen er altså den, at inden målingen manglede vi ingen information, vi havde en fuldstændig information. Vi kendte tilstanden $| \Psi \rangle$, dvs. vi kendte alle de komplekse udviklingskoefficienter c_n . Men efter målingen ved vi kun, at en af basistilstandene foreligger med en vis sandsynlighed, så vort kendskab er blevet mindre, vor uvidenhed - entropien - er blevet større. Hvis vi igen vil kende systemet fuldkomment, så er vi nødt til at foretage os noget, f.x. at aflæse måleapparatet, det vil være den simpleste metode. Selv den vekselvirkning, der finder sted mellem systemet og måleapparatet, har altså den egenskab, når vi isolerer den fra iagttageren, at den forøger vor uvidenhed, den forøger entropien ikkesandt, og det er jo iøvrigt karakteristisk for en hvilken som helst spontan proces i fysikken. Når vi benytter en sådan beskrivelse med entropi, så får vi måleprocessen ført

ind under en termodynamisk begrebsramme. Termodynamikken handler bl.a. om, hvordan entropien, altså vort manglende kendskab til systemer, forholder sig, når disse systemer udvikler sig, og den mest grundlæggende sætning i termodynamikken eller varmelæren er, at hvis et system er overladt til sig selv, og der sker en eller anden spontan proces inde i det, så vokser entropien. Der bliver mere og mere uorden, og det er i virkeligheden også det samme som at sige, at man ikke kan lave en evighedsmaskine af anden art. I en hvilken som helst spontan proces i et isoleret system vokser entropien. Nå ja, men dette her er netop en spontan proces i et isoleret system, nemlig totalsystem = oprindeligt system + måleapparat, som jo er isoleret, så længe vi ikke aflæser måleapparatet, og der er altså sket det, at entropien er vokset, hvad man ikke kan undre sig over.

Det er klart, at en sådan beskrivelse af måleprocessen er ufuldstændig. Vi kan forstå ud fra denne beskrivelse, hvordan det statistiske element kommer ind i kvantemekanikken. Det er nemlig et simpelt udtryk for, at måleprocessen er en spontan proces, og ved alle spontane processer sker der en entropivækst. Derfor kommer statistikken ind, og kvantemekanikken er altså ikke noget specielt i den henseende. Den egenskab har kvantemekanikken tilfælles med alle andre discipliner inden for fysikken, og til dels også inden for andre fag, at når der sker en eller anden spontan proces, så forsvinder der noget kendskab fuldstændigt. Men så kan man diskutere, hvordan gør vi nu den beskrivelse af måleprocessen fuldstændig? For det er klart, at hvis måleprocessen ikke var andet, så var der ikke nogen grund til at foretage målinger. Det eneste, man kan opnå er, at vi bliver dummere, informationen forsvinder.

Det man skal gøre i dette tilfælde er selvfølgelig at aflæse måleapparatet. I det øjeblik, vi har læst en bestemt

værdi, kan vi sige: Aha! systemet er i denne her tilstand, og så har vi altså genvundet den information, der var tabt ved målingen. Når vi ved, at systemet er i en bestemt tilstand, er entropien igen nul, så er der ikke nogen uvidenhed, og så kan vi igen gennemføre en deterministisk beskrivelse for det videre forløb. Men den oprindelige entropivækst, som kom, da vi foretog målingen, den er ikke forsvundet fra universet, fordi når vi sætter os til at aflæse måleapparatet, så er det jo i virkeligheden en ny måling, vi foretager, og den kan vi selvfølgelig diskutere på samme måde som før. Altså når den oprindelige måling er overstået, så er der ikke længere nogen forbindelse mellem måleapparatet og systemet, men så opretter vi i stedet en forbindelse mellem måleapparatet og noget, vi kan kalde en iagttager, og så er vi i samme situation som før. Omtrent da! Vi skal igen tænke på dette her som en fysisk måling af fuldkommen normal art, altså når man kigger på en viser af måleapparatet, så er måleapparatet det fysiske system, vi undersøger, og vi måler på det ved hjælp af et "måleapparat", som er iagttageren. Og spørgsmålet er nu, om vi kan gøre det samme som før og betragte systemet (som nu er det gamle måleapparat) og "måleapparatet" som et afgrænset system. Det kan vi ikke uden videre, for dette ville betyde, at man skulle isolere iagttageren fuldstændigt og forsøge at beskrive ham deterministisk.

Når vi mediterer lidt over iagttageren i målesituationen, så undgår vi ikke at komme ind i en uendelig regressi-
on. Det eneste, vi kan sige, er, at en del af iagttageren kan beskrives som et normalt måleapparat. F.x., vi kigger på viseren, og det vi så gør er, at vi bruger vort øje som et måleapparat, og så kan vi altså tænke på at gennemføre en beskrivelse med øjet som et nyt måleapparat. Det vil være helt tilstrækkeligt. Men så er vi bare i den situation, at

vi stadigvæk har noget udenfor - ikke nok, at der kommer et billede inde i øjet, så skal vi bagefter forestille os en iagttager, der ligger bag ved øjet og kigger på, hvad der nu kommer på nethinden, og det vil være meget svært at stille sig tilfreds med en afsluttet fysisk beskrivelse, som ikke anerkender eksistensen af en "indre iagttager", der sidder og kigger bagved.

Nu er vi også ved at være nået frem til de mere kildne problemer - selve iagttageren. Vi kan altså se, at diskussionen om måleprocessen fører os ind i sådan en uendelig regression, og så kommer spørgsmålet om, hvordan vi nu skal fortolke det. Betyder det, at der gælder nogle særlige fysiske love for iagttageren, som vi ikke rigtig kan få med i den sædvanlige kvantemekaniske beskrivelse - eller er det snarere denne regression - en mere sproglig ting - altså noget om en begrænsning af vort sprog - vi kan ikke rigtig forestille os en inderste iagttager, der sidder og samler det hele sammen for enden af denne her række. Hvis der skal gennemføres en deterministisk beskrivelse af målingsprocessen, så vil der altid være noget udenfor.

Jeg mener altså det sidste - at den vanskelighed hovedsagelig er af sproglig art. Der er ikke nogen grund til at tro, at iagttageren ikke skulle være fysisk, eller at iagttageren skulle være et ganske særligt system, som ikke kan gøres til genstand for en fysisk beskrivelse. Men, der er vanskeligheder af sproglig art, og der er også fysiske begrænsninger, som gør, at det er absurd at tænke på sådan noget som at gennemføre en beskrivelse af en iagttager som et isoleret system. Vi kan nemlig tænke på, hvad der ville ske med iagttageren, hvis vi prøvede at isolere ham. Der ville så ske det, som der sker med ethvert andet fysisk system, som vi isolerer - der ville ske nogle forskellige spontane processer, og disse spontane processer kan alle

sammen beskrives på den måde, at entropien vokser. Hvis vi tager et eller andet organiseret system - altså f.ex. en stor indviklet maskine - og isolerer den - altså lukker den inde i en kasse og lader være med at give den energitilførsel, så sker der efterhånden det, at maskinen henfalder - den forvitrer mod en tilstand af termodynamisk ligevægt. Det kan vi beskrive på den måde, at entropien vokser, der bliver mere og mere uorden i systemet, og den proces bliver ved med at foregå - denne relaxsation mod ligevægt, indtil vi har nået en ligevægtssituation, hvor entropien ikke kan blive større. I den situation er al oprindelig struktur ved maskinen forsvundet, og det samme kan vi selvfølgelig sige om en iagttager. Iagttageren dør simpelthen. Så vi har altså i fysikken en udmærket beskrivelse af, hvad død er for noget, det er nemlig en tilstand af termodynamisk ligevægt (dvs. et system i ligevægt er dødt, men ikke nødvendigvis omvendt). Der kan ikke ske nogen som helst spontane processer, når entropien er blevet maksimal, og det vil ske for et hvilken som helst system, vi isolerer - at det ender i en tilstand af termodynamisk ligevægt.

4. Irreversibilitet og bevidsthed .

Nu har jeg talt lidt om begrebet entropi, og der er blevet spurgt, om det var så simpel en sag at forstå dette entropivæsen. Det kommer lidt an på, hvor meget man spekulerer over begrebet, for hvis man ikke spekulerer ret meget, er det i grunden ret simpelt. Der findes jo i fysikken en disciplin, der hedder varmelæren - termodynamikken -, hvor entropien er en fuldkommen regulær målelig størrelse, og det betragtes i termodynamikken som noget af det sikreste, man overhovedet ved, at når der sker sådanne spontane processer

i et isoleret system, så vokser entropien. Det er imidlertid meget svært at forstå, hvad entropi er for noget i mekaniske termer, fordi de naturlove, man benytter sig af i en mekanisk beskrivelse (f.x. Schrödingerligningen), de er alle sammen fuldkommen ligeglade med, hvilken vej tiden går. Når vi ser virkelige processer, så ser vi altid det, at entropien vokser. Hvis vi har et isoleret system, så kan der være en meget velordnet, struktureret situation til at begynde med, en situation, som vi har godt kendskab til, men efterhånden, som det udvikler sig inden i dette isolerede system, så bliver det mere og mere uoverskueligt. Vi kan f.x. tænke på en svømmehal, hvor der ikke har været besøg i lang lang tid, vandoverfladen er fuldkommen glat, blank. Så kommer der en person og springer ud fra vippen i dette vand, og så kommer der en masse oprør i vandet. Hvis vi havde filmet dette og viste filmen baglæns, så ville vi se noget fuldkommen naturstridigt: en meget oprørt vandflade, der opstår nogle ringe, og disse ringe vil snævre sig sammen om et enkelt punkt, og fra dette punkt farer der en person baglæns op af vandet og havner på en vippe. Den slags sker ikke, men hvis man sammenholder det med den deterministiske beskrivelse, vi har i kvantemekanikken, så vil vi se, at der ikke er noget naturstridigt i den forstand. Alle de mikroprocesser, der sker i dette omvendte forløb, er lige så gode fysiske fænomener som dem, vi normalt ser, så dette irreversible, vi altid ser i virkeligheden i naturen, det er ikke noget, vi kan genfinde i de elementære love i den deterministiske beskrivelse. Der må noget andet til end denne deterministiske beskrivelse, der lægger an på at forklare hele systemet ud fra nogle særlige elementære begreber, såsom kvantetilstande.

Hvis man skal gennemføre en ordentlig naturbeskrivelse, så er man altid nødt til at have flere niveauer med. Vi

kan ikke nøjes med at sige, at nu kender vi alle impulser og steder, eller hvad det nu kan være, til et bestemt tidspunkt, så ved vi alt om det system. Så ser vi bort fra det input til systemet, der kommer fra de højere beskrivelsesniveauer - altså f.x. det, som er årsag til irreversibiliteten, at det hele er indstøbt, om man så må sige, i et univers, der som helhed udvikler sig irreversibelt. Altså, lyset går ud fra stjernerne, det går ikke ind; universet udvider sig, det trækker sig ikke sammen. Der er på de store kosmologiske beskrivelsesniveauer en tydelig irreversibilitet, som ikke kan føres tilbage til fysikkens grundlove, og denne irreversibilitet må man have med i en naturbeskrivelse, der ligner naturen. Der kommer vi måske ind på objektivitetsillusionen igen, altså illusionen består i - kan man sige - at den deterministiske fysik i og for sig har tegnet fysikken udadtil og givet et indtryk af, at man altid kan klare sig på den måde, at man afgrænser en bestemt del og så forklarer den del, man har inden for afgrænsningen ud fra visse elementardele. Man kan f.x. ikke beskrive en celle i en organisme på den måde, fordi det er væsentligt for cellens funktion, at den ikke er isoleret fra resten af organismen. Når vi taler biologi, så er det meget simpelt at se, at der er forskellige niveauer i beskrivelsen. Vi har et molekylært niveau, som f.x. kan vær noget med et DNA molekyle, vi har et cellulært niveau, og ovenover det har vi adskillige mere komplekse niveauer, organniveauer, organismeniveauer, og vi kan ikke forstå organismens opførsel ud fra opførslen af de enkelte celler, vi kan ikke forstå cellens opførsel ud fra kendskab til de forskellige kemiske love, man må altid tage hensyn til, at systemet, man beskriver, indgår som led i et større hele.

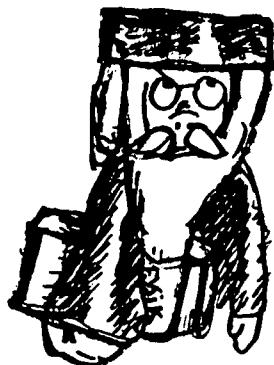
Det er normalt det, man gør sig skyldig i, at man ser bort fra disse systemiske kræfter. Man prøver at gennemføre

en 100% analytisk beskrivelse, altså beskrive systemerne ud fra de dele, de er sammensat af, udfra et elementært beskrivelsesniveau, men systemer kan i reglen ikke alene forstås analytisk. Det er f.x. ret meningsløst at prøve at forklare en organisme eller en maskine for den sags skyld - alene ud fra mekanikkens grundlove. For selv om det hele adlyder mekanikkens grundlove, så er der andre love, som også er bestemmende for, hvordan den mekanisme virker. For at forstå maskinen, må man i hvert tilfælde have teknologiens love med ind i beskrivelsen, og måske nogle æstetiske love, hvis man skal forstå, hvorfor en maskine ser sådan ud. På samme måde med iagttagere, man kan ikke gennemføre en fuldstændig deterministisk beskrivelse af iagttageren, fordi så ser man bort fra, at han kun kan fungere som iagttager, hvis han indgår som et led i et større hele, altså det, man kalder et økologisk system. Det er økologiske processer, som er nødvendige for, at iagttageren kan fungere som iagttager, altså indhente information.

Denne informationsindsamling er altid ledsaget af en entropivækst. Altså for at vi kan måle på et system, så laver vi en større entropi et andet sted. Når vi bagefter aflæser måleapparatet, så kan vi gennemføre fuldkommen det samme ræsonnement og sige - så må der komme en entropivækst i iagttageren. Men for at hele denne regression af iagttagersystemer skal kunne fungere, så er det nødvendigt, at den entropi, der laves ved informationsgennemstrømningen, den kan komme væk fra systemet; det kan den ikke i et isoleret system. Iagttageren er afhængig af, at han hele tiden kan komme af med sin entropi til nogle omgivelser, altså at omgivelserne kan fungere som entropiaftager, sådan at han hele tiden kan komme tilbage til noget, man kan kalde en nulstilling, en veldefineret klar situation. Fuldkommen det samme som måleapparatet, der er afhængigt af, at det kan

komme af med sin entropi, sådan at det kan føres tilbage til nulstillingen. Hele iagttagelsesproceduren hænger i høj grad på det, vi kan kalde de homeostatiske processer, som netop er det, at vekselvirkningen mellem iagttageren og omgivelserne sætter iagttageren i stand til at komme af med sin entropi. Det kan ske på så mange forskellige måder, man laver varme, man udskiller affaldsstoffer, det er altså noget, der indgår i disse homeostatiske processer, og hvis de ikke fandtes, ville iagttageren hurtigt være ude af stand til at fungere som sådan.

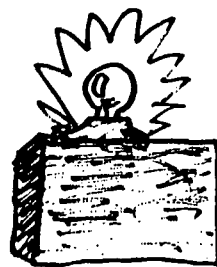
Der er en enkelt lille ting, jeg kunne nævne - et lille paradoks, eller i hvert tilfælde noget, der har givet anledning til diskussion om, hvorvidt kvantemekanikken er noget, der kan anvendes på et levende system. Jeg tror, at vanskeligheden med at forstå det punkt hænger sammen med objektivitetsillusionen, med det, at man er tilbøjelig til at overse betydningen af den systemiske beskrivelse. Man har fokuseret i for høj grad på den analytiske beskrivelse i fysikken. Det problem, jeg tænker på, er fremført af en fysiker - Wigner - og han argumenterer for, at der skal særlige love til, for at beskrive levende systemer. Det er et tankeeksperiment, som går ud på følgende:



WIGNER



WIGNERS VEN



FYSISK SYSTEM

Tegning: Harald Voetmann.

Her har vi Wigner sammen med en ven og kollega, og så har vi et fysisk system, og man tænker sig, at dette system kan være i to tilstande. Man skal altså lave en eller anden måling på systemet. Når man laver den måling, så kommer der måske et lysglimt, måske kommer der ikke noget lysglimt, og hvis der kommer et lysglimt, så kan vi sige, at systemet er i tilstand 1, og hvis der ikke kommer noget lysglimt, så kan vi sige, at det er i tilstand 2. Der er kun de to mulige resultater, og det vil sige, at når vi ikke lige har lavet en måling, så er systemet i en tilstand, som er en superposition af de to basistilstande: $|\Psi\rangle = c_1|1\rangle + c_2|2\rangle$. Wigner foretager målingen på den måde, at han lader vennen foretage målingen, og derefter spørger han ham, hvad han fik. Hvordan skal vi så beskrive det? Ja, siger han, hvis vi skal bruge kvantemekanikkens forskrifter, så vil vi beskrive både systemet og vennen ved en kvantemekanisk tilstand. Der vil så lige efter målingen være en kobling mellem de to, således at når systemet er i tilstand 1, så er vennen i en bestemt tilstand $|v_1\rangle$, og når systemet er i tilstand 2, så er vennen i en anden bestemt tilstand $|v_2\rangle$, men Wigner kan ikke sige noget om, hvad det er for en tilstand, dette sammensatte system befinder sig i, før han spørger vennen, og det vil altså sige, at inden han har spurgt vennen, da må det hele behandles som et stort sammenkoblet system med to basistilstande $|1, v_1\rangle$ og $|2, v_2\rangle$, således at indtil Wigner stiller spørgsmålet, så er hele dette system i en superposition, $c_1|1, v_1\rangle + c_2|2, v_2\rangle$, men når han stiller spørgsmålet, så "kollapser" tilstanden på den måde, der er beskrevet i kvantemekanikken, til en af de to basistilstande. Først da "kollapser" det oprindelige systems tilstand til enten $|1\rangle$ eller $|2\rangle$. Men den egentlige vekselvirkning med dette system finder jo sted, når vennen måler, og så er det jo absurd at have en beskrivelse, hvor forandringen i tilstanden af det

fysiske system først indtræder, når der sker den forholdsvis betydningsløse ting, at Wigner spørger vennen, hvad han så, da han målte på systemet for fem minutter siden. Og derfor argumenterer Wigner for, at kvantemekanikkens love ikke er tilstrækkelige, når der er tale om levende systemer.

Der kan der selvfølgelig være noget om, hvis man opfatter disse love meget dogmatisk, som det er gjort i tankeeksperimentet, men jeg synes, at hele problemstillingen er stillet forkert op af Wigner. For mig at se er der ikke tale om, at man har brug for en helt anden slags naturbeskrivelse til at beskrive vennen med, men brugen af et begreb som "en ren kvantetilstand" (eller bølgefunktion) har sine praktiske grænser, selv om disse grænser ikke kan stikkes så nøjagtigt ud. Der opstår et paradoks ved Wigners formulering, fordi i det øjeblik han giver sig til at betragte denne ven og systemet som et isoleret system, så gør han sig i virkeligheden skyldig i overlagt mord på vennen, kan man sige. Det med at tale om at beskrive en ven med en bølgefunktion, det betyder altså, at han forestiller sig, at han skulle være i stand til at komme i besiddelse af et fuldstændigt kendskab til denne ven, så fuldstændigt, at det overhovedet ikke har mening at tale om en mere fuldstændig beskrivelse. Og hvad vil dette betyde om vennen? Det vil i hvert fald betyde, at der ikke er meget tilbage af vennens bevidsthed eller frie vilje, eller hvad man nu skal kalde det. Nu er begrebet "bevidsthed" ikke sådan til at indfange med en definition, men måske gør der sig i fysikken gældende en forkert eller indsnævret opfattelse af, hvad det er. Forudsætningen for at have en venskabelig relation med et andet menneske er i det mindste, at man indrømmer den anden ret til sin bevidsthed, selv om man ikke kan definere, hvad det er. Altså har det i det mindste noget at gøre med en relation mellem Wigner og vennen, og hvis man ser lidt mere

på denne relation, så opløses dette paradoks. Jeg vil sige det på den måde, at i det øjeblik, Wigner var i stand til at gennemføre en fuldstændig beskrivelse af sin ven ved at angive en bølgefunktion for ham, så ville han være ligeså højt hævet over vennen, rent bevidsthedsmæssigt, som vi er hævet over de systemer, vi faktisk kan give en fuldstændig beskrivelse af. Og de systemer er altid meget små og spinkle, alene i kraft af, at vore hjerner har en begrænset kapacitet. Hvis vi skal beskrive et eller andet fysisk system fuldstændigt, så er det nødvendigt, at vi kan rumme informationen i vore hoveder, eller i det mindste i en af de computere, vi har adgang til.

Hvis man regner lidt på det, så kan man se, at alene for at gennemføre en fuldstændig beskrivelse af en vanddråbe skulle vi bruge mere computerplads, end der findes i hele verden. Altså, hvis Wigner var i stand til at gennemføre en fuldstændig beskrivelse ved at angive en bølgefunktion for vennen, så ville han være mindst lige så meget hævet over vennen, som vi andre er hævet over en vanddråbe. Og så kan man sige, at spørgsmålet, om vennen har en bevidsthed eller ej, er i og for sig samme spørgsmål som, om vanddråben har en bevidsthed eller ej. Og da vil jeg sige noget i retning af, at så længe vi ikke ved fuldkommen detaljeret, hvad der foregår i dråben (og det kommer vi aldrig til), så er det måske ikke helt tosset at tilskrive den en slags bevidsthed. De situationer, hvor det er muligt for os at se bort fra enhver form for bevidsthed af systemet, det er kun når vi selv er i stand til at få fuldstændige informationer fra systemet - og så vil det altså sige, at i de situationer gør vi objekterne til en del af vor egen bevidsthed.

Jeg mener, at Polanyi's måde at beskrive tingene på indeholder løsningen på sådanne paradokser som Wigners ven (og det analoge "Schrödingers kat"). Polanyi siger, at vi

altid må have flere niveauer af beskrivelse, vi må ikke tro, at vi kan klare os med et enkelt niveau, og bevidstheden eller den frie vilje får så sin rette plads i kraft af, at lovmæssighederne på de højere beskrivelsesniveauer ikke er bestemt alene ud fra lovmæssighederne fra de lavere beskrivelsesniveauer. På den måde får vi således en flydende eller relativ definition af, hvad der er levende, og hvad der ikke er levende. Det levende kan udvise noget, man kan kalde fri vilje. Det er der, hvor der optræder lovmæssigheder i de øverste beskrivelsesniveauer, som ikke direkte kan udledes fra de underliggende niveauer, altså f.x. det, at vi ikke kan forstå en maskine udfra mekanikkens love, men at vi må have teknologien med i beskrivelsen, at vi ikke kan forstå en organisme uden at have en vis formålsbestemt beskrivelse med i billedet.

De deterministisk-analytiske beskrivelsesmåder har fejret store triumfer i det teknologiske ekspansionskapløb, som nu er ved at ødelægge klodens økologiske balance. Den teknokratiske målrettethed, som følger af en ensporet anvendelse af sådanne naturbeskrivelser, har i stor udstrækning tegnet fysikkens image udadtil. Jeg har forsøgt at gøre rede for en komplementær, systemisk opfattelse, som også indgår i den grundvidenskabelige tradition, idet jeg mener, at en systemisk synsmåde er mere egnet, når fysikken skal sættes i relation til andre videnskaber. Der er nu tegn i sol og måne på, at civilisationen er ved at bevæge sig ind i en ny epoke, hvor nøgleordet "vækst" må erstattes af "balance", og i denne epoke må man nok i fysikken satse mere på de systemiske betragtningsmåder, som danner en bro til faget økologi.

Hvis vi virkelig i konsekvent analytisk ensporethed ville studere en vanddråbe til bunds og "indlemme den i vores bevidsthed", skulle vi have fat i en datamængde på ca

10^{20} bits af information, så vi måtte straks gå i gang med at bygge kæmpedatamater alene til dette formål, og således ville vi via den hertil nødvendige industri bidrage væsentligt til verdenshavets forurening. Så er det måske alligevel bedre at lade dråben og havet have sin bevidsthed i fred og acceptere vandet med den respekt og andagt, som udtrykkes af "The Incredible String Band" i The Water Song:

*Dark or silvery Mother of Life
Water Water Holy Mystery, Heaven's Daughter
O Wizard of changes
Teach me the lesson of flowing.*

Henvisninger .

Fremstillingen af kvantemekanikkens opfattelse af måleprocessen bygger i det væsentlige på:

John v. Neumann, "Mathematische Grundlagen der Quanten-Mechanik", Springer, Berlin, 1932.

Artikler af E. Wigner og M. Polanyi findes i:

"The Scientist Speculates", ed. I.J.Good, Heinemann, London, 1962.

Retur til virkeligheden .

(fra GAMMA, nr. 52, marts 1983).

Nogle eksperimenter i Paris (Aspect m.fl.) har været udført med det formål at afprøve kvantemekanikkens gyldighedsområde på en af Einstein udtænkt situation. Hvordan skal man nu forholde sig til det? Hævder københavnerfortolkningen ikke, at kvantemekanikken er fuldstændig og derfor ikke kan modbevises? Og har eksperimentet ikke endnu en gang givet kvantemekanikken ret?

Jo, og derfor skal vi nu opleve mange udtalelser, der fastslår københavnerskolens sejrriige stilling i den stadig spøgende debat mellem Bohr og Einstein, og hvad deraf følger. Måske vil det endda komme så vidt og accepten blive så udbredt, at der helt høres op med al denne snak om forskellige "skoler" inden for kvantemekanikken, som jo er en fysisk disciplin og ikke en psykologisk eller lingvistisk.

Jeg er lidt betænkelig ved de konsekvenser en sådan fastlåsning af diskussionen kan få og hvilke besynderlige kosmologier, som nu vil søge at legitimere sig ved at henvise til den ufejlbarlige københavnerfortolknings ekstrapole-rede udsagn. Fysikken betragtes af mange som et orakel og erstatning for en tabt religion. Måske bør vi holde lidt igen og erkende, at fysikken har sine forudsætninger og ikke har eneret på at beskrive virkeligheden.

Retur til virkeligheden

Jeg forestiller mig, at hvis Niels Bohr og Albert Einstein havde levet i dag, ville de begge have været interesserede i Aspect eksperimentets udfald. Måske ville de have væddet om det, og Bohr ville have vundet, men Einstein ville komme igen og foreslå et nyt eksperiment. Måske ville sagen endelig blive afgjort til begge tilfredshed. Hvad er det egentlig for nogle holdninger, der mødes i disse to? Jeg følte trang til at grave lidt i det, de havde sagt og gisne lidt om deres forudsætninger for at se, om de ikke kunne have ret begge to.

På forhånd var jeg tilbøjelig til at give Einstein ret i hans påstand om at kvantemekanikken er ufuldstændig, da den modsatte antagelse ville lukke af for en diskussion af kvantemekanikkens gyldighedsområde. Faktisk mener jeg ikke, at Bohr har bevist kvantemekanikkens fuldstændighed, og han hævdede da også selv kun at have gendrevet Einsteins ufuldstændighedsbevis. Alligevel kan kvantemekanikken godt være ufuldstændig på en eller anden måde, og det har jeg følt ret nødvendigt at antage, nærmest som en tro, for ikke at miste enhver motivation.

Der er derfor ikke nogen streng logik i det jeg her har skrevet, men måske nogle antydninger og ideer, som kan følges op. Måske har jeg ikke helt forstået københavnerfortolkningen, men jeg har forsøgt, og det er den fortolkning jeg mener bedst at kunne forstå. For mig at se handler disse eksperimenter om noget filosofi eller metafysik, som ikke kan sættes på formler uden at pointen til en vis grad smutter væk. Jeg tror derfor, at man skal forsøge at trænge ind under den formalistiske overflade (og dette er kun et forsøg) og få gang i en diskussion om ideer, i Bohrs og Einsteins ånd, inden fysikkens nye evangelister får afskaffet virkeligheden hen over hovedet på os eller gjort den helt ukendelig.

1. Konsistens og fuldstændighed

Enhver, der er opflasket med kvantemekanik ved Københavns Universitet må have følt en vis national stolthed ved at stifte bekendtskab med Bohr-Einstein diskussionen om kvantemekanikkens konsistens (modsigelsesfrihed). I denne diskussion, som blev ført på Solvay-møderne 1927-30 opstillede Albert Einstein en række sindrige og tilsyneladende paradoksale tankeeksperimenter, som Niels Bohr derpå refutede med sikker hånd. På trods af dette blev Einstein ved med en stædighed, som mange nok har følt som stridende mod "den gode smag" (jfr. Hans Henrik Thodbergs artikel i sidste nr. af GAMMA, ref. 1). I hvert tilfælde berettes det, at Ehrenfest til sidst vendte sig hovedrystende mod Einstein og sagde: "Albert dog, jeg er flov over dig". Det berettes også, at Einstein til sidst dog lod sig overbevise om kvantemekanikkens konsistens, efter at Bohr med et elegant *coup de grace* havde vendt Einsteins eget våben, den generelle relativitetsteori, mod ham selv.²



Tegning: Peter Thejll.

Retur til virkeligheden

Så gik der fem år, hvor københavnerne opdyrkede andre emner, bl.a. grundlaget for kvanteelektrodynamikken. Da Einstein slog til igen, denne gang i ledtog med B. Podolski og N. Rosen, var det som et lyn fra en klar himmel. Denne gang var det ikke konsistensen, men fuldstændigheden af kvantemekanikken, der blev draget i tvivl. Imidlertid ser det ud til, at man i København ikke har lagt særlig vægt på denne forskel, men har opfattet EPR-artiklen som en genoptagelse af Einsteins tidligere angreb på kvantemekanikken. Rosenfeld som arbejdede tæt sammen med Bohr har givet en førstehåndsberetning om Bohrs anstrengelser med at udarbejde et svar til E., P. & R:³

"Dag efter dag, uge efter uge, blev hele argumentationen tålmodigt undersøgt ved hjælp af simple og lettere gennemskuelige eksempler. Einsteins problem blev omformuleret og dets løsning formuleret på ny med en sådan præcision og klarhed, at svagheden i kritikernes ræsonnement blev indlysende, og deres hele argumentation, til trods for al dens falske åndrigheid, faldt i stumper og stykker. "De gør det fikst," lød Bohrs kommentar, "men hvad det kommer an på, er at gøre det rigtigt"."

Jeg har fremdraget dette citat, fordi det viser en overraskende hårdhed i formuleringen hos Rosenfeld, der ellers var kendt som en yderst venlig og tolerant fysiker. Åbenbart har der i København hersket en betydelig animositet mod Einstein i hans forsøg på at "mistænkeliggøre" kvantemekanikken, og herved har man lukket øjnene for, at EPR-artiklen faktisk viser en vidtgående accept af kvantemekanikken som en konsistent disciplin, og at prædikatet "ufuldstændig" ikke er et skældsord, men en skæbne, som kvantemekanikken må dele med mange andre agtværdige, formelle systemer.

Få år før, i 1931, offentliggjordes af en østrigsk matematiker Kurt Gödel et ufuldstændighedsbevis for matematikken, nærmere betegnet teorien for de hele tal, som axiomatiseret af Peano og logisk udviklet af Russell og Whitehead. Gödel viste, kort fortalt, at hverken beviser for *konsistens* eller *fuldstændighed* kan føres på systemets egne logiske præmisser. Derimod kan det vises, at en antagelse om systemets *konsistens* som logisk konsekvens har systemets *ufuldstændighed*. Dvs. *konsistensen* gøres til et spørgsmål om en meta-matematisk tro, som matematikere i almindelighed må bekende sig til (da der ellers kastes et tvivlsomt skær over berettigelsen af deres arbejde), og *ufuldstændigheden* er da en skæbne, som systemet må leve med. En matematiker må altså indstille sig på, at der findes matematiske teoremer, som er sande, men som kun kan bevises på grundlag af meta-matematiske antagelser (f.x. antagelsen, at systemet er konsistent).

Gödels bevis har åbnet for en meget frugtbar diskussion inden for matematikken og logikken og betragtes i dag som et af de stærkeste argumenter mod den filosofiske retning, som kaldes *positivismen* eller *den logiske empirisme* og som bygger på en tro på, at videnskaben kan fuldstændiggøres i et sprog, der kun tillader "logiske udredninger af forhold vedrørende erfarbare sansedata". Et af udgangspunkterne for *positivismen* var en kritik af Kants lære om fysiske objekters *transcendens*. "Das Ding an sich" ligger principielt uden for vor opfattelse og vort sprog, mener Kant, og *positivisterne* svarer hertil, at så bør man undlade at tale om det, og i stedet stille sig tilfreds med de erfarbare sansedata og en databehandling inden for en strengt formaliseret logik. *Positivismens* fallit over for spørgsmålet om matematikkens *konsistens* og *fuldstændighed* har bl.a. medført, at Kantianske synspunkter er blomstret op inden for matematikerkredse.

Retur til virkeligheden

Nu er det ikke så lige til at oversætte de matematiske begreber om konsistens og fuldstændighed direkte til fysikken, bl.a. fordi fysikkens virkelighed er mere indviklet end matematikkens (in casu: de hele tal) og meget sværere at afgrænse. Alligevel er der en tæt begrebsmæssig parallelitet mellem EPR-artiklen og Gödels bevis, og det synes rimeligt at konkludere, at når positivismen er uegnet som filosofisk grundlag for matematikken, er den nok heller ikke det bedste mulige grundlag for fysikken. Det er der da også en del fysikere, der har givet udtryk for i tidens løb (bl.a. Popper og Kuhn), men københavner-skolens manglende accept af, at kvantemekanikken kan være ufuldstændig, svæver stadig over vandene og fungerer som positivismens forlængede arm.

De seneste eksperimenter i Paris (Aspect m.fl.) har jo ifølge de fleste udlægninger givet Bohr ret endnu en gang og Einstein uret. Jeg mener derfor, at der er grund til at slå fast, at hvad det end er, Einstein har fået uret i, så er det i hvert tilfælde ikke den afgørende påstand i EPR-artiklen: at kvantemekanikken er ufuldstændig. Denne sætning ligger på et logisk (eller metalogisk) niveau og er uafhængig af de foretagne eksperimenter. Eksperimenterne er imidlertid af stor betydning, fordi de tester Einsteins vigtige forudsætning *lokalrealismen*: at den fysiske virkelighed eksisterer uafhængigt af iagttageren, og at kausale forhold kan beskrives ved feltforstyrrelser, der udbreder sig med hastigheder mindre end eller lig med lysets.

Aspect eksperimenterne har nok heller ikke modbevist *lokalrealismen* definitivt, men givet kraftige begrænsninger på, hvordan den kan formuleres; bl.a. udelukkes alle s.k. *separable skjult variabel teorier*. Hvis flertallet af fysikere skal overbevises om kvantemekanikkens ufuldstændighed, må der nok også gås eksperimentelt til værks: der må kunne udføres et eksperiment af en høj lødighed, måske en variant

af Aspect eksperimentet, som giver uoverensstemmelse med kvantemekanikkens forskrifter, når disse opfattes som et fuldstændigt system. Jeg vil i det følgende lægge hovedvægten på de logiske og filosofiske spørgsmål, men også komme lidt ind på mulige eksperimentelle ufuldstændighedsbeviser.

2. EPR-argumentet .

Einstein, Podolski og Rosen starter ud fra en tilstrækkelig betingelse for, at en fysisk størrelse er reel (har realitet, er virkelig):

R: Hvis vi, uden at forstyrre systemet på nogen måde, med sikkerhed kan forudsige værdien af en fysisk størrelse, så eksisterer der et element af fysisk realitet svarende til denne fysiske størrelse.

Heraf følger så en nødvendig betingelse for, at en fysisk teori er fuldstændig:

F: En fysisk teori er kun fuldstændig, hvis enhver fysisk størrelse, som kan tillægges realitet iflg. kriteriet R, er repræsenteret i teorien.

Hvis vi nu antager flg. sætning:

(1) Kvantemekanikken er fuldstændig.

Så følger heraf sætningen:

(2) Komplementære størrelser kan ikke samtidigt have realitet.

Den kvantemekaniske formalisme tillader jo ikke en samtidig 100% sikker forudsigelse af værdierne af to komplementære størrelser, såsom sted og impuls af en partikel. Hvis noget sådant alligevel var muligt, ville det betyde, at kvantemekanikken var ufuldstændig.

EPR viser dernæst, at sætning (1) medfører gyldigheden af følgende sætning:

- (3) *Det er muligt at tilordne to forskellige (komplementære) bølgefunktioner til den samme virkelighed.*

Beviset for (3) bygger på analysen af et tankeeksperiment, som involverer sted og impuls af to partikler som er udsendt samtidigt ved en henfaldsproces, som kræver bevarelse af totalimpulsen med værdien nul. Nutildags benyttes i reglen en variant foreslået af Bohm og Aharonov, hvor sted og impuls er erstattet med to komponenter (f.x. x og z) af spinnets for et par spin- $\frac{1}{2}$ partikler, der er udsendt med totalspinnets 0. Hvis vi måler z -komponenten $s_z = -\frac{1}{2}$ for partikel 1, tilskrives vi derved partikel 2 en bølgefunktion, som er egenfunktion til s_z operatoren med værdien $s_z = +\frac{1}{2}$. Imidlertid kunne vi jo lige så godt have målt x -komponenten s_x for partikel 1, og derved ville vi tilskrive partikel 2 en anden bølgefunktion, nu en egenfunktion til s_x -operatoren. Det er den samme virkelighed, som vi således kan beskrive med to komplementære bølgefunktioner, ræsonnerer EPR, for partikel 2 er jo rumligt adskilt fra partikel 1 og kan derfor umuligt mærke, hvordan vi vælger at måle på partikel 1. Her kommer altså lokaliteten i EPRs realisme frem. Udtrykt mere præcist: det må være den samme virkelighed, hvis der er en space-like separation mellem flg. to begivenheder:

a) *Indstillingen af Stern-Gerlach apparatets akse for partikel 1, dvs. valget af den spin-komponent som måles for*

partikel 1.

- b) Den eventuelle detektion af en spinkomponent for partikel 2.

At der er en space-like separation mellem disse to begivenheder betyder, sagt med jævne ord, at et signal med information om a) ikke kan nå frem til b), idet et sådant signal iflg. relativitetsteorien ikke kan propagere med overlyshastighed. (Denne præcisering af "Einstein separabilitet" er dog ikke direkte udtrykt i EPR artiklen).

Antagelsen om fuldstændighed af kvantemekanikken (sætning (1)) medfører altså på den ene side en afvisning af, at komplementære størrelser kan have samtidig realitet (sætning (2)) og på den anden side en påvisning af muligheden for at tilskrive den samme virkelighed to komplementære bølgefunktioner (sætning (3)). De to komplementære bølgefunktioner repræsenterer et par modstridende forestillinger om virkeligheden, hvilket berettiger navnet "EPR-paradokset". Der er en klar modstrid mellem sætning (2) og sætning (3), idet vi må betænke, at ordet "samtidigt" i (2) er en generel formulering, som omfatter udtrykket "den samme virkelighed" i (3). De to komplementære bølgefunktioner er jo egenfunktioner for operatorer, der repræsenterer to komplementære fysiske størrelser (s_x og s_z). De tillader altså en fuldstændig sikker forudsigelse af hver af de to størrelser for partikel 2, uden at partikel 2 forstyrres, dvs. disse to størrelser har begge fysisk realitet iflg. kriteriet R. Hvis vi vil undgå denne modstrid, er der kun én vej: vi må droppe antagelsen (1), dvs. vi må indrømme, at kvantemekanikken er ufuldstændig.

Jeg håber med denne korte gennemgang at kunne demonstrere følgende vigtige træk ved EPR-argumentet: Der er tale om en rent logisk udredning, som alene bygger på kvantemekanikken og den lokalrealistiske antagelse. Selve logikken kan

Retur til virkeligheden

ikke antastes eksperimentelt eller teoretisk, men antagelserne kan muligvis. Selv om en af antagelserne skulle vise sig at være forkert, betyder det ikke automatisk, at konklusionen er forkert. Der er ikke ført bevis for, at kvantemekanikken er inkonsistent, dvs. at den skulle kunne føre til forkerte eller modstridende resultater, hvis den ellers anvendes rigtigt. På den anden side bygger beviset jo netop på en udledning af modstridende resultater, og herved antydes, at ufuldstændigheden har karakter af, at kvantemekanikken ikke kender sin egen begrænsning.

3. Bohrs svar til EPR .

Som beskrevet i Rosenfeld-citatet i afsnit 1, lagde Bohr straks alt andet arbejde til side for at udarbejde et svar på EPR-artiklen. Allerede to måneder efter EPR offentliggjordes Bohrs første svar som et kort "letter to the editor" i Nature, og endnu tre måneder senere forelå det fuldstændige svar i Physical Review som en artikel med samme overskrift som EPRs: "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?".

Det væsentligste element i Bohrs svar er en kritik af EPRs realitetskriterium (R i afsnit 2), hvilket bl.a. fremgår af følgende citat (Bohrs egen oversættelse og fremhævelser, ref. 2):

"Den tilsyneladende modsigelse afslører blot, at den tilvante betragtningsmåde på væsentlige punkter er uegnet til rationel redegørelse for de fysiske fænomener, som vi møder i kvantemekanikken. Den endelige vekselvirkning mellem objektet og målemidlerne, der er betinget af selve virkningskvantets eksistens, medfører - på

grund af umuligheden af at kontrollere objektets reaktion på måleinstrumenterne, hvis disse skal tjene deres formål - nødvendigheden af et definitivt afkald på det klassiske kausalitetsideal og af en gennemgribende revision af vor indstilling til problemet om den fysiske virkelighed. Som vi skal se, indeholder det af de nævnte forfattere foreslåede virkelighedskriterium en væsentlig flertydighed, når det anvendes på de faktiske problemer som vi her står overfor."

Bohr diskuterer derpå EPR-tankeeksperimentet (sted/impulsmåling på partikelpar) i en lidt ændret version, hvor den ene partikel er erstattet med en fjederophængt skærm, hvis position eller impuls kan måles efter behag. Både dette og det oprindelige EPR-eksperiment har imidlertid den skavank, at det unddrager sig den konflikt mellem kvantemekanik og visse lokalrealistiske forestillinger, som senere er blevet udtrykt i Bell's ulighed. Disse tankeeksperimenter kan derfor ikke, i modsætning til Bohm-Aharonovs spin-eksperiment, tjene som oplæg til rigtige eksperimenter, der kan afgøre fundamentale stridsspørgsmål. Det væsentligste punkt i Bohrs argument for EPR-virkelighedskriteriets flertydighed er imidlertid uafhængigt af det betragtede tankeeksperiment. Det består af en afvisning af muligheden for at betragte det kvantemekaniske system som uafhængigt af måleopstillingen. Kun den samlede opstilling berettiger, at vi kan tale om et reelt fænomen, som da besidder en "individualitet som er fuldstændig fremmed for den klassiske fysik". Ifølge denne opfattelse kan man altså ikke tillade sig som EPR at sige, at "den samme virkelighed" for partikel 2 beskrives ved to forskellige bølgefunktioner; det er nemlig ikke "den samme virkelighed" når der benyttes to forskellige måleopstillinger for partikel 1.

De indtil nu citerede bemærkninger af Bohr lader stadig en mulighed for realistisk opfattelse åben: at vi kan tale om en fysisk virkelighed, som eksisterer uafhængigt af iagttageren. Ganske vist indgår måleapparaterne i situationen og er med til at konstituere virkeligheden, men de gør det åbenbart på en fysisk måde (og ikke en psykisk eller parafysisk), idet citatet netop fremhæver den endelige vekselvirkning mellem objektet og målemidlerne. Så foreløbig ser det ud til, at realismen nok kan opretholdes, men at der er knas med lokaliteten (idet måling på partikel 1 ser ud til at påvirke partikel 2). Efter at have læst lidt videre i artiklen kommer man dog i tvivl, om det virkelig er det, der menes, idet en længere diskussion af EPR-tankeeksperimentet fører til følgende overvejelse (min oversættelse):

"Naturligvis er der i et tilfælde som dette ikke tale om en mekanisk forstyrrelse af det undersøgte system under det sidste kritiske trin af måleprocessen. Men selv på dette trin er der i det væsentlige tale om en indflydelse på selve de betingelser, som definerer de mulige typer af forudsigelser vedrørende systemets fremtidige adfærd. Da disse betingelser udgør et iboende element i beskrivelsen af ethvert fænomen, for hvilket det er passende at tilordne betegnelsen "fysisk realitet", ser vi, at de omtalte forfatteres argumentation ikke retfærdiggør deres konklusion, at kvantemekanisk beskrivelse er væsentlig ufuldstændig."

Dette sidste citat ødelægger ganske den realistiske opfattelse, som man (måske lidt forhastet) kunne have dannet sig på grundlag af det første citat. Nu er der ikke længere tale om en fysisk mekanisme i forbindelse med måleapparaterne, men snarere om en "psykisk", dvs. i denne sammenhæng en

begrebslogisk proces, som finder sted ved bølgefunktionens kollaps (reduction of the wave function), når der måles på partikel 1. Bohrs modstilling af disse to synsmåder gør artiklen svær at forstå, men det har nok heller ikke været meningen, at den skulle være let. Jeg vil formode, at "uklarheden" er tilsigtet og et eksempel på det Søren Kierkegaard kalder "elastisk tvetydighed" (herom mere senere).

Den "elastiske tvetydighed" er et væsenstræk ved københavnerskolens opfattelse af bølgefunktionen og dens kollaps ved måleprocessen, og det er nok dette træk især, som har vanskeliggjort fortolkningens praktiske integration i fysikken som filosofisk grundholdning uden for København, på trods af den almindelige accept, som er blevet dens matematiske apparat og dens eksperimentelle forudsigelser til del. På den ene side må man (hvis man er realist og københavner) opfatte bølgefunktionen som den mest fuldstændige beskrivelse af en fysisk virkelighed, der eksisterer uafhængigt af os. På den anden side må man acceptere den fortolkning, at kollapspostulatet, som skuffende ligner en beskrivelse af, hvad der fysisk sker med bølgefunktionen under en måling, er af rent begrebslogisk art, idet det tjener som definition af bølgefunktionens betydning. Som Bohr siger det senere i artiklen:

"Der kan ikke være tale om nogen utvetydig fortolkning af kvantemekanikkens symboler ud over den, som er indbygget i de velkendte regler, der tillader forudsigelse af de resultater, som kan opnås i en given eksperimentel opstilling, beskrevet på en helt klassisk måde."

Bohr sætter her fingeren lige på københavnerfortolkningens ømme punkt og trykker hårdt til, idet han hævder, at bølgefunktionen kun kan forstås ud fra de sandsynlighedslo-

ve, som påstås at styre kollapsprocessen ved en måling. Det må jo så være en ideel måling, der henvises til, for man kan da vel forestille sig, at der kan findes dårlige måleapparater, hvis statistik ikke lever op til kvantemekanikkens krav? Jeg kan vel ikke bare postulere, f.x. at min kaffekop skulle være et måleapparat og at den derfor skal bruges til at forstå kvantemekanikkens bølgefunktion med? Nej selvfølgelig ikke og Bohr fremhæver da også, at den eksperimentelle opstilling skal være beskrevet, underforstået i meningsfulde fysiske termer, men vel at mærke på en helt klassisk måde.

Bohr mener vel, ligesom Kant, at vi forstår tingene ud fra nogle anskuelsesformer, som er uomgængelige i vores daglige praksis, og som vi umuligt kan kappe forbindelsen til, hvis vi skal forstå atomare fænomener, men disse "klassiske" anskuelsesformer er væsensforskellige fra kvantemekanikkens begrebsdannelser. Der opstår derfor et begrebslogisk "snit" mellem kvantemekanikken og de klassiske anskuelsesformer, og set fra den kvantemekaniske side er det umuligt at beskrive, hvad der foregår på den klassiske side i detaljer. Et forsøg på en sådan beskrivelse ville være meningsløst, idet selve meningen med kvantemekanikkens bølgefunktion kun kan forstås fra den klassiske side af snittet.

Hvis snittet er virkeligt (dvs. hvis kvantemekanikkens begrebslogik udspringer af en eksisterende fysisk virkelighed), må det kunne lokaliseres som en energetisk grænseflade, hvor vekselvirkningen mellem måleapparatet og det kvantemekaniske system finder sted. Dvs. en realistisk fortolkning af Bohr må føre til, at der er en del af den fysiske virkelighed, som kvantemekanikken til enhver tid vil være udelukket fra at beskrive i detaljer (nemlig den klassiske side af snittet). På denne måde kommer Bohr, for mig at se, i sin gendrivelse af EPRs bevis indirekte (på andre præmis-

ser) til at give de tre forfattere ret i deres konklusion: kvantemekanikken er ufuldstændig.

4. Einstein i skole - og en ældre københavner .

Einsteins relativitetsprincip og Bohrs komplementaritetstilfilosofi er to gode eksempler på, at det kan lønne sig at gå ind i den teoretiske fysik og forny den ud fra en filosofisk baggrund. Omvendt kan man også finde mange eksempler på, at nye tænke måder inden for fysikken virker tilbage på den filosofiske hovedstrøm og skaber nye retninger, f.x. Bridgeman's operationalisme, der er direkte inspireret af relativitetsteorien.

Positivismen har fået kraftige indsprøjtninger fra fysik og matematik, bl.a. fra Ernst Mach og Bertrand Russell og har haft en gunstig tilbagevirkning på fysikken som fanebærer for krav om objektivitet og præcision og som modvægt til mysticisme og nazistisk ideologi. Der er også via positivismen skabt en forbindelsesvej fra natur- til sprogvidenskaber (af bl.a. Wittgenstein) af stor betydning. Imidlertid er positivismens sprogopfattelse ikke særlig anvendelig som indgang til kvantemekanikken, idet dens syn på de objektive egenskaber, som sproget navngiver, bygger på en let generalisering af normale sanseindtryk. "Et objekt er blot summen af sine egenskaber" siger positivisten og fremkalder derved et indtryk af naturvidenskaben som en passiv indsamling af fritsvævende data, som derpå kombineres til forestillingen om et objekt.

I kvantemekanikken har observatøren en langt mere aktiv rolle som "både tilskuer og aktør i dramaet" som Bohr har sagt (med henvisning til Buddha og Lao Tse). Både i kvantemekanik og i relativitetsteori gælder det, at observatøren

bygger på en teoretisk for-forståelse af objektet og aktivt udvælger dets egenskaber ved præparation og opstilling af måleapparat. En egenskab bliver derved til en relation mellem objekt og observatør, og det grundlæggende studium i både natur- og sprogvidenskaber kommer til at dreje sig om relationer og strukturer sammensat af relationer. Sprogopfattelsen drejes herved over i retning af det, som i dag sammenfattes med betegnelsen *strukturalisme*. Omvendt vil jeg så hævde, at Einstein og Bohr har bygget på sprogopfattelser af denne karakter, allerede inden de lavede deres gennembrud i fysikken, og at dette har givet dem et forspring af stor betydning for deres succes. Endvidere tror jeg, at den samme gruppe af filosoffer, som har givet disse to fysikere en stor lighed i udgangspunktet, er væsentlig, når man vil forstå deres senere meningsforskelle, og måske endnu kan bidrage til at opklare den nøjagtige karakter af kvantemekanikkens ufuldstændighed.

Den store russisk-amerikanske sprogforsker Roman Jakobson, som døde i en høj alder sidste år, var meget optaget af at bygge bro til naturvidenskaberne på grundlag af sproglogiske studier.⁴ Han mente selv at have fundet spiren til en universel logik i den såkaldte *semiotik*, udviklet af den halvvejs glemte amerikanske "pragmatiske" filosof C. S. Peirce, og at dette system kunne udbygges med arbejder af europæiske sprogforskere, bl.a. den berømte schweitzer F. de Saussure og hans mindre kendte landsmand Jost Winteler. Den sidste har ifølge Jakobson fået en enorm indirekte betydning for eftertiden gennem den indflydelse han havde på den unge Albert Einstein.

Einstein fik en uheldig introduktion til de boglige sysler på gymnasiet i München, der så det som sin hovedopgave at indpode eleverne kadaver-disciplin. Han søgte så en anden skole og var så heldig at få plads som kostelev på

kantonskolen i Aarau (tæt ved Zürich), hvor Jost Winteler var rektor. Samtalerne med Winteler blev for Einstein et afgørende vendepunkt og en introduktion til videnskabelig tankegang. Som sprogforsker var Winteler dybt original og langt forud for sin tid. Han byggede sine sprogstudier op over begrebet "relationelle invarianser", en slags sproglig relativitetsteori, som han uden tvivl har indviet Einstein i gennem de lange samtaler, de førte. Einstein bevarede lige til sin død en dyb hengivenhed for "Papa Winteler", som han betegnede som "synsk".

Man kan formode, at Einstein i sin skoletid har tilegnet sig nogle holdninger, som har præget hele hans senere virke. Dels en afsky for militarisme og åndløst terperi, som han lærte i München, og dels en kærlighed til den humanistiske tanke, der spænder over afgrundene og respekterer menneskets følelsesmæssige udgangspunkt, hvilket han lærte af Papa Winteler. I sin senere skoling inden for den tyske filosofi søger han i konsekvens af disse holdninger at kombinere den gennemtrængende rationalisme hos Kant med den følelsesbetonede eksistentialisme hos Schopenhauer.⁵

I København, mod slutningen af det nittende århundrede, har der nok ikke hersket så store modsætninger som i Tyskland, men et helt enestående litterært og filosofisk miljø, takket være folk som Poul Martin Møller, H.C. Andersen, Grundtvig, Kierkegaard, J.P. Jacobsen og Georg Brandes. Vi kan regne med, at dette miljø har sat Niels Bohr i gang med at filosofere, inden han for alvor blev fysiker. Der er talrige vidnesbyrd om noget sådant, bl.a. fortæller Heisenberg, at Bohr udviklede sin komplementaritetsfilosofi for vennerne under en sejtur (før Solvay-konferencen i 27), hvortil en af vennerne bemærkede: "Men Niels, det er dog virkelig ikke nyt, det har du da allerede fortalt os nøjagtigt sådan for

Retur til virkeligheden

ti år siden".³

Niels og Harald Bohr voksede op i et hjem, hvor der filosofisk set var "højt til loftet", bl.a. på grund af faderens venskab med filosofen Harald Høffding og sprogforskeren Vilhelm Thomsen. Senere, efter at have gået til filosofikum hos Høffding, blev Bohr-brødrene indlemmet i en filosofisk diskussionsklub "Ekliptika". Nøjagtigt hvilken københavner-filosofi, der blev udviklet her under tobakstærgerne ud på de sene aftener, ved vi ikke, men vi kan have en begrundet formodning om, at der er én ældre københavner, hvis ånd må have været konstant nærværende, og det er Søren Kierkegaard.

Niels Bohr har i breve til broderen Harald (1909) fortalt om sit grundige studium af Kierkegaards "Stadier på Livets Vej" og sin beundring for værket, selv om han dog ikke var enig med K. på alle punkter. Jeg er ikke klar over i hvor høj grad Bohr har studeret andre af K.s værker, specielt de mere fagvidenskabelige religiøst-filosofiske afhandlinger såsom "Philosophiske Smuler", "Begrebet Angest" (begge 1844) og "Sygdommen til Døden" (1849), men jeg tror ikke, at han har kunnet undgå at blive påvirket af dem gennem sit miljø. Jeg har forsøgt at læse "Begrebet Angest" med "fysikbriller" på, og det har slået mig i hvor høj grad der er paralleler mellem den ældre og den yngre københavners filosofier, både i form og indhold. I det følgende vil jeg forsøge at illustrere nogle af disse lighedspunkter ved hjælp af nogle håndplukkede citater.

Først formen: Den "elastiske tvetydighed", som Bohr excellerer i, skyldes ikke manglende formuleringsevne, men en meget bevidst tankegang om, at vanskelige sager ikke skal camoufleres med et letflydende og tilsyneladende klart sprog. Bohr fremhævede, at "klarhed" er komplementært til "sandhed". Kierkegaard siger i "Philosophiske Smuler":

"- thi det er altid en Fordeel, en Lettelse, naar det er det Vanskelige, jeg skal tilegne mig, at det bliver gjort mig vanskeligt".

- hvilket han i øvrigt til fulde demonstrerer ved den kringledede form, han har givet denne bog. I "Begrebet Angest" (som alle de følgende K.-citater er fra) finder vi det citat, som jeg allerede har benyttet lidt af:

"Den psykologiske Forklaring maa ikke besnakke Pointen, men blive i sin elastiske Tvetydighed, af hvilken Skylden bryder frem i det qualitative Spring".

Vi kommer nu over til indholdssiden, idet begrebet "det qualitative spring" er et nøglebegreb, både i "Stadierne" (som Bohr jo med sikkerhed har læst i 1909) og i "Begrebet Angest" - og, vil jeg påstå, i københavner-fortolkningen af kvantemekanikken.

"Begrebet Angest" kredser om problemerne synd og skyld, specielt det jødisk-kristne dogme om arvesynden, hvilket måske ikke lige netop er det emne, der lægger mest op til at blive omtalt i GAMMA. Det er dog heller ikke så meget emnet som metoden, der er af interesse i denne forbindelse. Kierkegaard mener, at syndens mulighed ligger i viljens frihed og at mennesket derfor er et ansvarligt, åndeligt væsen. At foretage et valg (som syndefaldet) betyder, at det velkendte Selv skuer ind i sin modsætning, som er den absolutte Frihed, et Intet, der indebærer Angst:

"Angest kan man sammenligne med Svimmelhed. Den, hvis Øie kommer til at skue ned i et svælgende Dyb, han bliver svimmel. Men hvad er Grunden, det er ligesaa meget hans Øie som Afgrunden; thi hvis han ikke havde stirret

Retur til virkeligheden

ned. Saaledes er Angst den Frihedens Svimlen, der opkommer, idet Aanden vil sætte Synthesen, og Friheden nu skuer ned i sin egen Mulighed, og da griber Endeligheden at holde sig ved. I denne svimlen segner Friheden. Videre kan Psychologien ikke komme og vil det ikke. I samme Øieblik er Alt forandret, og idet Friheden igjen reiser sig op, seer den, at den er skyldig. Imellem disse tvende Øieblikke ligger Springet, som ingen Videnskab har forklaret eller kan forklare".

Måske mærker fysikeren ikke så meget til angst, når han tænker på kvantemekanikken, men dens fælde, svimmelheden, må han kende. Rosenfeld⁶ citerer nemlig Bohr for ordene:

"Hvis man tænker på komplementaritet uden at blive svimmel, så er det et sikkert tegn på, at man ikke rigtig har forstået situationen".

Det er afgørende for Kierkegaard, at springet ikke kan beskrives kvantitativt som noget kvantitativt som noget løvbundet:

"det er derfor en Overtro, naar man i Logikken vil mene at der ved en fortsat kvantitativ Bestemmen fremkommer en ny Qualitet". - - -

"Lad Matematikere og Astronomer hjælpe sig, hvis de kan, med uendeligt forsvindende Smaa-Størrelser, i Livet hjælper det ikke Een til at faa Attestats, end mindre til at forklare Aand".

Denne skarpe skelnen går stik imod Hegelianismens og Marxismens tale om "kvantitetens omslag til kvalitet" og fremtvinger en dialektisk begrebslogik med "bootstrap" for

Retur til virkeligheden

alle pengene:

"Vanskeligheden for Forstanden er netop Forklaringens Triumph, er dens dybsindige Consequents, at Synden forudsætter sig selv, at denne kommer saaledes ind i Verden, at den, idet den er, er forudsat. Synden kommer da ind som det Pludselige, dvs. ved Springet, - men dette Spring sætter tillige Qualiteten; men idet Qualiteten er sat, er i samme Øieblik Springet vendt ind i Qualiteten og forudsat af Qualiteten, og Qualiteten af Springet".

Jeg vil vove den påstand, at fysikere, der har beskæftiget sig med komplementaritetstankegangen, eller elementarpartikelteori, eller spontane symmetribrud ved faseovergange har gode forudsætninger for at forstå Kierkegaard på dette punkt.

Bohr er flere gange citeret for den bemærkning, at "tænkningen over tænkningen udgør et singulært punkt i bevidstheden". Hermed mente han ikke, at man skulle undgå sådanne punkter, tværtimod: naturen af en singularitet giver kvalitativ forståelse af hele det omgivende landskab. Kierkegaard har med flid opsøgt de mest singulære punkter og er vendt tilbage med en indsigt i begrebslogiske sammenhænge (f.x. forbindelsen mellem frihed og angst), som ikke kunne vindes på nogen anden måde, og hvis betydning rækker langt ud over religionsfilosofien.

Bohr var en mester i at gribe dagligdags hændelser i flugten og fremdrage de aspekter af dem, som kunne illustrere ideen om "det kvalitative Spring". Heisenberg fortæller f.x. følgende lille episode fra en spadseretur med Bohr:

"Da jeg engang på en ensom landevej kastede en sten mod

en fjern telegrafpæl, og stenen mod al sandsynlighed ramte, sagde han: "At sigte på en så fjern genstand og så ramme, det er naturligvis umuligt. Men hvis man er i besiddelse af den uforskammethed at kaste i den retning uden at sigte og tilmed forestille sig den absurde mulighed, at man også kunne ramme, ja, så kan det måske dog ske. Den forestilling, at noget måske kunne ske, kan være stærkere end øvelse og vilje".

Heisenbergs spontane kast er her eksemplet på det kvalitative spring, og Bohr kommer ind på en vigtig forudsætning for springet, som Kierkegaard også gør meget ud af: muligheden for overgangen skal først "sættes" ved en "forestilling" inden det egentlige spring finder sted. Man skal imidlertid ikke tro, at denne forestilling kan udbygges kvantitativt til erstatning for det kvalitative spring, tværtimod: *hvis man sigter, rammer man ikke.*

Her ligger der måske også en mulighed for en forståelse af den tilsyneladende modstrid i Bohrs svar til EPR: Den endelige vekselvirkning mellem måleapparaterne og det kvantemekaniske system sætter muligheden for bølgefunktionens kollaps, men det endelige kollaps ligger uden for kvantemekanikkens fysiske område; det er det kvalitative spring, som kalder på en begrebslogisk forklaring. Man kan indvende, at det Bohrske "snit" mellem kvantemekaniske systemer og de klassiske måleapparater ikke er helt så singulært et punkt som Kierkegaards frie vilje. Selv om man mærker "frihedens svimlen" over snittet, og selv om den egentlige kvantemekanik må give op her, er der stadig fysik på den anden side: halvklassisk eller termodynamisk. Det er derfor ikke på forhånd absurd at lede efter "skjulte variable" eller på anden måde søge efter midler til en fysisk beskrivelse af måleprocessen.

5. Tilbage til lokalrealismen .

Aspect eksperimenterne har givet genlyd i dagspressen og er blevet karakteriseret som Bohrs endelige sejr over Einstein. En af de fysikere, som har været rask til at drage meget vidtgående konklusioner i den anledning er J. A. Wheeler.⁷ Det er et kosmisk trip af format, som Wheeler får ud af det, han opfatter som "københavnerfortolkningen": Hele Universet er et sammenhængende hele, som umuligt kan adskilles i enkeltdeler. Den kvantemekaniske måleproces er "an elementary act of creation" med konsekvenser, som rækker helt ud til Universets grænser og bagud i tid helt tilbage til "the Big Bang". Wheeler antyder endda, at dette er den eneste skabelses-myte, vi har brug for i kosmologien.

Jeg er selv science-fiction fan og nyder fortællinger, hvor heltene smutter gennem "time warps", "wormholes" og "hyperspace" for at undgå den kedelige grænse, som lyshastigheden sætter ifølge den specielle relativitetsteori. Det er også helt fint, at fysikere for alvor fortæller, at rumtids metrikken bryder sammen ved sorte huller og ved meget små afstande, når kvante-gravitationelle fluktuationer er af betydning. Men hvordan disse ting skulle kunne finde sted i et ganske almindeligt laboratorium i Paris, hvor man måler på polarisationen af ganske almindelige synlige fotoner med ganske almindeligt udstyr, forekommer mig helt uforståeligt, og jeg får en ubehagelig mistanke om, at det her er "fiction" camoufleret som "science", hvilket man bør vogte sig for.

Aspect eksperimenterne er uden tvivl samvittighedsfuldt og dygtigt udført, og man kan lære noget af deres udfald, som jo i alle detaljer bekræfter kvantemekanikken og bryder med den form for lokalrealisme, som er defineret med Bell's ulighed, dvs. de såkaldt "objektive lokale" og "Einstein se-

Retur til virkeligheden

parable" skjult variabel teorier. En rigtig københavner vil måske i den anledning sige, at det ikke er særlig interessant at få bekræftet noget, vi vidste i forvejen, men kan man virkelig i den grad sætte sig op på den høje hest med sine formler i hånden, at man ikke synes det er værd at teste formlernes gyldighedsområde? Eller skal man gå så vidt i sin accept som Holger Bech Nielsen, der udtalte til Information (22./10.-1982):

"-nu ved vi, at også de mere absurde sider af denne teori, som vi ikke forstår til fulde, må tages alvorligt. Verden er fundamentalt set ikke-lokal."

Jeg har i denne artikel forsøgt at slå til lyd for, at Einsteins, Podolskis og Rosens argumenter fortjener at blive taget alvorligt, selv ud fra en "københavnsk" forforståelse, og at Aspect forsøgene derfor er et vigtigt bidrag til udforskning af de grænser, inden for hvilke kvantemekanikken er konsistent, og uden for hvilke kvantemekanikkens ufuldstændighed vil vise sig. Selv om Bohr havde ret i sin kritik af EPRs forudsætninger, har han overset, at hans argumenter tjener til at fastslå EPRs konklusion, at kvantemekanikken er ufuldstændig. Aspect har altså endnu ikke fundet kvantemekanikkens grænse, men hvis vi synes, at resultatet af forsøget er absurd, er det nok et tegn på, at der er noget af begrebslogikken, vi ikke helt har forstået, og det er for tidligt at fastslå, at så er Verden altså absurd.

Lad mig til sidst forsøge at antyde, hvor jeg tror, forklaringen kan ligge: Bell-uligheden, som har tjent som en definition af lokalrealismen, går faktisk noget videre, idet den antager, at de egenskaber, som måles, kan knyttes til de individuelle partikler inden målingen. Dette er i modstrid med kvantemekanikken, som beskriver systemet ved en toparti-

kel bølgefunktion inden målingen. Den kvantemekaniske beskrivelse er dog stadig både lokal (der er ingen ikke-lokalitet i Schrödingerligningen) og realistisk (hvis man opfatter bølgefunktionen som en virkelig størrelse), dvs. en eventuel ikke-lokalitet optræder først ved selve den irreversible måling, når bølgefunktionen kollaberer.

Her er vi igen ved "det kvalitative Spring", og i den gode gamle københavner-ånd bør man så spørge: Hvordan er ikke-lokaliteten "sat" af måleapparatet? Svaret byder sig til ret let: Ikke-lokaliteten er "sat" ved det faktum, at Aspect-eksperimentet kun registrerer *coincidente* begivenheder ved brug af coincidentstøllere. Der er slet ikke tale om to uafhængige måleopstillinger (som i det oprindelige EPR- eller Bohm-Aharonov tankeeksperiment) hvor den ene i princippet kunne stå på Jorden og den anden på Saturn. De to opstillinger er forbundet med solide ledninger til nogle "sorte kasser" i midten (coincidentstøllere mm.), som har muligheder for at udsende korrelerede støjsignaler ud til partikeldetektorerne i god tid inden selve registreringen.

Heraf følger så også et forslag til et nyt eksperiment, som muligvis kan falsificere denne opfattelse. Prøv at lave eksperimentet uden forbindende elektronik (uden coincidentstøllere), således at det kun er enkeltpartikeltilstande, som er "sat" på forhånd af apparatet, men selvfølgelig i forbindelse med tidlig registrering af enkeltbegivenhederne, således at man retrospektivt ved databehandling kan finde frem til de *coincidente* begivenheder. Så vil jeg vente at finde Bell's ulighed opfyldt.

Måske virker dette forslag banalt, og den ærede læser, som mener dette, vil måske endda tilføje, at jeg godt kunne have sparet mig alt det filosofiske skyts, hvis det bare var det, det drejede sig om. Indrømmet kære læser, du har en god pointe dér, og jeg vil da også mene, at vi må retur til den

Retur til virkeligheden

fysiske virkelighed, hvor eksperimenterne foregår. Men hvis filosofien kunne udelades, havde vi kun formlerne at holde os til, og hvis formlerne bare er rigtige, behøvede vi jo ikke at lave eksperimenter for at udforske kvantemekanikkens grænser (som i så fald ville være ikke eksisterende). Og så er jeg vist nået tilbage til udgangspunktet på min kringlede vej, og det er på tide, at jeg stopper.

Referencer

1. Hans Henrik Thodberg, "Albert og den gode smag", GAMMA nr. 51, 1982.
2. Niels Bohr, "Atomfysik og menneskelig erkendelse", Schultz Forlag, København, 1957.
3. "Niels Bohr. Hans liv og virke fortalt af en kreds af venner og medarbejdere", Schultz Forlag, København, 1964.
4. Roman Jakobson, "Elementer, funktioner og strukturer i sproget. Udvalgte artikler om sprogvidenskab og semiotik", Nyt Nordisk Forlag Arnold Busck, København, 1979.
5. Albert Einstein, "Perspektiver og udsyn", Hasselbalch, 1967.
6. "Niels Bohr. Et mindeskrift". Fysisk Tidsskrift, København, 1963.
7. J. A. Wheeler, "Physics and Austerity: Law without Law". Særtryk fra University of Texas, Austin, 1982.

Kvantesemiotik og EPR-paradokset .

(Oplæg til hh-klubben, juni 1983).

Indledning .

Formålet er her at gøre logisk rede for den opfattelse af EPR/Bohr kontroversen og Aspects forsøg, som jeg også gav udtryk for i min artikel "Retur til virkeligheden" i GAMMA nr. 52. Medens jeg der fremstillede sagen i konsekvens af Kierkegaards idé om det kvalitative spring, en væsentlig inspirationskilde for Bohr, vil jeg her fremsætte min egentlige argumentation byggende på noget, man kan kalde "Peirce-Paynter paradigmet". Jeg har gravet tilbage i forudsætningerne for min intuitive opfattelse, og resultatet er blevet en række teser med kommentarer, som tilsammen beskriver en slags ontologisering af begrebet et energibånd. Derved muliggøres en semiotisk begrebsramme, hvori man kan beskrive og forstå kvantemekanikkens gyldighedsbetingelser uden at måtte opgive lokalrealismen.

Teserne T1, T2, osv. er nummereret fortløbende over fire kapitler:

- I. Almen semiotik (T1 - T5).
- II. Kvantesemiotik (T6 - T11).
- III. Randomiseringen (T12 - T17).
- IV. EPR-eksperimenter (T18 - T21).

I. Almen semiotik .

T1 : *Relationsstrukturer går forud for egenskaber.*

Denne tese, som Peirce udviklede i "The logic of relatives" er forudsætningen for hans triadiske kategorilære og grundlag for semiotikken.

T2 : *Alle relationer er relationer mellem tegn.*

Selve tegnfunktionen er defineret ved den grundlæggende triadiske relation

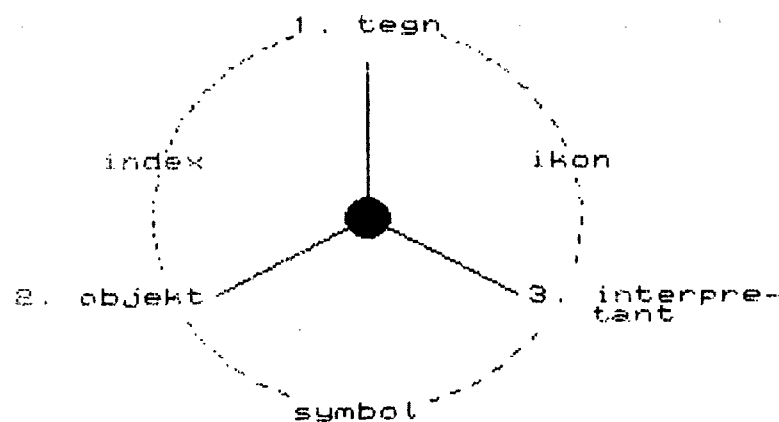


Fig. 1 . Tegnrelationen og dens tre udartede (dyadiske) former. (Note, oktober 90: Denne måde at identificere de tre tegnklasser ikon, index og symbol med de tre dyadiske sider af den triadiske relation er ikke helt i overensstemmelse med Peirce, men den er heller ikke helt ved siden af. De tre dyadiske sider benyttes i det følgende, og det er ikke i denne sammenhæng vigtigt, hvad de kaldes).

De tre dyadiske sider af den triadiske relation definerer de tre grundlæggende tegnaspekter: det ikoniske (billedfunktionen), det indeksikale (udpegningsfunktionen) og

det symbolske (den konventionelle funktion). En af disse funktioner kan evt. have en tydelig dominans over de to andre, hvorved det pågældende tegn kan benævnes hhv. ikon/index/symbol.

Ifølge T2 må både objektet og interpretanten opfattes som tegn, hhv. sekundære og tertiære tegn. Et sekundært tegn kan kun opfattes via et primært, et tertiært via et sekundært og et primært.

I det følgende benyttes en bond-graph notation, hvor tegnene repræsenteres ved linjer og relationerne med knuder i et netværk. En linje, der kun repræsenterer ét tegn kaldes et informationsbånd; tegnet indiceres med en pil rettet fra afsender til modtager. En linje, der repræsenterer to modsat rettede signaler, kaldes et vekselvirkningsbånd, i fysikken vil det i reglen være et energibånd, og de to tegn indiceres med et X og et O, således at det signal, som går fra venstre mod højre indiceres længst til højre. Et vekselvirkningsbånd (energibånd) kan altså formelt "oversættes" til to modsat rettede energibånd, som vist på fig. 2:

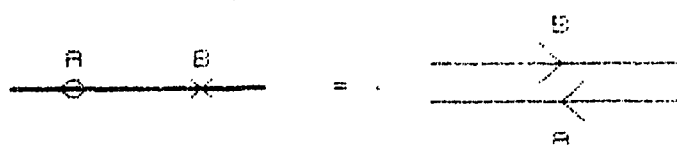


Fig. 2 . Vekselvirkning beskrevet som to modsat rettede informationssignaler.

Hvis det ene af de to tegn i et vekselvirkningsbånd undertrykkes (svinder i betydning), siger vi, at båndet aktiveres. I fysikken må man betragte vekselvirkningsbåndet som det fundamentale, hvilket kommer til udtryk i føl-

gende tese:

T3 : *Et fysisk informationsbånd er et aktiveret energibånd.*

"Forklaringen" af vekselvirkningsbåndet på fig. 2 er altså ikke en fysisk forklaring, men må opfattes som opskrift på en simulation af vekselvirkningsbåndet. Hvis simulationen sker ved en fysisk mekanisme (en analogregnemaskine) er der altså tale om en "oversættelse" af et enkelt (passivt) vekselvirkningsbånd til to aktiverede vekselvirkningsbånd, dvs. fra det simple til det mere indviklede, hvilket altså ikke må opfattes som en forklaring, men netop kun som en simulation. (I analogregnemaskinen foregår aktiveringen ved hjælp af operationsforstærkere).

T4 : *De fysiske relationsstrukturer, som ligger til grund for fysiske egenskaber, sættes af fysiske vekselvirkningsbånd (energibånd).*

Dette (T4) er en semiotisk udgave af den operationalistiske tese. (T4 siger dog betydelig mere, end at måleoperationer definerer de fysiske egenskaber, for den udtaler samtidig, at måleapparaterne vekselvirker med det fysiske objekt og derfor ikke blot indsamler information. Som Bohr har sagt, er det den endelige vekselvirkning mellem måleapparatet og objektet, der nødvendiggør et brud med den klassiske virkelighedsopfattelse).

T5 : *En fysisk manifest egenskab er en kæde af informationsbånd og tegntransformatorer, rækkende fra objekt til interpretant. Egenskabens tegnrepræsentanter nærmest objektet har indexkarakter.*

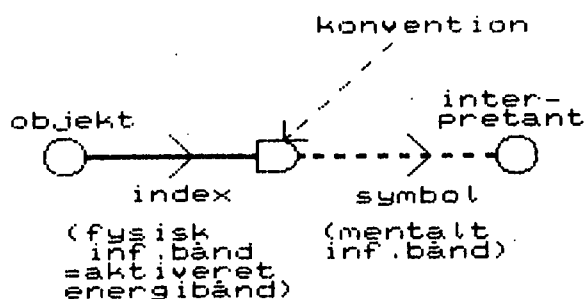


Fig. 3 . Illustration af "manifest fysisk egenskab", T3-T5.

II. Kvantesemiotik .

T6 : En observabel er en kæde af informationsbånd og tegntransformatorer, som i den ene ende er forbundet med interpretanten og i den anden ende kan forbindes med et objekt via et energibånd.

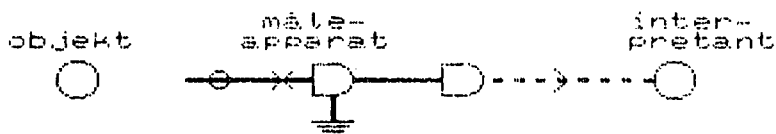


Fig. 4 . En observabel

Det ses af de foregående teser, at en observabel bliver til en manifest egenskab ved at der oprettes et energibånd til forbindelse med objektet og dette energibånd derpå akti-

veres ved at den med 0 indicerede variabel i fig. 4 undertrykkes.

T7 : *Der eksisterer en "tavs" virkelighed, som evt. kan styres af os via klassiske felter, men som ikke kan give sig til kende over for os med fysiske tegn.*

Dette er den realistiske tese . De felter, som kan bruges til styring beskrives som "klassiske", fordi de ikke kan påvirkes af den tavse virkelighed. (Begrebet "den tavse virkelighed" svarer nogenlunde til d'Espagnat's begreb "the veiled reality").

T8 : *Den kvantemekaniske bølgefunktion er et symbol for den tavse virkelighed.*

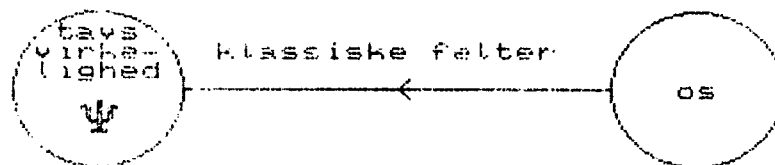


Fig. 5 . Illustration til T7 og T8.

Den tavse virkelighed har altså ingen manifesterede egenskaber, iflg. T5, men man kan selvfølgelig godt sige, at den har potentielle egenskaber, når man tænker på at oprette forbindelse med en observabel. De potentielle egenskaber beskrives mest fuldstændigt ved hjælp af bølgefunktionen.

Når vi i T8 beskriver bølgefunktionen som et symbol, er det netop de potentielle egenskaber, vi har i tankerne, dvs. den potentielle forbindelse med en interpretant. I kvante-

feltteorien, som foreskriver bølgeligninger for forskellige partikeltyper uden skelen til interpretanten, optræder bølgefunktionen som et index, i måleteorien som et ikon.

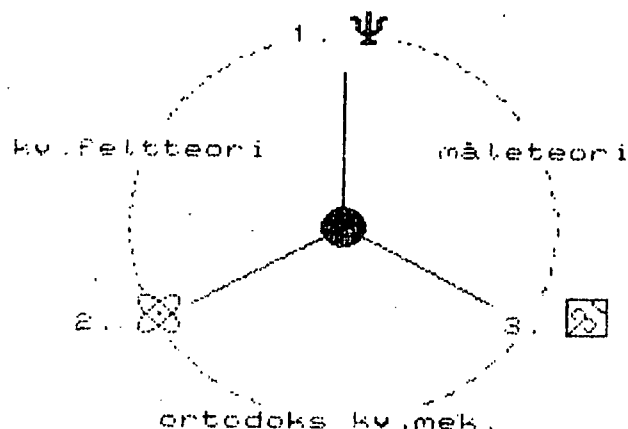


Fig. 6 . Kvantediscipliner som udtryk for de tre dyadiske tegnkategorier (sml. fig. 1).

Den tavse virkelighed forudsættes naturligvis også at eksistere i andre discipliner end kvantemekanik, og den vil da kunne beskrives ved andre symboler end kvantemekaniske bølgefunktioner. Ifølge semiotikken er det imidlertid en logisk fejl at tilskrive den tavse virkelighed egenskaber, selv når de karakteriseres som "skjulte variable". Det er bl. a. denne fejlslutning, Peirce gør op med i "The Doctrine of Necessity Examined".

T9 : *Den tavse virkelighed kan beskrives dynamisk som en energibandsstruktur uden forbindelse til de makroskopiske måleapparater.*

Schrödingerligningen kan oversættes til en reversibel

energibandsstruktur. Hvis den tavse virkelighed kobler til dissipative omgivelser (andet end måleapparater), duer Schrödingerligningen ikke, men en energibandsbeskrivelse (indeholdende lække) kan gennemføres.

T10 : De to tegn i et kvantemekanisk energibånd kan simuleres ved duale vektorer i Hilbert rummet.

Det er Diracs "bra" og "ket" vektorer ($\langle i |$ hv. $| i \rangle$), som her kommer ind i billedet. Mere matematisk defineres dualiteten ved, at der er givet et indre produkt $\langle i | j \rangle$, og de to duale vektorer transformerer hv. kovariant og kontra-variant ved koordinattransformationer i Hilbert rummet.

T11 : Det kvantemekaniske "kollaps af bølgefunktionen" er en begrebslogisk sammenfatning af de processer, som finder sted, når den bestemte, afgrænsede del af den tavse virkelighed, som vi beskriver med bølgefunktionen, sættes i forbindelse med en observabel (et måleapparat) via et energibånd, som derpå aktiveres, hvorved en egenskab manifesteres.

Det fremgår heraf, at vi kan opdele kollapset i to faser (som dog nok i virkeligheden forløber mere eller mindre samtidigt):

Første fase, kaldet randomiseringen, finder sted lige efter sammenkoblingen mellem måleapparatet og den forhen tavse virkelighed. Herunder aktualiseres egenskaberne, dvs. det, der aktualiseres, er et sæt alternative egenskaber, der tilsammen udspænder alle de muligheder, som er sat af observablen.

Anden fase , kaldet det endelige kollaps hænger sammen med aktiveringen af energibåndet. Herved manifesteres en enkelt, eller et mindre sæt af alternative egenskaber.

Som vi skal se i næste afsnit er det muligt at give en simpel lineær beskrivelse af første fase, hvilket er det eneste, vi behøver for at fortolke EPR-eksperimenterne. (Det bliver ikke til en teori for kollapset, specielt ikke for anden fase, som er det kvalitative spring).

III. Randomiseringen .

Situationen under randomiseringen (1. fase af kollapset) kan ifølge det foregående beskrives ved relationsstrukturen på fig. 7:

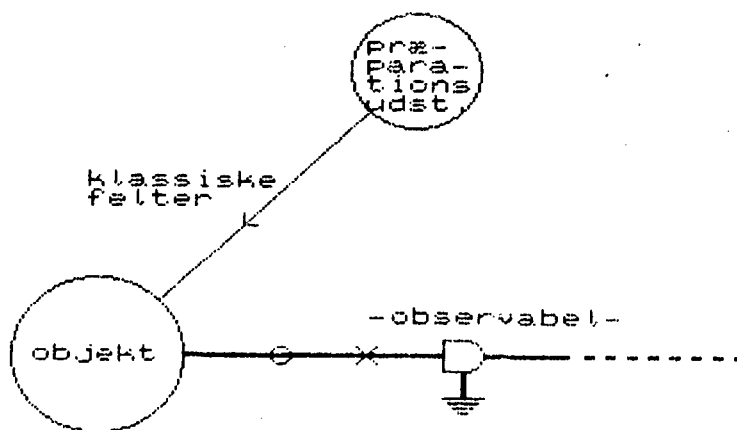


Fig. 7 Situationen lige efter sammenkoblingen mellem objekt og måleapparat.

T12 : Måleapparatet, som er "interface" mellem det kvantemekaniske system og de klassiske informationsbånd har en dissipativ responsefunktion over for små påvirkninger fra objektet og vil derfor virke tilbage på objektet med støj ifølge fluktuationsdissipationsteoremet.

Fluktuations- dissipations- (FD-) teoremet udtrykker den logiske nødvendighed af Peirces tychistiske tese, fremsat i "The doctrine of necessity examined". (Så vidt fysikken kan se, spiller Gud med terninger). Måleapparatets dissipative responsefunktion udtrykker det faktum, at målingen er en irreversibel proces. Ifølge FD-teoremet vil outputvariablen i et energibånd fra et dissipativt system altid være belagt med støj. Dvs. den med 0 indicerede variabel i fig. 7 rummer en støjkomponent, som giver et tilfældigt input til det kvantemekaniske system.

T13 : Støjens indvirkning på det kvantemekaniske system kan skildres semiklassisk som et tilfældigt bidrag til systemets Hamilton-operator i form af støjpotentialet

$$V_S = \sum_i V_{Si} P_i$$

hvor $P_i = |i\rangle\langle i|$ er projektionsoperatoren for den i 'te egenvektor af den hermiteske operator, som repræsenterer observablen.

En projektionsoperator repræsenterer en elementær måling som en tæller, der kun kan give måleresultaterne "klik" eller "ingenting", svarende til at en projektionsope-

rator kun har egenverdierne 1 og 0. Støjpotentialet i T13 bygger altså på en opfattelse af måleapparatet som en samling af tællere, der hver for sig svarer til et af de mulige måleresultater. F.x. hvis måleapparatet er en fotografisk plade, svarer hvert korn i emulsionen til en tæller.

Den i'te tæller vil så have sin egen dissipative, frekvensafhængige responsefunktion $Z_i(\omega)$, så ifølge FD-teoremet kan vi angive power-spektret for den semiklassiske støjfunktion v_{Si} på formen

$$|v_{Si}(\omega)|^2 = \frac{2}{\pi} Z_i(\omega) \cdot \left\{ \frac{1}{2} \hbar \omega + \frac{\hbar \omega}{e^{\hbar \omega / kT} - 1} \right\} \quad (1)$$

hvor første led i parantesen svarer til nulpunktsstøjen og andet led til den termiske støj ved temperaturen T . I det følgende benyttes kun nulpunktsstøjen, da temperaturen forekommer irrelevant i en grundlæggende diskussion af kvantemekanik.

T14 : De aktuelle alternative egenskaber af objektet sættes af støjpotentialet (T13) gennem randomisering af bølgefunktionens faser. Denne proces beskrives ved løsning af den kvantemekaniske bevægelsesligning (Schrödinger-/v. Neumann ligningen) efterfulgt af ensemblemidling over støjens statistiske egenskaber.

Lad os sige, at bølgefunktionen lige før målingen kan beskrives ved superpositionen (basisvektorer $|k\rangle$ for observabel)

$$|\Psi_0\rangle = \sum c_k |k\rangle \quad (2)$$

hvor c_k erne er komplekse koefficienter

$$c_k = |c_k| \exp(i\Phi_k) \quad (3)$$

Ifølge Schrödingerligningen vil støjpotentialet (T13) bevirke, at c_k ændres efter følgende ligning:

$$\frac{dc_k}{dt} = -\frac{i}{\hbar} c_k \cdot v_{sk}(t) \quad (4)$$

Hvis målingen starter kl. 0 har ligning (4) løsningen

$$c_k(t) = c_k(0) \cdot \exp\left(-\frac{i}{\hbar} \int_0^t v_{sk}(t') dt'\right) \quad (5)$$

dvs. den numeriske værdi $|c_k|$ er upåvirket af støjen, medens fasen Φ_k ændrer sig på følgende måde:

$$\Phi_k(t) = \Phi_k(0) - \frac{i}{\hbar} \int_0^t v_{sk}(t') dt' \quad (6)$$

Da v_{sk} erne for forskellige k 'er er statistisk uafhængige, beskriver (6) en tilfældig diffusion af de forskellige faser i forhold til hinanden. Under randomiseringen udviskes derfor enhver oprindelig korrelation af bølgefunktionens faser (og dermed mulighederne for interferens), medens den information, som ligger i de numeriske værdier $|c_k|$ eller absolutkvadraterne $|c_k|^2$ bevares. Hvis den vej, den enkelte fase i middel har nået at diffundere under processen (dvs. spredningen af integralet i (6)), er stor i forhold til 1 (eller 2π), vil ensemblemidlingen over de forskellige mulige "støjhistorier" $v_{sk}(t)$ bevirke, at systemet ikke længere er

beskrevet med en bølgefunktion, men med en statistisk blanding, hvor den aktuelle egenskab optræder med vægten $|c_k|^2$, der kan opfattes som en klassisk sandsynlighed, idet disse størrelser er ikke-negative og har summen 1. (Dette betyder dog ikke, at størrelserne i kraft af randomiseringen er blevet til sandsynligheder for manifesterede egenskaber, for det endelige kollaps har jo ikke fundet sted endnu. Randomiseringen sætter mulighederne for det kvalitative spring, men først når dette har fundet sted, er en af disse muligheder realiseret.)

Det endelige kollaps efter randomiseringen kan da beskrives som kollaps af en klassisk sandsynlighedsfordeling, og det er derfor ikke nødvendigt med en kvantitativ beskrivelse af dette spring (hvilket jo ifølge Kierkegaard heller ikke kan lade sig gøre), så længe vi vil stille os tilfreds med en statistisk angivelse af forventningsværdien af en manifest egenskab. Det er dette synspunkt, som også ligger til grund for måleteorien af Daneri, Loinger og Prosperi, hvis jeg har forstået den rigtigt, men den er langt mere indviklet, da disse forfattere ikke har benyttet semiotikken og FD-teoremet.

T15 : Måleapparatets responsefunktion beskrives ved mindst to parametre: en modstand R og en relaxationstid τ . Ud fra FD-teoremet for nulpunktsstøjen kan man formulere en betingelse, som sikrer, at randomiseringen finder sted inden for tiden τ , når styrken af koblingen mellem det kvantemekaniske system og måleapparatet, beskrevet ved modstanden R , overstiger en vis værdi.

Hvis måleapparatet beskrives som en simpel modstand, altså $Z(\omega) = R$ (uafhængig af ω) fås en "ultraviolet kata-

strofe" for nulpunktsstøjen i (1). Vi er altså nødt til at indføre en ekstra parameter, som får $Z(\omega)$ til at gå mod nul mindst så hurtigt som $1/\omega$ for $\omega \rightarrow (\infty)$. Dette opnås simplest ved at shunte modstanden med en kapacitet C, som vist på fig. 8.

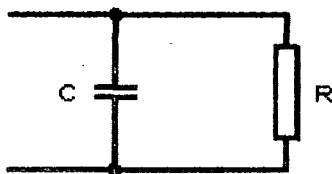


Fig. 8 . Elektrisk analogmodel for måleapparatets response.

Relaxationstiden er så $\tau = RC$, og den dissipative responsefunktion er givet ved udtrykket:

$$Z(\omega) = \frac{R}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (7)$$

"Breddefunktionen", som angiver spredningskvadratet på det stykke, fasen diffunderer i løbet af tiden t kan så findes ved dobbelt tidsintegration af nulpunktsspektrets Fourier-transformerede. Man finder:

$$\langle (\Phi(t) - \Phi(0))^2 \rangle = \rho \cdot G(t/\tau) \quad (8)$$

hvor ρ er proportional med modstanden R (hvis strømmen har dimensionen tid^{-1} , har modstanden dimensionen virkning, og i dette tilfælde er $\rho = 4R/h$), og $G(x)$ er en funktion, som for små værdier af x går som $-x^2 \ln(x)/2$ og for store x som $\ln(x)$ og iøvrigt er pænt voksende.

$$G(x) = \int_0^{\infty} \frac{1 - \cos(ux)}{u(1+u^2)} du \quad (9)$$

= $\frac{1}{2} [e^x E_1(x) - e^{-x} Ei(x)] + \tau + \ln(x)$, hvor E_1 og Ei er eksponential-integraler og τ er Eulers konstant.

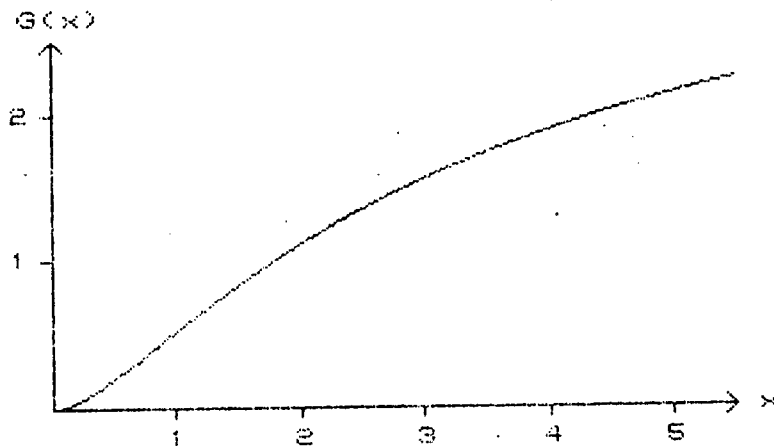


Fig. 9 Funktionen $G(x)$.

Den tid, som skal bruges til randomiseringen, t_r , kan så defineres ved $\langle (\Phi(t_r) - \Phi(0))^2 \rangle > 1$, dvs. $G(t_r/\tau) > 1/\mu$. Det ses, at hvis μ er stor, kan randomiseringen overstås meget hurtigt. Hvis man forlanger, at randomiseringstiden t_r skal være mindre end relaxationstiden τ , vil det kræve, at μ er mindst 2. For små værdier af koblingskonstanten μ vil randomiseringstiden vokse som $\exp(1/\mu)$, dvs. man kan let forestille sig koblinger så svage, at den nødvendige tid for at fasediffusionen kan udviske de oprindelige korrelationer vil overskride den eksperimentelle tidshorisont.

T16 : Kravene til "sætning af de aktuelle egenskaber gennem randomisering" (T14 og T15) definerer afgrænsningen af den ortodokse kvantemekaniks gyldighedsområde. Ufuldstændigheden af kvantemekanikken vil vise sig eksperimentelt, hvis en af disse betingelser ikke er opfyldt for måleudstyret.

Dette nyformulerede gyldighedskrav til kvantemekanikken (eller snarere kvantesemantikken, kollapspostulatet) benævnes i det følgende "sættepostulatet".

T17 : Ovenstående beskrivelse er lokalrealistisk, idet den kun bygger på fysiske virkninger ved "nærkontakt" (jfr. Peirces synechisme), der kan skildres ved vekselvirkningsbånd (jfr. T6 og T9).

Realismen i denne beskrivelse er knyttet til bølgefunktionen (T7 og T8), hvorimod den form for lokalrealisme, der ligger til grund for Bell's uligheder bygger på skjulte variable i den tavse virkelighed, som er knyttet til partikel-egenskaber.

Når "sættepostulatet" er opfyldt, vil den her benyttede "bølgeréalisme" stemme overens med den ortodokse kvantemekanik og derfor (i EPR sammenhæng) være i modstrid med Bell's uligheder.

Når sættepostulatet ikke er opfyldt, er vi ude over den ortodokse kvantesemantiks (kollapspostulatets) gyldighedsområde, dvs. de beskrivelser, som den ortodokse kvantemekanik har leveret for sådanne situationer, er forkerte.

Sættepostulatet er en nødvendig betingelse, men ikke en tilstrækkelig betingelse for en vellykket måling. Eksperimentalfysikerens kunnen kan jo ikke beskrives med en enkelt parameter. Men det er nødvendigt, at parameteren μ har en

vis styrke, for at en måling kan gennemføres inden for en given tidshorisont.

IV. EPR - eksperimenter .

T18 Forudsætningen for Bell's uligheder er, at den tavse virkelighed kan beskrives fuldstændigt ved de potentielle egenskaber af uafhængige partikler. Dette kan kun være i overensstemmelse med kvantesemiotikken, hvis måleudstyret udelukkende sætter (aktuelle og manifeste) uafhængige partikelegenskaber.

"Uafhængigheden" af de to (eller flere) partiklers egenskaber hentyder her kun til uafhængigheden af de to måleprocesser, hvorved enkeltpartikel-egenskaberne manifesteres. Der er altså ikke noget i vejen for, at partikelegenskaberne kan være statistisk korrelerede, men korrelationen må i så fald kunne henføres til en skjult parameter i den tavse virkelighed, og den vil derfor tilfredsstille Bell's uligheder.

T19 Coincidenstællere, time-to-amplitude convertere og lignende centralt placerede elektroniske apparater i Aspects (og tilsvarende) eksperimenter sætter aktuelle og manifeste egenskaber, der kun kan tilskrives topartikel systemet som helhed, og ikke de individuelle partikler.

Først og fremmest er det vigtigt at forstå, at T19 ikke implicerer noget brud med lokalrealismen, som den er defineret i EPR-artiklen (jfr. T17), selv om den fører til kvante-

mekanikkens resultat og strider mod Bell's uligheder. Dette hænger sammen med, at den skjulte virkelighed her beskrives ved en kvantemekanisk topartikel-bølgefunktion og ikke ved potentielle enkeltpartikel-egenskaber som i Bell's teori. Bølgefunktionens udvikling skildres ved Schrödingerligningen, som er en differentialligning i rum og tid og som sådan fuldstændig lokal. Man må også forestille sig, at projekti-
onsoperatorerne for den observable er rumligt lokaliserede til stedet for de pågældende "tællere", således at randomiseringen under indflydelse af støjpotentialet i T13 er lokalrealistisk beskrevet.

Lad os se på et EPR, spin $\frac{1}{2}$ eksperiment, som kræver fire coincidenstællere: $1\uparrow 2\uparrow$, $1\uparrow 2\downarrow$, $1\downarrow 2\uparrow$ og $1\downarrow 2\downarrow$. (\uparrow og \downarrow refererer til de faktisk satte feltretninger for Stern-Gerlach apparaterne for de to partikler. Da disse kan danne en vinkel med hinanden, er " \uparrow " altså i almindelighed ikke samme retning for de to partikler). Med brug af energibåndsteknikkens samlere kan relationsstrukturen mellem de fire enkeltpartikel-detektorer og de fire coincidenstællere beskrives ved diagrammet på fig. 10.

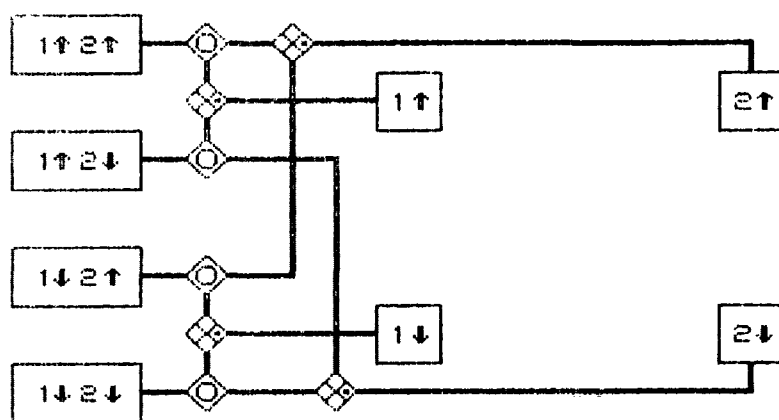


Fig. 10 . EB-relationsstrukturer for EPR-eksperiment.

EB-diagrammet udtrykker dels, at støjen fra hver enkelt coincidentstæller udbreder sig ligeligt (distributivt) til to enkeltpartikel-tællere, som er rumligt separerede (en 1-tæller og en 2-tæller) og dels, at der på hver enkelttæller må være en støjspænding, som er summen af støjspændingerne fra to coincidentstællere:

$$\begin{aligned}
 v_{1\uparrow}^{(e)} &= v_{1\uparrow 2\uparrow}^{(c)} + v_{1\uparrow 2\downarrow}^{(c)} \\
 v_{1\downarrow}^{(e)} &= v_{1\downarrow 2\uparrow}^{(c)} + v_{1\downarrow 2\downarrow}^{(c)} \\
 v_{2\uparrow}^{(e)} &= v_{1\uparrow 2\uparrow}^{(c)} + v_{1\downarrow 2\uparrow}^{(c)} \\
 v_{2\downarrow}^{(e)} &= v_{1\uparrow 2\downarrow}^{(c)} + v_{1\downarrow 2\downarrow}^{(c)}
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Selve det kvantemekaniske topartikelsystem kommer kun direkte i kontakt med enkeltpartikel-tællerne. Betragter vi et vilkårligt par af enkelttællere, f.x. $1\uparrow$ og $2\uparrow$, ser vi, at støjspændingerne på de to er statistisk korrelerede:

$$\langle v_{1\uparrow}^{(e)} \cdot v_{2\uparrow}^{(e)} \rangle = \langle (v_{1\uparrow 2\uparrow}^{(c)})^2 \rangle
 \tag{11}$$

Hvis coincidentstællerne fjernes, ville der ikke være nogen rimelig grund til at tro, at $v_{1\uparrow}^{(e)}$ og $v_{2\uparrow}^{(e)}$ kunne være korrelerede. Vi ser altså, at coincidentstællerne indirekte giver sig til kende over for topartikelsystemet ved eksistensen af støjpotentialer, der optræder samtidigt for de forskellige steder for partikel 1 og partikel 2. Det er derfor berettiget at beskrive randomiseringen ved et støjpotentiale som i T13:

$$\begin{aligned}
 V_S &= v_{1\uparrow 2\uparrow}^{(c)} P_{1\uparrow 2\uparrow} + v_{1\uparrow 2\downarrow}^{(c)} P_{1\uparrow 2\downarrow} \\
 &+ v_{1\downarrow 2\uparrow}^{(c)} P_{1\downarrow 2\uparrow} + v_{1\downarrow 2\downarrow}^{(c)} P_{1\downarrow 2\downarrow}
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

hvor projektionsoperatorerne er rumligt lokaliserede til to forskellige steder på én gang (stederne for hhv. en 1-tæller og en 2-tæller) og derfor sætter aktuelle egenskaber, der kun kan tilskrives topartikelsystemet som helhed, og ikke de individuelle partikler.

T20 : Det "retrospektive kollaps", som finder sted i den ortodokse kvantemekaniks teoretiske behandling af et EPR-eksperiment uden coincidentstøllere, kan ikke finde sted i virkeligheden.

Når coincidentstøllerne mangler, kan støjpotentialet ikke udtrykke projektionsoperatorerne $P_{1\uparrow 2\uparrow}$ osv., dvs. i dette tilfælde er det kun enkeltpartikelegenskaber, som er forud-sat. Hvis man efter forsøget (retrospektivt) finder coincidences ved sammenligning af tidspunkter for detektio-nerne af de enkelte partikler, kan denne handling umuligt virke bagud i tid og påvirke måleprocesserne. Enhver form for "delayed choice" kan kun virke fremad i tid og påvirke den senere databehandling, men ikke bagud i tid og påvirke tidligere fysiske målinger eller præparationer, i modsætning til, hvad Wheeler og andre forsøger at give indtryk af.

T21 : Resultatet af et EPR eksperiment uden coincidentstøllere må være i overensstemmelse med Bell's ulig-heder.

Denne tese følger af T18 og T20. Bemærkningen i T20 rammer ikke blot EPR forsøg uden coincidentstøllere (som jo indtil videre kun er foretaget i tankerne, selv om de er næsten enerådende i populære fremstillinger), men også f.x. det af Bohr (i EPR-svaret) diskuterede tankeeksperiment med en partikel, der passerer gennem en fjederophængt skærm,

samt forskellige "delayed choice" eksperimenter, diskuteret af Wheeler. Det er min opfattelse, at disse diskussioner er forkerte og fører til absurde resultater, hvis absurditet altså ikke siger noget om virkelighedens beskaffenhed. Kierkegaard, som jo sagde, at kvaliteten af springet altid er forud-sat gav en mere realistisk beskrivelse af kollapset (det kvalitative Spring) end Wheeler og Capra og hele gruppen af "kvanteholister", selv om det var et helt andet område, han udtalte sig om.

Hvis vi laver et EPR-forsøg uden coincidentstøllere, således at de to enkeltpartikel-opstillinger er reelt uafhængige (vi kan tænke os, at den ene står på Jorden og den anden på Pluto, men mon ikke det skulle kunne lade sig gøre i et almindeligt laboratorium), er der tale om to uafhængige detektioner. Først når man bagefter sammenligner resultaterne (med tidsangivelser for de enkelte registreringer af partikelankomster) kan man finde ud af, hvilke begivenheder, der var coincidente og således retrospektivt sætte topartikelkvaliteten. Det er en absurd forestilling, at det, om man foretager denne sammenligning eller lader være, skulle kunne virke bagud i tid og påvirke de to uafhængige registreringer, medens de fandt sted. En sådan forestilling kan kun begrundes med (forkert) begrebslogik, og der er ingen eksperimentelle antydninger af, at den skulle være rigtig.

Quantum non-locality and connectedness .

Paper submitted to the Physical Review Letters, august 1983. PACS no. 03.65 Bz. (Quantum Theory, Foundations of, Measurement Theory, misc. theories). Referee's reports arguing for the dismissal of the paper and the author's comments are included.

Abstract .

Experiments testing the validity of Bell's inequality for the spin-correlation of a pair of particles employ two distant sets of single-particle detectors connected to some central black boxes, like coincidence counters. Quantum noise in the connecting wires offers a possibility for explaining the observed violation of Bell's inequality without jumping to the conclusion that quantum mechanics implies non-locality. Two experiments are proposed in order to test whether the connections are relevant or not.

In recent years there has been a renewed interest in the problem of completeness of quantum mechanics, originally questioned by Einstein, Podolski, and Rosen (EPR).¹ The new development was initiated by J.S.Bell² who showed that reasonable ideas about hidden variables describing single-particle properties and locality of cause-effect relationships can be cast into a form of inequalities contradicting quantum mechanics. A subsequent series of measurements of the correlation of polarizations of the two photons emitted in a cascade have clearly indicated the correctness of quantum mechanics in an EPR context,³ thereby encouraging speculations about an inherent non-locality in nature.⁴ Especially the last experiment by Aspect et al.⁵ has strengthened the arguments for non-locality although the experimenters themselves warn against taking the results as evidence for the existence of signals propagating faster than light.

The Aspect experiment is a genuine "delayed choice" implementation of the EPR-device originally proposed by Bohm.⁶ It is important to realize the truth of the remark that the experiment does not indicate the existence of superluminal signals, understood as pulses of energy and information employable for communication. In fact, the device cannot communicate anything between the two distant places, A and B, where the single particles are detected, because the probability of either detection event at place A is independent of the setting of polarization direction at place B. Only the conditional probabilities at A, for a particular outcome at B, depend on the relative angle between the two polarizers, and Bell's analysis has shown that the observed dependences cannot be explained by local interactions between the single-particle detectors and the individual particles.

The situation has been described very convincingly as a

conundrum by Mermin⁷ who employed a non-specialist language in order to stress the general philosophical implications of such experiments. An important point in Mermin's exposition is the emphasis laid on the absence of connections between the detectors at the two distant places, A and B:

"- there are neither mechanical connections (e.g. pipes, rods, strings, or wires) nor electromagnetic connections (e.g. radio, radar, or light signals) nor any other known relevant connections. Irrelevant connections may be hard to avoid. For example, all three parts may sit on the same table top."

For a naive consideration it is difficult to reconcile Mermin's remark with the circuit diagrams of the actual experiments from Freedman and Clauser to Aspect and co-workers. All these diagrams show clearly that the two distant sets of single-particle detectors are connected with solid wires to some "central black boxes", like coincidence counters and/or time-to-amplitude converters. Apparently, these connections are to be considered "irrelevant", but why?

A physicist confronted with this question may answer that these connections are "one-way channels" only. They serve to lead signals from the single-particle detectors to the central black box, but as the passage goes through active devices (amplifiers) they cannot lead signals or noise the other way and therefore cannot have any influence on the detection of singles. This consideration is certainly well founded for classical signals and thermally excited "coherent" noise, but not for the quantum mechanical zero-point noise.

The explicit purpose of the Aspect experiment⁵ was to eliminate the possibility of sub-luminal communications in the direct channel between the sites A and B (i.e. the vacuum where the photons fly). This was achieved by a sophistica-

ted technique of acousto-optical switching between two possible photon trajectories leading to polarizers of different settings, both at A and B. The arrangement thus contained four different polarizers and single-detectors which were simultaneously monitored with a centrally placed fourfold coincidence counter set.

T.W.Marshall, one of the few physicists who dared publish expectations contrary to orthodox quantum mechanics before the results of the switching experiment was known,⁸ drew attention to the electromagnetic zero-point noise in the direct channel. Marshall considered this field a source of quantum indeterminacy and a mode of communication that might explain the observed quantum mechanical correlations in previous non-switching experiments. Although the possibility of such a communication through three dimensional space over distances up to 13 m seems remote, it is at least rooted within established physics and as such more worthy of consideration than ad hoc proposals of hitherto unknown particles, psychic forces, or religious fields of all pervading consciousness. It seems then that one of the clearest conclusions that can be drawn from the outcome of the switching experiment is that it rules out Marshall's proposal, whereas the previous experiments have shown that vacuum fluctuations are unable to destroy quantum correlations over normal laboratory distances.

If one thinks (as does the present author) that the observed violation of Bell's inequality requires an explanation it seems that the least bizarre possibility lies in the poorly understood rôle of quantum noise in the wires from the central black box to the detectors at sites A and B, where no switching takes place. As the coincidence technique makes the temporal order of the detection events at A and B irrelevant one should not think of these connections as a

communication link from A to B or the other way but rather as a mean whereby the central black box may impose a correlation in the states of the single-detectors at A and B.

Aspect, in his presentation of the idea of the switching experiment,⁹ has apparently taken such a possibility into account, because he admits that the hidden variables, λ_1 and λ_2 , associated with the two spatially separated single-detectors may be correlated. However, within Bell's scheme of reasoning this seems to be unimportant because the cause of such correlation must antedate the emission of the photon pair and it can therefore be included in the hidden variable λ describing the undetected pair. It seems, therefore, that Bell's theory is unable to explain the correlations observed in a coincidence monitored experiment.

The question whether an explanation can be provided by quantum mechanics itself raises some difficult logical problems. First of all: we must be sure that the mere application of a quantum mechanical concept, like a two-particle wavefunction, does not act as a Trojan horse letting non-locality sneak in from the beginning. It seems, however, that this can be avoided by making a clear distinction between quantum mechanics proper (together with quantum field theory) on one side and quantum semantics, i.e. the verbal interpretation of the wavefunction on the other side.

Quantum mechanics proper is concerned with the structure of wave equations, calculation of matrix elements etc. devoid of semantics and therefore rather uncontroversial among physicists. There is no indication of non-locality in the differential wave equations apart from the use of classical potentials in a non-relativistic case which everybody knows can be handled in a more proper way satisfying the principle of locality (Einstein separability). It looks as if the apparent non-locality is a semantic ghost arising

when the so-called Copenhagen interpretation of the wave-function is invoked.

Niels Bohr, in his reply to EPR,¹⁰ stated the crucial semantic formula in the following way:

"- there can be no question of any unambiguous interpretation of the symbols of quantum mechanics other than that embodied in the well-known rules which allow to predict the results to be obtained by a given experimental arrangement described in a totally classical way."

Struggling to understand Bohr's semantic thesis one may consider the following questions:

1. What type of description (apart from being classical) of the experimental arrangement is required as a minimum in order to ensure that the well-known rule of probability will be satisfied by the experiment? (Certainly, it is not enough for me to postulate that my coffee-cup is a bona-fide measuring apparatus).
2. For an EPR correlation experiment: is it irrelevant to the description required whether it is coincidence monitored (i.e. connected) or not?
3. Is the proper description alone (by some verbal magic) enough to ensure the validity of the rule, or should we try to locate some sort of physical action of the measuring apparatus on the quantum system that can be made responsible for the establishment of the rule?

A proper answer to 1 seems to depend on a realistic theory of measurement that will also be an answer to 3, whereas question 2 can be decided experimentally in its own right. As all EPR-experiments actually performed have been

coincidence monitored or similarly connected it would seem to be a natural suggestion that some interested group of experimentalists should try to make a similar experiment without these connections in order to see whether they really are irrelevant. Such an experiment would have to use two independent time measurements of the individual detection events so that the coincidences can be found retrospectively by comparing the two time records. No switching of particle trajectories would be necessary, and the accuracy of time measurements needs not be very high because the source rate can be arbitrarily low. My guess for the outcome of such an experiment is that it would satisfy Bell's inequality, because the properties that are pre-supposed or pre-set by the arrangement belong to single particles as is assumed in Bell's theory. In contradistinction to this the properties pre-set by a coincidence monitored experiment are genuine pair-qualities with a clear correspondence to the quantum mechanical two-particle wave function but rather alien to Bell's concept of local hidden variables.

A rudimentary attempt to answer questions 1 and 3 by considering the phase-randomization due to quantum noise leads straight to the second proposal.

First, we may note that a measurement is an irreversible or dissipative process and the existence of noise is therefore implied by quantum mechanics through the fluctuation-dissipation theorem of Callen and Welton.¹¹ A modern treatment by A. Schmid¹² has shown that the action of quantum noise can be described by a semiclassical Langevin equation, at least if the coupling to the dissipative medium is strong enough. A rough sketch of the measurement process in the linear language of quantum mechanics is then obtained by the concept of phase-randomization: Under the influence of noise-potentials the phases of the expansion coefficients of

the wave function after the eigenstates pre-set by the measuring apparatus will diffuse randomly and gradually become statistically independent. The density matrix describing the original pure state is thereby diagonalized to a classical probability distribution, and, in accordance with the theory of Daneri et al.,¹³ this is all we need for a statistical prediction of experimental results.

If this explanation shall be applicable to an EPR-experiment where the eigenstates refer to pairs of distant particles it is necessary that there exists a noise-potential that is localized to the two distant places at the same time. The existence of such a potential can only be justified in a local-realistic way for the connected case, by assuming that the quantum noise for the central black box is propagated to the single-detectors through the connecting wires. The correlation time for this noise must be closely related to the window of coincidence τ_c and therefore greater than the temporal extension of the wavepackets τ_i . (In the Aspect experiment $\tau_c = 18$ nS, $\tau_i = 5$ nS).

Until now we have tacitly assumed that the source is placed with nearly equal distances to the places A and B as has been the case in most of the EPR-experiments hitherto performed. In the second experimental proposal coincidence monitoring is maintained but the correlation of the hypothetical noise at the times and places of single-detections is gradually diminished. This can be achieved by displacing the source from the midpoint and compensating for the difference in the time of flight of the two photons by inserting a delay on one side of the coincidence counter. A single point in the experimental data by Faraci et al.¹⁴ seems to indicate this possibility: A sufficiently large asymmetry will bring the correlation well within the range of Bell's inequality. The necessary difference between the distances

from the source to the sites A and B should be of the order $c \cdot \tau_c / 2 = 2.7$ m if a passive delay is used, so there should be ample space to study the transition from quantum correlation to the Bell regime within the total A-B distance of 13 m used in the experiments of Aspect and co-workers.

The two experimental proposals in this letter are derived from the general idea that quantum mechanics is consistent but incomplete, like mathematics according to Gödel. There seems to be a hidden logic of good experiments that normally grants the validity of quantum semantics, but, being conscious of that it should be possible to design an equally good experiment satisfying Bell's inequality. The quantum semantics of the Copenhagen school suffers somewhat from lack of realism. A more realistic "quantum semiotics" inspired by the philosophy of C.S. Peirce could be needed in order to repair some of the conceptual difficulties. An introductory account of quantum semiotics is in preparation and will be published elsewhere.

The author gratefully acknowledges the inspiration of many discussions with R. D. Mattuck, E. Brun Hansen, T. Juul Andersen, and J. P. Christensen.

References .

1. A. Einstein, B. Podolski, and N. Rosen, Phys. Rev. 47 , 777 (1935).
2. J. S. Bell, Physics 1 , 195 (1965).
3. J. F. Clauser and A. Shimony, Rep. Prog. Phys. 41 , 1981 (1978).
4. B. d'Espagnat, Scientific American, november 1979.
5. A. Aspect, J. Dalibard, and G. Roger, Phys. Rev. Lett. 49 , 1804 (1982).
6. D. Bohm, "Quantum Theory", Prentice Hall, N.Y. (1951).
7. N. D. Mermin, Am. J. Phys. 49 , 940 (1981).
8. T. W. Marshall, Phys. Lett. 75A , 265 (1980).
9. A. Aspect, Phys. Rev. D14 , 1944 (1976).
10. N. Bohr, Phys. Rev. 48 , 696 (1935).
11. H. B. Callen and T. A. Welton, Phys. Rev. 83 , 34 (1951).
12. A. Schmid, J. Low Temp. Phys. 49 , 609 (1982).
13. A. Daneri, A. Loinger, and C. M. Prospero, Nuclear Physics 33 , 297 (1962).
14. G. Faraci, D. Gutkowski, S. Notarrigo, and A. R. Pennisi, Lett. Nuov. Cim. 9 , 607 (1974).

First referee's report .

This paper proposes two modified versions of the experiments of Aspect et al. In the first there are no coincidence counters linking the two detectors, the identification of correlated pairs being made by accurate timing devices. In the second, the detectors remain so linked, but the source is moved closer to one detector than the other.

The authors guess is that the data in the first modification will satisfy Bell's inequality, and the implication is that in the second it should also move closer and closer to satisfying the inequality as the asymmetry in the position of the source increases. The thought underlying both guesses is that in some unexplained way the strong quantum correlations are imposed by correlated noise signals sent the detectors through the circuitry connecting them to the coincidence counter. No suggestion is given as to this might come about -- the presumption seems to be that the quantum correlations that violate Bell's inequality are so strange that any alternative possibilities should be tested. Quantum noise in the linking wires is, as the author puts it, perhaps "the least bizarre possibility."

The trouble with this approach is that there seems to be no end to it. There will always be other candidates for the least bizarre possibility to replace the last one to be ruled out. It is, to be sure, entertaining to conjure them up, but my own view is that this kind of casting around in the dark does not belong in Physical Review Letters.

Second referee's report .

The idea that "quantum mechanics proper" is "devoid of semantics" makes no sense. Any physical theory (and quantum mechanic in particular) has its semantics, its rules of interpretation, and the difference in semantics between quantum mechanics and classical seems crucial, and not to be ignored. From the quantum point of view there is nothing non-local about the EPR experiment. As Pitowsky points out, the EPR Experiment verifies the existence of quantum correlations not essentially different from those in a ferromagnet, and need not be carried out. Certainly it receives too much space and emphasis.

Error in the Abstract: Violation of Bell's inequality does not imply that quantum mechanics implies non-locality, even without this work. Quantum mechanics + hidden variables implies non-locality.

Author's comment to the referee's reports (october 1990)

The first referee has apparently read the paper and gives an essentially correct summary of its main idea and the two experimental proposals. However, the report suffers from the misconception that I try to propose an alternative to the quantum correlations which is clearly not the case. I'm looking for an explanation for these correlations, and I regard the first referee's remarks as an expression of the philosophical attitude that attempts of explaining physical laws should not be made. This is a quite common attitude among physicists today, but to my opinion it disqualifies a referee of papers about the interpretations of quantum mechanics.

The second referee seems to think that any attempt to distinguish between "quantum mechanics proper" i.e. the structure of wave equations etc. and the semantics, i.e. the rules of interpretation of the wave function should be banned as illegal. This attitude at one stroke rules out the possibility of having several interpretations of the same formalism. According to the second referee's point of view there are no questions at all about interpretations, and the EPR experiment "receives too much space and emphasis". This may be a legitimate view, but again, even stronger than in the first case, it disqualifies the referee to the job of reviewing papers about interpretation of quantum mechanics.

The referee system employed by the Physical Review Letters may have its strong points ensuring a reasonable quality of papers about problems of an uncontroversial nature. Sometimes one may be lucky and get a qualified critique from one of the anonymous referees, but in this case I'm afraid there would be nothing to gain from a further discussion with the referees, even if I had the chance.

Springet fra København .

(Kronik i Information på Niels Bohrs 100 års fødselsdag, d. 7. oktober 1985).

Moderne fysik er mere end noget andet et internationalt projekt. Hvis der fremkommer en ny fysisk teori, f.x. for den syvende knyst på kurven for metallet Dysprosiums elektriske modstand som funktion af temperaturen, kan intet være sagen mere uvedkommende, end om teoriens ophavsmand kommer fra Djakarta eller Ledøje. Fysikkens fagsprog, som det optræder i de internationale tidsskrifter, er løsrevet fra enhver hentydning til nationale særheder og kulturelle traditioner, bortset fra fysikkens egne traditioner. Noget andet er så, at baggrundssproget, som sporadisk optræder mellem de matematiske formler, næsten altid er engelsk, og artiklens forfatter med stor sandsynlighed er en hankønsperson, født og opvokset i USA. Sandsynligheden taler også for, at hans forskning er helt eller delvis finansieret af militæret eller af et af de store elektronikfirmaer.

Højborgen for den internationale fysik her i landet er Niels Bohr Instituttet på Blegdamsvej i København. Her er internationalismen ægte, og ikke blot et skalkeskjul for det amerikanske militær-industrielle kompleks. Her mødes amerikanske og russiske fysikere med danskere, japanere, indere og kinesere. De slår sig ned ved samme bord i kantinen og udveksler sære formler på små lapper papir fra de fremlagte notesblokke. Ind imellem diskuteres politik, filosofi, uddannelse og kunst, og der er almindelig enighed om, at den åbne og internationale atmosfære, man finder netop her, vil-

le være den bedste garanti for en varig verdensfred, hvis den kunne tage springet fra Blegdamsvej til den vide verden.

Hvis man sammenligner klimaet ved faglige debatter på Bohr Instituttet med klimaet ved tilsvarende debatter, f.x. hos filosoferne eller teologerne i den indre by, ser man tydeligt betydningen af den tolerance, der følger af den internationale omgængelighed og af arven fra Niels Bohr. Når filosoffer og teologer diskuterer meningsforskelle, bruger de ofte stygge skældsord og er ved at flå hovederne af hinanden. Sådan virker det i hvert tilfælde, når man kommer fra det fredfyldte Bohr Institut, hvor noget af det groveste, man kan sige om modpartens standpunkt er, at det er "højst interessant".

Uanset hvad man kan mene om sjælevandring og den slags er det nemt at føle tilstedeværelsen af Niels Bohrs ånd i huset på Blegdamsvej nr. 17. Den ytrer sig bl.a. i medarbejdernes talemåder og piberygning. Den dvæler med forkærlighed i det gamle auditorium A, hvor et larmende tærskværk af en motor sindigt skyder den tætbeskrevne tavle i vejret og afdækker et tilsyneladende uendeligt system af tavler bagved tavler. Opfindelsen kunne være af Storm P., men skyldes Niels Bohr. Her har han stået i timer og dage ved katederet, medens de kvikke fyre, Heisenberg, Pauli, Landau, Gamow m. fl. sad årvågne på første række, bevæbnet med trompeter og legetøjspistoler. En flok store legebørn, hvis flyvske ideer kom til at vende om på mangt og meget. Her har jeg selv sidet sammen med så mange andre og lyttet til kedelige og spændende foredrag, og en dag stod jeg benovet ved katederet og førte fysiktraditionen videre over for nye studenter.

Her i auditorium A sad jeg også en dag i begyndelsen af tresserne for at høre min ven og medstuderende Otto Eisler holde kollokvium om visse aspekter af Albert Einsteins rela-

tivitetsteori. Ind tren den gamle professor emeritus Niels Bohr og satte sig på første række. Efter foredraget gik han op til tavlen og komplementerede kollokventen for en udmærket fremstilling, men der var dog et enkelt punkt, han lige ville have belyst lidt mere, for "netop dette punkt har jeg tit diskuteret med Albert, og han sagde, at....". Det blev et langt punkt, men efter et par timers livlig diskussion, som hele første række deltog i, blev sagen afklaret til alles tilfredshed, og vi menige studenter kunne gå hjem med et fjernt blik i øjet, berørt af historiens vingesus.

Hundrede år er der gået, fra Niels Bohr ankom til denne verden, og aldrig før har vel hundrede år medført så store forandringer. Fysikken har været en hovedkraft bag de teknologiske omvæltninger, og ingen ved sine fulde fem vil i dag mene, at fysik er en særlig luksus for de få i elfenbenstårnet. Atomkraft, raketter, lasere og datamater tegner på godt og ondt samfundet i dag, og ingen af disse opfindelser ville have været mulige uden fysikkens grundforskning. Den stille leg med matematikkens symboler er blevet vor tids magi og en produktivkraft uden sidestykke.

Fysikkens internationalisering, den åbne udveksling af ideer, som Bohr var forkæmper for, har naturligvis spillet en rolle i at gøre fysikken til en produktivkraft. Det er dog nok især et andet fænomen, som har sat skub i denne udvikling, og det er "big science", organiseringen af store målrettede forskerhold. Det er noget ganske andet end den åbne internationalisme, idet de store hold ofte opretholder en lukket facade over for omverdenen, indtil produktet er færdigt, og resultatet kan offentliggøres eller dimsens sættes i produktion. Denne arbejdsmåde var ikke Bohrs stil, selv om han deltog i det store team, som under anden verdenskrig producerede den første atombombe: Den særlige Bohr-

ske arbejdsform, som har gjort instituttet på Blegdamsvej til et internationalt valfartssted, er dialogen, den frie udveksling af halvfærdige ideer, som slibes til under samtalen.

Niels Bohr vil selvfølgelig blive husket for nogle af sine banebrydende skriftlige arbejder, men den store respekt for ham skyldes ikke så meget hans skriftlige udtryksform, som var tung og ofte dunkel. Han mestrede først og fremmest den talte dialogs særlige fremkaldelsesproces, og det er denne evne, som satte ham i stand til at samle genierne omkring sig og være fødselshjælper for deres revolutionerende teorier. Han blev atomalderens Sokrates.

Den Bohrske åbenhed er langsomt blevet trængt i baggrunden til fordel for konkurrencepræget "big science", spændt for våbenteknologiens vogn. Men instituttet på Blegdamsvej ligger der endnu, og dets særlige stil er en københavnsk specialitet, som er kendt i den store verden, men ikke har taget springet derud. På samme måde er det gået med Bohrs mest originale bidrag til fysikken, komplementaritetens filosofi til fortolkning af kvantemekanikken. Det er karakteristisk for fysikken, at der er bred enighed om de gældende teorier, og man har ikke, som f.x. i psykologi og sociologi vidt forskellige "skoler", der udtaler sig modstridende om de samme emner. Men netop på kvantemekanikkens område er der forskellige skoler, og "Københavnerskolen" er den dominerende, men absolut ikke den eneste seriøse teori.

I de sidste par år har "Københavnerskolen" tilsyneladende fået mere vind i sejlene som følge af nogle eksperimenter, bl.a. udført af Alain Aspect og hans medarbejdere i Orsay ved Paris. Eksperimenterne går direkte ind i en diskussion mellem Bohr og Einstein fra 1935, og har ifølge de fleste kommentatorer (f.x. Tor Nørretranders i Information

d. 15./10. og 22./10., 1982) endeligt afgjort sagen i Bohrs favør. Den "Københavnertolkning", som er blevet styrket ved disse eksperimenter, går simpelthen ud på, at kvantemekanikkens formler er rigtige, selv under omstændigheder, hvor deres gyldighed umiddelbart ville synes at stride mod den sunde fornuft. Det er blevet et point til formelrytteri- et, til de kredse i fysikken, som mener, at formlerne bare er rigtige, og at det er spild af tid at spekulere over, hvornår og hvorfor de virker. Bohrs bidrag til fysikken var imidlertid af en helt anden karakter. Han var præcis det modsatte af en formelrytter. Han insisterede på, at det uforudsigelige og springende var et uomgængeligt træk ved naturbeskrivelsen, og han søgte altid bag om formlerne for at afdække de logiske og sproglige forhold, som ligger til grund for dem, og som også gør sig gældende i andre videnskaber end fysikken.

Man kan desværre konstatere, at den "Københavnerskole", som har gjort sig internationalt gældende, har karakter af et ortodokst formelrytteri, som ligger fjernt fra ånden i Bohrs arbejde, og at komplementaritetsteoriens filosofi, som er Bohrs højst personlige og meget københavnske sammenfatning af kvantemekanikkens erkendelsesteori, stort set ikke er blevet forstået af det internationale fysikersamfund. Fysikken er blevet meget selvtilstrækkelig og tror ikke for alvor på nytten af alment filosofiske overvejelser. Man har et formelapparat, der virker, og dermed basta. Filosofien kan få lidt "lip service" ved festlige lejligheder (som denne).

Man kan så overveje, hvordan det kan være, at "Københavnerskolen" nyder en så udbredt international respekt, når det specifikt københavnske, Bohrs komplementaritetsteori, betyder så lidt i praksis. Måske rører der sig i mange fysikere en lidt nostalgisk respekt for manden Niels Bohr, som

Springet fra København

med næsten usvigelig sikker, om end uforståelig intuition har udstukket retningslinjerne for århundredets fysik og forudsagt resultatet af Aspect eksperimentet, som siges at stride mod den sunde fornuft. Men hvorfor prøver man så ikke at forstå den filosofi, som førte til Bohrs sikre forudsigelser? Det var jo ikke en krystalkugle, men logisk tænkning, som lå bag, og Bohr har aldrig bestræbt sig på at fungere som et orakel.

Jeg tror, at svaret skal søges i, at Bohrs filosofi netop er meget københavnsk. Den bygger på nogle forudsætninger, en særlig begrebslogik, som er udviklet i 1800-tallets København, men som ikke specielt har noget med fysik at gøre.

København i 1800-tallet var ikke nogen stor by, og når man gik tur i gaderne, var der større chance end i dag for et tilfældigt møde med bekendte og en spontan diskussion. Omkring 1835 kunne man, hvis man gik en tur på Volden, lette på hatten og få sig en sludder med Poul Martin Møller. Bag efter løb man så måske på Grundtvig, H.C. Andersen og den unge Søren Kierkegaard i selskab med soldebrødrene. Senere på århundredet, omkring 1890, har man kunnet møde filosofen Harald Høffding i livlig samtale med fysiologen Christian Bohr. Georg Brandes hilste kun afmålt på Høffding, de havde en uoverensstemmelse angående Nietzsche, som gjorde forholdet temmelig anspændt, selv om de var rørende enige på så mange andre punkter, bl.a. i deres harme over den måde, Estrup regerede på.

I det Bohrske hjem fortsattes diskussionen, og her dukkede nu også fysikeren Christian Christiansen og sprogforskeren Vilhelm Thomsen op. Samtalen kom vidt omkring, der var højt til loftet i Bohrs hus, og på gulvet sad brødrene Niels og Harald og lyttede med store øjne. Måske har man di-

skuteret "ånden i naturen" med reference til Goethe og H. C. Ørsted og mulighederne for at beskrive den med fysikkens eller poesiens sprog. Man har opdyrket en fornemmelse af sammenhæng i kunsten og videnskaben og genopfrisket Leibniz' tese, at "naturen gør ingen spring". Her har Høffding ud fra sit kendskab til Kierkegaards filosofi kunnet kaste en brand ind i debatten ved at lufte ideen om, at det personlige valg er et spring, som man ikke på nogen måde kan beskrive som en kontinuert overgang, og måske har han citeret fra "Begrebet Angest":

"Lad Matematikere og Astronomer hjælpe sig, hvis de kan, med uendeligt forsvindende Smaa-Størrelser. I Livet hjælper det ikke Een til at faa Attestats, end mindre til at forklare Aand."

Den særlige diskussionsform, som Niels Bohr lærte at kende i barndomshjemmet, var som en rød tråd i hans liv, som direkte leder frem til hans og Margrethe Bohrs indsats som værter i Carlsberg-æresboligen, som han overtog efter Høffding ved dennes død i 1931. Tobakken var en vigtig ingrediens i den Bohrske salon, og måske har dens slyngede tåger under loftet fungeret som et sindbillede på den fusion af ideer, som fandt sted i samtalens løb.

I 1905 var Niels og Harald sammen med 10 medstuderende ved Høffdings filosofiundervisning med til at oprette en tværvideenskabelig studiekreds eller salon, som fik navnet "Ekliptika", idet kredsen ligesom himlens dyrekreds var begrænset til 12 medlemmer. Det er bemærkelsesværdigt, at der fra denne kreds er udgået ikke mindre end tre videnskabelige skoler, som alle i international sammenhæng er blevet betegnet "Københavnsskolen". Foruden Niels Bohr med kvantefysikken var der psykologen Edgar Rubin, som grundlagde en

Springet fra København

ny tradition med sin teori om synsoplevelsen. Endvidere var der sprogforskeren Viggo Brøndal, som sammen med Louis Hjelmslev lagde grunden for den strukturelle lingvistik.



Niels Bohr 7.10.1885 - 18.11.1962

Tegning: Per Marquard Otzen.

Der findes ingen skriftlige referater fra møderne i Ekliptika, men senere nedskrevne erindringer fra flere af medlemmerne efterlader ingen tvivl om den store betydning, diskussionerne havde for modningen af de videnskabelige ideer. De ingredienser, som udbredtes og smeltede sammen lige som piberøgens tåger, havde naturligvis et kraftigt islæt af Høffdings tanker. En særlig københavnsk eksistentialisme er opstået ved mødet mellem Kierkegaard og Nietzsche. Kierkegaard var på den tid ikke internationalt kendt, men i Danmark var hans omdømme som filosof styrket betydeligt, takket være Høffdings indsats. Modpolen Nietzsche kendtes på den tid næsten kun i København, hvor han havde sin bedste fortalere i Georg Brandes. En anden ingrediens, som kan spores i Københavnerskolerne udgået fra Ekliptika, er den amerikanske pragmatisme. Høffding havde i 1904 været på et længere ophold i USA, hvorunder han boede hos pragmatismens bannerfører William James, som han satte meget højt. Efter USA var Høffding i England, hvor han besøgte sprogforskeren Victoria Lady Welby. Både fra James og Welby aner man via Høffding en indflydelse fra den grå eminence i amerikansk pragmatisme, Charles S. Peirce, som dog næppe har været direkte kendt af Ekliptikas medlemmer.

Niels Bohr var nok mere påvirket end lillebroderen Harald af atmosfæren i Ekliptika og mere tilbøjelig til at gå filosofiske svinkeærinder. Medens Harald strøg igennem sit matematikstudium og fik sin kandidatgrad (april 1909), sad Niels og fordybte sig i Kierkegaards "Stadier paa Livets Vej". Her udvikles ideen om springet, som ikke kan analyseres i detaljer, men som markerer de afgørende overgange i personens liv fra en æstetisk til en etisk, og endelig til en religiøs livsholdning. Niels var dybt engageret i tankegangen, men var ikke enig med Kierkegaard på alle punkter og endte med at fravælge religionen og bekende sig til fritæn-

keriet. I 1912 tog han springet til det etiske liv gennem ægteskabet med Margrethe Nørlund.

Kvantespringet kom ind i fysikken med Bohrs atomteori i 1913. Det var en uhørt dristig teori, som brød med den klassiske fysik på to afgørende punkter. For det første antagelsen om, at elektronen kunne befinde sig i visse stationære baner uden at udsende stråling. For det andet, at lysudsendelse fandt sted, når elektronen sprang fra en stationær bane til en anden. Kvantespringet kan ikke beskrives i sædvanlige fysiske termer, det ligger uden for tid og rum, men eksisterer alligevel i sin egen begrebslogiske verden. Den sikkerhed, som Bohr kunne postulere kvantespringet med, har han ikke kunnet finde belæg for noget sted i fysikken, men kun i Kierkegaards logik. Det er det mest ærkekøbenhavn-ske element i fysikken, og det er aldrig blevet forstået af det internationale fysikersamfund, selv om det har vist sig umuligt at afskaffe. Det er for de fleste fysikere en ufattelig tanke, at fysiske fænomener kan forstås ud fra en psykologisk redegørelse for begreber som forelskelse, angst, synd og skyld, og Kierkegaards værker er aldrig indgået i et fysikpensum. Selv fagfilosoffer (bl.a. David Favrholt) foretrækker at tro, at Niels Bohrs filosofi var uden filosofiske og litterære forudsætninger, på trods af at han selv har henvist til bl.a. Poul Martin Møller, Kierkegaard og William James.

Det uberegnelige spring er et gennemgående Kierkegaard-tema i Bohrs filosofi, og mange anekdoter fortæller om, hvordan han kunne gribe små dagligdags begivenheder i flugten for at illustrere sin pointe. Karakteristisk for springet er, at det er forudsat som en mulighed eller en forestilling, før det finder sted. I kvantefysikken sættes muligheden af måleapparatet, i dagligdagen ofte af en vag

forestilling, som er langt fra det gustne overlæg. Som for eksempel den gang, da matematikeren Besicovich i desperation kastede bocciakuglen baglæns over hovedet og den landede lige midt i feltet. Fra fodboldspillet har begge brødrene Bohr kendt til disse "peak experiences", hvor den rationelle sigten efter målet viger for den totale hensigt, og hvor bevidstheden forlader hjernebarkens fængsel og trækker bolden derhen hvor den skal som en perle på en snor.

Et andet Kierkegaard tema hos Niels Bohr, som er svært at fatte for udenlandske fysikere, er meddelelsesdialektikken, den stil, man vælger for at få sit budskab frem til modtageren. Den gode lærer er lidt af en forfører, og det egentlige budskab ligger ikke altid i de ord, han siger eller skriver. Bohr udtrykte sig ikke klart, men han var meget omhyggelig med sine formuleringer, og uklarheden var et bevidst valg af stil. De fleste fysikere bestræber sig på at udtrykke sig så klart som muligt, og Bohrs valg af stil vækker hos dem undren og forargelse.

En sådan forargelse kom til udtryk i et interview med John Bell i det svenske fjernsyn for to år siden. Bell er en retlinet irsk fysiker og en pioner i den nyere udvikling i kvantefysikken, som bl.a. har ført til Aspect eksperimentet. Han citerede Bohr for bemærkningen: "Jeg bestræber mig altid på ikke at udtrykke mig klarere, end jeg tænker". Sådan noget kan man ikke sige, når man er fysiker, mente Bell. Nej, det er ikke lige stilen i fysikken, men det er den stil Kierkegaard anbefaler og praktiserer, en "elastisk Tvetydighed", som ikke "besnakker Pointen", når det gælder om at forklare "det kvalitative Spring" (i Begrebet Angest) eller i følgende citat fra "Philosophiske Smuler", som er noget af det mest knudrede, han har skrevet:

"....thi det er altid en Fordeel, en Lettelse, når det er det Vanskelige, jeg skal tilegne mig, at det bliver gjort mig vanskeligt."

Vanskeligt er det at forstå Niels Bohr, og det kommer sig af, at han havde noget på hjerte og bestræbte sig på at give det videre. Sandheden er ikke noget, man kan tage som en pille. Den er snarere som guldkrukken for enden af regnbuen, og man når kun derhen ad de vildsomme stier, ikke ad motorvejen. Han lod sig vejlede af nogle af de bedste i den danske tradition, og det gør ikke hans format mindre, at han havde sine forudsætninger. Syntesen var hans egen, hans liv, ham selv. Vi elsker ham, fordi han ikke kun var en stor fysiker i det internationale samfund, men også en kunstner og filosof med rod i det københavnske.

Letter and reply in Physics Today

Letter and reply in Physics Today, november 1985 .

Concerning David Mermin's paper "Is the Moon There When Nobody Looks?", Physics Today, april 1985.

June 4th, 1985.

Letter to the editors, Physics Today.

Dear sirs.

In the april issue of Physics Today there is a most interesting paper by David Mermin on the non-locality problem raised by the quantum mechanical violation of Bell's inequality, which has been experimentally proven by Aspect and his coworkers in a very convincing way.

Although I find that dr. Mermin's *gedanken* experiment gives an extremely lucid (and entertaining) exposition of the subject there is one big question left in my mind, as regards the comparison of Mermin's device to the real experimental situation. It is emphasized very strongly in the paper that there are no connections between the pieces . However, having studied the papers of Aspect et al, I'm left with the impression that there are indeed connections that are plainly visible to the naked eye, namely the wires connecting the single-photon detectors to a set of "central black boxes" like coincidence counters and a time-to-amplitude converter. As far as I have understood, the careful calibration of the coincidence window to the temporal sequence of single detections by choosing wires of appropriate lengths is a crucial feature of the experiments.

Now, Mermin claims in a paranthetic remark that when we have learnt what is inside the black boxes (by which I assume he means the particle source and the single-detectors) we will agree that there are no connections. I'm very intrigued by this remark because it seems to suggest that the wires in the real world that are so seemingly solid and present in the experiments are just an apparition of a spooky nature. Perhaps I should interpret the remark as saying that everybody who knows a little of quantum mechanics will know that the wires are irrelevant. I have lectured on the subject of quantum mechanics at the university of Copenhagen and have seen a couple of textbooks, but nowhere have I found something that justifies the claim that wires are irrelevant. On the contrary I find that Bohr's refutations of Einstein's thought experiments from the Solvay meetings 1927-30 all stress that even the macroscopic parts of measuring equipment are subject to quantum uncertainties.

Maybe there is something quite elementary that I have overlooked. I would therefore be very happy if somebody (maybe Mermin himself) could enlighten me and make it clear just what it is that I missed. I think that Mermin's paper is a very valuable contribution to the popularization of a difficult problem, but it would be even better if we got a clear answer to the question formulated above, which might conceivably spontaneously arise from an inexperienced listener.

Sincerely yours

Peder Voetmann Christiansen
Institute of Mathematics and Physics,
Roskilde University Center
P.O. Box 260 DK 4000, Roskilde, Denmark.

David Mermin replies :

(Only the relevant first part of Mermin's reply is included here, PVC november 1990).

T. W. Marshall and E. Santos, Thomas M. Jordan and Peder Voetmann Christiansen all make a similar point, which was also put very neatly in a private letter from Kenneth R. Brownstein. The actual experiments in Orsay differ from my *gedanken* demonstration in one important way. To make the demonstration correspond more closely to the real experiments, it is necessary to add that there are many runs in which only one of the two detectors signals an event. The data I describe are collected only from those runs in which both detectors flash. Another way of putting this is to note that in the real experiments there are connections in the form of coincidence counters that are responsible for single-event runs being unrecorded.

Is this a relevant connection? Certainly not if you believe in quantum mechanics. But if you really, deep in your heart, believe that quantum mechanics gives the last word on the subject, then you are unlikely to be interested in the experiments at all. If you regard the experiments as relevant, then you have to regard the connections as relevant. The detailed analysis of the Orsay experiments disposes of this complication by certain extremely reasonable subsidiary assumptions, which however, one could certainly imagine might be violated in some not unreasonable hidden-variable theory.

In the context of my *gedanken* demonstration, Marshall and Santos point out that this connection can be exploited to construct instruction sets that yield the most important features of the data I describe, and Jordan and Brownstein point out that it can be exploited to construct instruction

sets giving every feature of those data.

The trick is easily done, in any number of ways, by having in addition to the instructions R (detector flashes red) and G (detector flashes green) a third instruction, X (detector fails to respond in any way). Thanks to the coincidence counters, if either detector is set to a number for which the instruction it receives is X, no event is recorded at either end. (In this model the particles need not carry identical instruction sets in each run.)

In fact this loophole is big enough to let through an instruction-set model that accounts for any distribution of results whatever, including statistics that violate physical (as well as metaphysical) locality, exploiting the connection provided by the coincidence counter to send real messages from one detector to the other.

To produce any data you want, you need only require that all instruction sets have X's in two of their three positions. The third ("colored") positions in a pair of instruction sets can be any of the nine possibilities $ij = 11, 12, 13, 21, \dots$ with equal probability. The values of the colors appearing on those instruction sets that are colored in positions ij are determined by whatever distribution one wishes to produce when the switches are set to i and j .

Of course this model has the observational consequence that single events, even for perfectly positioned ideal detectors, will occur eight times as often as coincidences. It is my guess that with some hard analysis and perhaps a few reasonable symmetry assumptions (such as rotational invariance) one ought to be able to rule out this kind of explanation without having to appeal to "the financially powerful members of our profession" to support even more refined experiments than the one done in Orsay. But I haven't yet

Letter and reply in Physics Today

figured out how to do this, and the point made by Marshall and the others is certainly a valid refutation of the claim one sometimes reads: that the Orsay experiments have ruled out even the logical possibility of a local realistic description of the correlations.

Another group of letters - - - -

Aspects eksperimenter - Hvad er det, som er så svært at forstå?

Aspects eksperimenter

Hvad er det, som er så svært at forstå ?

Udgivet af Statens Filmcentral, 1986; i forbindelse med filmen "Atomfysik og virkelighed" af Lars Becker Larsen.

Niels Bohr citeres ofte for at have sagt, at hvis man hører om kvantefysikken (komplementaritetens-filosofien) uden at blive svimmel, er det et sikkert tegn på, at man ikke har forstået noget¹. Bemærkningen kan omformuleres på mange måder, uden at dens paradoksale karakter svækkes: Hvis du synes, at sagen er klar, og at du har forstået det hele, så har du netop ikke forstået det. Omvendt, hvis du, efter at have set filmen "Atomfysik og virkelighed", føler en vag uro og har en fornemmelse af, at du nok ikke helt har forstået den, skal du ikke fortvivle. Du er så i godt selskab med dygtige fysikere. Som Alain Aspect siger i filmen: "There's always something strange in the picture", og John Stuart Bell kommenterer en anden berømt udtalelse af Bohr med ordene "It's absolutely obscure to me".

Der ligger imidlertid en betydelig fare i at gøre en dyd af uforståeligheden, og det kan let føre til en form for uansvarlighed, som er fremmed for fysikken. Det er fysikkens fornemste opgave, at gøre naturfænomenerne forståelige, og de fleste professionelle fysikere vil have svært ved at slå sig til tåls med standpunktet "kvantefysikken er absurd, men det er naturen altså også, og dermed basta!" (sml. udtalelserne af den danske fysiker Holger Bech Nielsen i filmen). J.S.Bell er en fysiker af den gamle skole, som foretrækker Einsteins holdning frem for Bohrs, og som i

hvert tilfælde ikke vil slå sig til tåls med et sådant standpunkt. Hans professionelle redelighed forbyder ham at lade som om han er tilfreds med udfaldet af Aspect's eksperimenter. Han havde ventet noget andet, men han accepterer eksperimenternes dom, at kvantemekanikken igen har vist sig som korrekt på trods af "den sunde fornuft".

Bell's store fortjeneste i denne sammenhæng er, at han har præciseret, hvad det er for en form for "sund fornuft", som kvantemekanikken ikke retter sig efter, og det er denne præcision, som har gjort eksperimenterne mulige. Aspect's eksperimenter har så vist, at naturen i bestemte laboratorie sammenhænge retter sig efter kvantemekanikken og ikke efter den af Bell præciserede form for sunde fornuft. I stedet for at lade os nøje med, at naturen er uforståelig (hvad den jo ikke altid er, herom vidner fysikkens success), så kan vi bruge Bell's indsigt til at præcisere, hvad det er, vi har svært ved at forstå. Derefter må vi så overveje, i hvor høj grad erfaringerne fra Aspect's "laboratorienatur" kan overføres til den egentlige natur uden for fysiklaboratorierne.

I det følgende gennemgås et idealiseret og simplificeret eksempel på et eksperiment, som ligner Aspect's første, og hvorpå en særlig simpel version af Bell's uligheder kan bringes i anvendelse. Eksemplet er inspireret af en populær artikel af den amerikanske fysiker N.D. Mermin², men ligger lidt tættere på det rigtige Aspect-eksperiment³ end Mermin's tankeeksperiment.

Betragt den skematiske fremstilling af forsøgsopstillingen i Aspect's første eksperiment, vist på fig. 1. Vi ser i midten en partikelkilde, som udsender et par af fotoner (lyspartikler) gennem to rør hen imod et par polarisatorer (de skraverede plader). Bag ved polarisatorerne er anbragt et par detektorer, som kan registrere ankomsten af en enkelt foton. En detektor vil altså kun

Aspects eksperimenter - Hvad er det, som er så svært at forstå?

registrere noget, hvis en foton er passeret fra kilden og igennem polarisatoren foran detektoren. De to detektorer er med ledninger forbundet til en central coincidenstæller, som tæller, hvor mange gange, de to detektorer samtidigt registrerer en foton. Vi kan regne med, at de to fotoner i et par udsendes samtidigt (tidsforskellen er mindre end 0.01 mikrosekund) og at de har lige lang vej at tilbagelægge (ca 6 m) fra kilde til polarisator. Coincidenstælleren er indstillet til kun at reagere, når den modtager to elektriske signaler fra detektorerne inden for et tidsinterval på ca 0.02 mikrosekunder. Hvis tidsmellemløbet mellem to forskellige par, udsendt fra kilden, er meget større end 0.02 mikrosekunder, kan vi være sikre på, at coincidenstælleren kun registrerer fotoner, som hører til det samme par, og hvor begge fotonerne i parret slipper igennem de respektive polarisatorer.

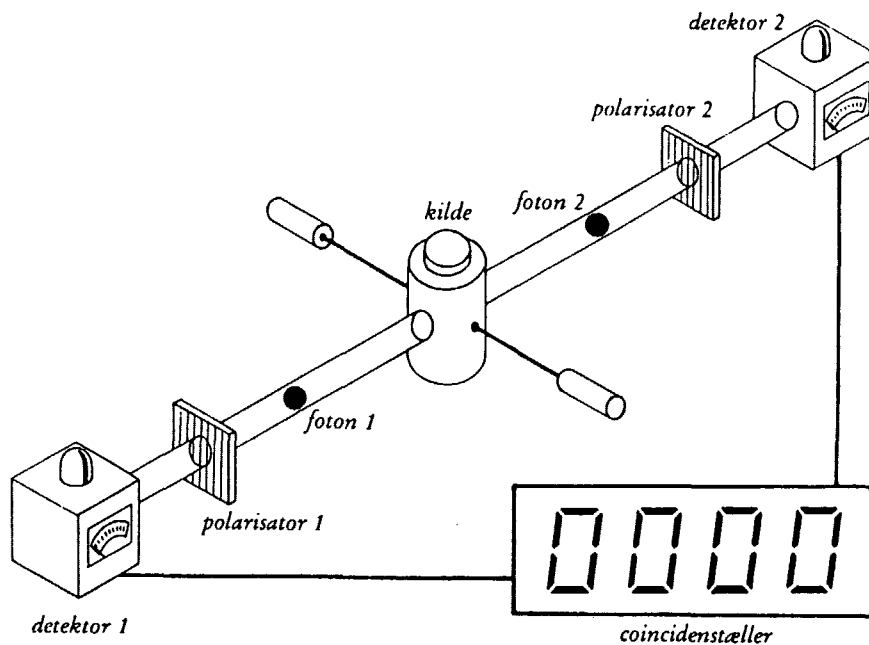


Fig. 1. Forsøgsopstillingen i det første Aspect-eksperiment. Model: Jakob Koch.

Forsøgsgangen kan nu skildres som bestående af tre faser:

Fase 1 . Polarisatorerne fjernes, således at der er fri passage fra kilde til detektor for alle fotoner. Vi vælger en fast tælleperiode T , d.v.s. et tidsinterval, som er stort nok til, at kilden kan nå at udsende mange par i tælleperioden (f.eks. $T = 10$ minutter). Vi måler nu gentagne gange, hvor mange coincidenser, der registreres i løbet af tælleperioden T . Ved at gentage forsøget mange gange sikrer vi os, at det målte tal, N_1 , er bestemt med en meget lille usikkerhed.

Fase 2 . Polarisatorerne sættes nu på plads og indstilles, så de er parallelle (som på fig. 1). Vi måler nu igen, hvor mange coincidenser, der registreres i løbet af tælleperioden T . Dette forsøg gentages med polarisatorerne drejet mange forskellige vinkler, men hele tiden parallelle. Det viser sig, at det målte coincidenstal altid er halvt så stort som det, der målttes i fase 1:

$$N_2 = N_1/2 \quad (1)$$

Fase 3 . Vi vælger nu tre faste indstillinger på 0° , 120° og 240° (i forhold til lodret) for hver af de to polarisatorer. Igen foretages en række målinger af coincidenstallet i tælleperioden T , men nu sørger vi for, at de to polarisatorer hver gang er indstillet forskelligt. Lad os kalde de tre indstillinger for 1, 2 og 3. Vi gennemprøver alle kombinationerne af ikke-parallelle, faste indstillinger: 12, 13, 21, 23, 31 og 32. Det viser sig, at det målte coincidenstal altid er en ottendedel af det tal, der målttes i fase 1:

$$N_3 = N_1/8 \quad (2)$$

Så vidt eksperimentet. Nu kommer vi til teorien. Vi vil prøve at anvende en form for sund fornuft, som svarer til Bell's (og Einsteins) lokale realisme. Dvs. vi antager, at en foton, inden den når til polarisatoren, har en bestemt egenskab eller tilstand, og at det er denne tilstand, som sammen med indstillingen af den polarisator, som fotonen møder, alene afgør, om fotonen vil passere polarisatoren eller ej. Den lokale realisme indebærer altså, at chancen for, at detektor 1 registrerer en foton, afhænger af tilstanden af foton 1 og indstillingen af polarisator 1, men ikke af indstillingen af polarisator 2.

Hvis vi holder os til de faste indstillinger 1, 2 og 3, kan vi give en ad hoc tilstandsbeskrivelse af en foton, som kun refererer til disse indstillinger: Vi kan f.x. betegne en tilstand med cifrene 010, og det betyder så, at fotonen vil blive stoppet af polarisatoren, hvis denne har indstilling 1, den vil slippe igennem for indstilling 2 og blive stoppet for indstilling 3. Tilsvarende betyder 110, at fotonen slipper igennem for indstillingerne 1 og 2, men stoppes for indstilling 3. Med denne ad hoc tilstandsbeskrivelse behøver vi altså kun at skelne mellem otte forskellige fotontilstande: 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110 og 111.

Med dette begrebsapparat kan vi nu let stille en forklaring op for resultaterne af fase 1 og fase 2 af forsøget. Fase 1 viser jo blot, at vi for en tælleperiode med konstant længde T har et konstant antal coincidenser N_1 , og det kan forklares ved, at kilden udsender fotonpar med (nogenlunde) konstant hastighed, og at chancen for, at en foton registreres, når den ankommer til detektoren er konstant. I fase 2 observeres, at coincidenstallet er det samme for de tre dobbeltindstillinger 11, 22, og 33, og det kan forklares ved, at der ikke er nogen retninger i rummet, som udmærker sig frem for andre. Det betyder specielt, at

Aspects eksperimenter - Hvad er det, som er så svært at forstå?

tilstande som 011, 101 og 110 må forekomme lige hyppigt. Vi siger, at de har samme sandsynlighed. Vi kan derfor formulere reglen om, at alle retninger er lige gode, som en regel om sandsynlighederne af vores 8 tilstande:

a). Sandsynligheden af en tilstand kan afhænge af, hvor mange nuller, der er i tilstandens cifferkombination, men ikke af placeringen af disse nuller.

Tilstandene falder derfor i fire klasser, idet antallet af nuller kan være 3, 2, 1 eller 0. Tilstanden 000 kan have sin egen sandsynlighed p , og ligeså kan tilstanden 111 have sin sandsynlighed s . Men tilstandene 100, 010 og 001 må have samme sandsynlighed q , og tilstandene 011, 101 og 110 må have samme sandsynlighed r . Da summen af alle disse sandsynligheder skal have værdien 1, må det gælde, at

$$p + s + 3(q + r) = 1 \quad (3)$$

Imidlertid kan vi ikke være sikre på, at en foton, som ankommer til en detektor også bliver registreret. Detektorerne har kun en begrænset effektivitet og registrerer kun en brøkdel af de indkommende fotoner. Så for at forklare, at vi altid finder samme tælleantal i hver af forsøgets faser, må vi yderligere gøre følgende antagelse:

b). Chancen for, at en foton registreres, når den ankommer til detektoren er uafhængig af fotonens tilstand.

Endelig kan man, som vi straks skal se, forklare hvorfor coincidenstallet N_2 er halvt så stort som N_1 (ligning (1)), hvis vi antager, at:

Aspects eksperimenter - Hvad er det, som er så svært at forstå?

c). De to fotoner, som hører til samme par, har altid samme tilstand.

For at indse, at vi herved får forklaret ligning (1), betragter vi følgende skema, hvor de 9 dobbeltindstillinger for polarisatorerne er afsat lodret og de 8 fotontilstande (partilstande ifølge c)) er afsat vandret. På hver plads i skemaet er angivet 1, hvis de to fotoner begge passerer polarisatorerne og 0, hvis de ikke begge passerer. Vi kan nu anvende dette skema til forudsigelse af coincidens-brøkdelen for hver af de 9 dobbeltindstillinger. For hver af de 8 tilstande er der angivet dens sandsynlighed (p, q, r eller s). Når vi i en bestemt række af skemaet finder et 1-tal i en kolonne, så må denne kolonne bidrage til coincidens-brøkdelen med sin sandsynlighed. På denne måde kan vi finde brøkdelen for hver indstilling af de to polarisatorer, og resultatet er angivet til højre for hver række i skemaet.

| | 000 | 001 | 010 | 011 | 100 | 101 | 110 | 111 | |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----------|
| | (p) | (q) | (q) | (r) | (q) | (r) | (r) | (s) | |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | $q+2r+s$ |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | $r+s$ |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | $r+s$ |
| 21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | $r+s$ |
| 22 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | $q+2r+s$ |
| 23 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | $r+s$ |
| 31 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | $r+s$ |
| 32 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | $r+s$ |
| 33 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | $q+2r+s$ |

Lodret: de 9 dobbeltindstillinger. Vandret: de 8 tilstande.

Aspects eksperimenter - Hvad er det, som er så svært at forstå?

Vi ser nu straks, at vores teori forklarer det eksperimentelle resultat, at brøkdelen af coincidenser har en konstant værdi i fase 2 (indstillingerne 11, 22 og 33) og en anden konstant værdi i fase 3. Da coincidens-brøkdelen N_2/N_1 ifølge eksperimentet har den faste værdi $1/2$ (ligning (1)), må det ifølge vores skema gælde, at

$$q + 2r + s = 1/2 \quad (4)$$

Endvidere må vi, for at forklare resultatet af fase 3 (ligning (2)), forlange at

$$r + s = 1/8 \quad (5)$$

Nu står vi så med 3 ligninger (3), (4) og (5) til bestemmelse af de 4 ubekendte p , q , r og s , så det skulle jo nok kunne lade sig gøre at finde en flerhed af løsninger. Desværre viser det sig umuligt at finde en rimelig løsning, som respekterer, at sandsynlighederne skal være positive tal. Lad os f.eks. prøve at forklare fase 2 ved at forlange (4) opfyldt sammen med (3). Vi får så af (4):

$$r + s = 1/2 - (q + r) \quad (4a)$$

og af ligning (3) fås:

$$q + r = (1 - p - s)/3 \quad (3a)$$

Nu er sandsynlighederne p og s jo i hvert tilfælde ikke negative, så (3a) giver anledning til uligheden:

$$q + r \leq 1/3 \quad (3b)$$

Aspects eksperimenter - Hvad er det, som er så svært at forstå?

og når vi så indsætter denne ulighed i (4a), finder vi en ny ulighed:

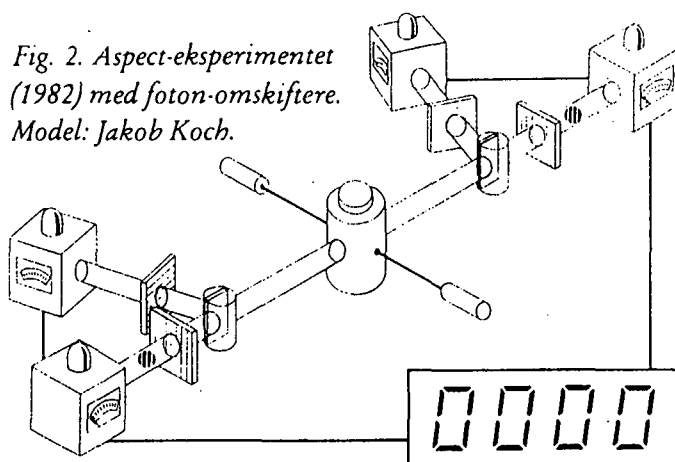
$$r + s \geq 1/2 - 1/3 = 1/6 \quad (6)$$

Størrelsen $r+s$ er jo netop brøkdelen af coincidenser for fase 3 af forsøget. Ifølge ligning (5) skal den have værdien $1/8$, men nu har vi altså udledt en ulighed, der bygger på den lokalrealistiske antagelse og forsøgets fase 2, som siger, at denne størrelse ikke kan være mindre end $1/6$. Dette er Bell's ulighed for den betragtede situation.

Nu står vi så med problemet i en nøddeskal, for vi ser, at vores sunde fornuft, dvs. vores lokalrealistiske teori umuligt kan forklare både fase 2 og fase 3 af eksperimentet. Det er let nok at forklare fase 2, men så fanger Bell's argument, og vi ser, at det observerede resultat $N_3/N_1 = 1/8$ er mindre end den minimale værdi, det kan have ($1/6$) ifølge Bell's ulighed, som vil gælde for enhver lokalrealistisk teori. På den anden side er kvantemekanikken helt i overensstemmelse med eksperimentet, idet den klart forudsiger værdien $1/8$. Det er på denne måde, det skal forstås, når det siges, at Aspect's eksperimenter har påvist en uoverensstemmelse mellem kvantemekanik og sund fornuft.

Forklaringen på denne uoverensstemmelse må være, at antagelsen om, at naturen kan beskrives lokalrealistisk, ikke er opfyldt i denne specielle eksperimentelle sammenhæng. Enten må vi opgive realismen, at fotonerne har bestemte egenskaber eller tilstande inden målingen, eller også må vi opgive lokalitetsantagelsen, at chancen for detektion af foton 1 er uafhængig af indstillingen af polarisator 2, og omvendt. Typisk vil fysikere af "Bohr-observans" være tilbøjelige til at vælge den mest radikale løsning, at droppe realismen, hvorimod

Einstein-tilhængere vil nøjes med at opgive antagelsen om lokalitet⁴. Da Einstein-tilhængere (som J.S.Bell) har været de mest aktive til at foreslå eksperimenter, er det lokalitets-antagelsen, som har været emnet for det seneste Aspect-eksperiment. Efter det første eksperiment eksisterede der stadig en mulighed for at redde en svagere udgave af antagelsen om lokale årsager, idet man kunne forestille sig, at foton 1 kunne mærke indstillingen af polarisator 2 ved at et hidtil ukendt signal havde udbredt sig fra polarisator 2 med en hastighed under lysets og var nået frem til detektor 1 i god tid inden detektionen af foton 1.



Det sidste Aspect eksperiment, som vises skematisk på fig. 2, søger at imødegå denne mulighed ved et switch-arrangement (som forklaret i filmen), således at foton 1 ikke kan nå at få information (med underlyshastighed) om hvilken af to mulige polarisatorer, som foton 2 bliver switchet hen til. Eksperimentet har også den fordel, at flere kombinationer af indstillinger kan afprøves i samme tælleperiode. F.x. kan de to polarisatorer for foton 1 begge have indstillingen 1, medens de to for foton 2 har indstillingerne 2 og 3, så man får afprøvet kombinationerne 12 og

Aspects eksperimenter - Hvad er det, som er så svært at forstå?

13 samtidigt. Arrangementet kræver 4 coincidenstællere (hvilket ikke fremgår af fig. 2): hver af de to detektorer for foton 1 skal nemlig sammensættes med hver af de to detektorer for foton 2.

Resultatet af det sidste forsøg stemmer med det første, og det ser derfor ud til, at den sidste bastion for Bell's lokale realisme er faldet. Der er stadig små smuthuller i logikken, men det virker usandsynligt, at de skulle have nogen betydning. Smuthullerne ligner nærmest en sammensværgelse af naturen med mystiske signaler, der gør sig gældende i Aspect's forsøgsopstillinger, men ingen andre steder. Mange fysikere, bl. a. Bell og Shimony mener dog, at det er værd at undersøge disse smuthuller nærmere ved mere indviklede eksperimenter. Lokalrealismen bør ikke opgives for let, for det er i almindelighed en sund betragtningsmåde, hvorimod opgivelsen af den kan føre til et ortodokst rytteri på kvantemekanikkens formler uden forsøg på forståelse og/eller til en sværmerisk mysticisme uden reelt indhold.

Visse udtalelser af fysikerne Wheeler og Bohm i filmen kan måske opfattes som udtryk for disse tendenser. Underlige ideer dukker op i fysiktidsskrifter og patentansøgninger mm., og i USA sidder folk i "tænketaanke" og udtænker militære og efterretningsmæssige konsekvenser af, at Aspect eksperimentet skulle have påvist eksistensen af signaler med overlyshastighed. Imidlertid er der intet teoretisk eller eksperimentelt belæg for, at sådanne signaler kan have nogen form for praktisk relevans. Ifølge almindelig pragmatisk tankegang eksisterer de ikke.

Aspects eksperimenter er betydningsfulde, fordi de har vist begrænsningen af Bell's præcist definerede lokale realisme. Einstein ville nok være blevet meget overrasket over udfaldene af disse forsøg, men Bohr ville have forventet det. Inden man drager alt for vidtgående

konklusioner om den store sammenhæng i universet bør man dog nok bemærke, hvilke omstændigheder, forsøgene er foregået under (her tror jeg nok, at Bohr ville give mig ret). Det må tages med et gran salt, når Aspect i filmen hævder, at forsøget kunne laves "over kosmologiske afstande" med samme resultat. Forsøget kræver jo, at detektorerne er forbundet med centrale coincidentstøllere (og en masse anden elektronik, computer mm), og det er jo lidt svært at trække ledninger over kosmologiske afstande. Der er faktisk ikke mange forsøgsopstillinger i verden, der hænger bedre sammen end Aspects, og det er måske værd at overveje, om ikke den observerede mystiske sammenhæng i naturen (bruddet på Bell's uligheder) kunne have noget at gøre med den eksperimentelle sammenhæng. Det kunne undersøges ved at gennemføre et eksperiment ligesom Aspects første, men uden forbindende elektronik mellem detektorerne. Hverken Einstein eller Bohr, som var de første til at diskutere tankeeksperimenter af denne type, havde forestillet sig, at hele forsøgsopstillingen skulle være hæftet sammen med ledninger. Hvis "kvantesammenhængen" kan vises at være betinget af den eksperimentelle sammenhæng, forsvinder muligheden for de mest ekstravagante fortolkninger af kvantemekanikken, og det er nok det, vi er bedst tjent med i det lange løb.

Uanset, hvad vi håber og tror om fysikkens fremtid, må vi acceptere resultatet af det redeligt udførte eksperiment. Bell's uligheder har banet vejen for en lang række eksperimenter med Aspects som den foreløbige kulmination, og disse eksperimenter må anerkendes som vægtige bidrag til en debat, der blev startet af Bohr og Einstein for mere end 50 år siden. Det er nok for tidligt at erklære denne debat for afsluttet, måske er det kun første halvleg, som står 2-1 til Bohr. Vi har imidlertid lært, at spørgsmål, der tidligere blev betragtet som rent spekulative eller filosofiske, kan

Aspects eksperimenter - Hvad er det, som er så svært at forstå?

gøres til genstand for eksperimentelle undersøgelser, og det er et væsentligt gennembrud i fysikken.

Litteratur.

1. Tor Nørretranders, "Det udelelige", Gyldendal, 1985.
2. N. D. Mermin, "Is the Moon There When Nobody Looks", Physics Today, april 1985.
Se også læserbrevsreaktionerne og Mermin's svar i novembernummeret af samme tidsskrift.
3. A. Aspect and P. Grangier, Proc. Int. Symp. Foundations of Quantum Mechanics, Tokyo, 1983.
4. B. d'Espagnat, Scientific American, november 1979.

Er fysikken realistisk?

Er fysikken realistisk ?

(GAMMA nr. 65, december 1986).

Umiddelbart vil mange nok mene, at spørgsmålet i overskriften er af den retoriske slags, hvor svaret er givet på forhånd. Fysik må da være noget af det mest realistiske eller virkelighedsnære blandt videnskaberne, den handler jo om det materielle og om naturen. Det må da være langt sværere for filosoffer og litteraturforskere at overbevise nogen om, at de beskæftiger sig med virkeligheden. Det ses jo også tydeligt på størrelsen af de bevillinger, der stilles til rådighed, selv i disse sparetider. Mange har kritiseret offentlig støtte til kunstnere, hvis værker de fandt "uforståelige" eller ude af kontakt med virkeligheden, men de samme folk kritiserer ikke, at samfundet yder langt mere til fysikken, og det er nok ikke fordi de bedre kan forstå fysikken, men fordi de mener at vide, at fysikken i det mindste er realistisk: den handler om virkeligheden og omformer virkeligheden (underforstået, den materielle virkelighed, noget med penge i).

Det sidste kan der ikke være nogen tvivl om: fysikken omformer virkeligheden, men når man selv er fysiker, kan man let komme i tvivl, om den nu også handler om virkeligheden. Oppenheimer sagde til kritikerne af atombombeprogrammet: "Fri mig for Jeres samvittighedskvaler, det er dog så skøn fysik!". Og Niels Bohr sagde (vistnok) engang: "Der er ingen kvante-virkelighed!" Begge disse bemærkninger siger noget om at fysikken er en slags spil, som fysikere spiller med stor

Er fysikken realistisk?

fornøjelse og helst så helt løsrevet fra distraherende omstændigheder, såsom samfundet og naturen.

Ganske vist må de fysiske teorier fra tid til anden konfronteres med virkeligheden i laboratoriet, men det er ofte en laboratorie-virkelighed, som det er svært at sætte i forbindelse med noget uden for laboratoriet. Hvor i universet findes f.eks. superflydende He^3 ? Jeg vil vove den påstand, at hvis der findes noget af det i Andromeda galaksen, så er det, fordi der dér findes fysikere, hvis laboratorier er lige så avancerede som vores.

Et andet eksempel: Hvad har det med virkeligheden at gøre, at fysikere på CERN har påvist eksistensen af nogle partikler ved navn W og Z? Eller at nogle forsøger at eftervise, at protonen vil henfalde efter 10^{31} år? Ja, det har ganske reelle konsekvenser, for det er en stor teknologisk og økonomisk udfordring at lave sådanne eksperimenter, og det skaber spin-off, som industrien og militæret kan have glæde af. Men der er et underligt misforhold mellem de fysiske ideer, som igangsætter eksperimenterne, og det reelle spin-off. De to ting har ikke meget med hinanden at gøre. Selvfølgelig kan det tænkes, at forskningen i de mere eksotiske elementarpartikler vil føre til teknologiske resultater, som er direkte anvendelser af teorierne, og ikke bare spin-off, men det er ikke rart at tænke på, hvad det kan føre til. Højenergifysikken er en pryd for fysikkens elfenbenstårn, og dens teoretiske resultater tåler sammenligning med de største kunstværker, men fri og bevar os vel for dens praktiske resultater!

Fysikken er højst aktiv i processen at iagttage og skabe virkeligheden, men har selv problemer med sin virkelighedsopfattelse, sin ontologi. I lang tid har det slet ikke været "in" at tale om virkeligheden som noget, der eksisterer uafhængigt af fysikerens formelapparat. Man må

Er fysikken realistisk?

helst ikke forestille sig noget eller gøre sig billeder af det, ifølge Bohr og den københavnske fortolkning af kvantemekanikken. Det forbud kan ingen kreativ fysiker leve med. Man må operere med et sæt forestillinger, der går bag om de matematiske symboler, for at disse symboler kan have mening, og det er ikke nok at tænke på "måleopstillinger, beskrevet i klassiske termer" med bolte og skærme ophængt i fjedre. Man må også have en billedagtig - ikonisk - forestilling om objektet, hvadenten det er en bølge eller en partikel, og kunsten er at udnytte disse billeder til grænsen af, hvad de kan bære, ikke at forsage dem. Det virkelig smarte er at ikonisere matematikken, som bl.a. Dirac og Feynmann har gjort, med nye ikoniske tegn, der frembærer de eksakte begrebsrelationer ligesom brikkerne i et puslespil.

Dirac's ket vektor er et tegn for den uforstyrrede, for os skjulte, virkelighed, som er uafhængig af måleopstillinger og symbolske repræsentationer. Det har ingen mening ifølge Bohr. Kun bølgefunktionens absolutkvadrat har mening, og det i kraft af den klassisk beskrevne måleopstilling. Det er så et problem at forstå, hvad det er, som får måleapparaterne til at virke på den foreskrevne måde, for det kræver et ideelt måleapparat at få kvantemekanikkens forskrifter eksakt opfyldt, og at det er ideelt betyder netop, at det retter sig efter kvantemekanikken. Det kræver et hold dygtige eksperimentalfysikere, som Aspects gruppe i Paris at finde overensstemmelse med nogle af kvantemekanikkens mere bizarre forudsigelser, hvorimod et eksperiment, der ikke stemmer, kan laves af enhver amatør hjemme på køkkenbordet. Det ser nærmest ud til at kvantemekanikken er blevet selvopfyldende ved at definere kravene til det perfekte eksperiment og samtidig forbyde forestillinger om virkeligheden bag formlerne.

Er fysikken realistisk?

I USA i forbudstiden blomstrede spritsalget som aldrig før og siden, og under københavnerskolens billedforbud blomstrer de besynderligste billeder af den fysiske virkelighed i fysiktidsskrifterne. Nogle af de mest citerede teorier (Wheeler, de Witt m.fl.) går ud på, at tiden går baglæns, at kvantemekanikere skaber universets forhistorie gennem deres målinger, og at det samme univers splitter op i et utal af kopier ved enhver sådan måling, således at alle muligheder på demokratisk vis bliver lige tilgodeset med kvantefysikeren i rollen som Vorherre. Wheeler har kun foragt tilovers for "the californian disease", som han foragteligt kaldte bølgen af holisme og mysticisme og fysikkens Tao i en rundbordssamtale med Tor Nørretranders i januar, men han er selv ude på langt vildere overdrev i sine ontologiske ekstrapolationer af kvantemekanikkens formelrytteri.

Hvis vi leger, at Bohr og Einstein kunne følge med i debatten, ville de nok krumme tæer over "the splitting universe" og lignende konstruktioner, som er oppe i tiden. Måske kunne Einstein få chancen for en revanche for den gang ved Solvay mødet, da han blev nedlagt af Bohr med sit eget våben, den generelle relativitetsteori. Han kunne sige, min kære Niels, du har jo selv så klart påvist måleopstillingens rolle for betydningen af de kvantemekaniske symboler. Nu skal jeg modbevise kvantemekanikken. Og så ville han lave "the crucial experiment" med sin tobaksdåse og to bøjede søm.

Det er et tegn på krisen i fysikkens virkelighedsopfattelse, at fiktioner som Wheeler's og de Witt's trives i "de rigtige" fysiktidsskrifter, når de blot er matematisk formulerede, medens mere jordnær filosofi er bandlyst. Vi har nok i for høj grad i fysikken stirret os blinde på

Er fysikken realistisk?

formlerne og glemt, at de udspringer af en filosofisk refleksion, og ikke af naturen selv. Nøgleordet for en matematisk-fysisk grundlagsforskning, som den dyrkes bl.a. på RUC, må være semiotik, dvs. tegnteori, som er det fælles grundlag for naturvidenskaber og humaniora. Vi må opnå en bedre forståelse af relationer mellem vore tegn og den ydre verden og komme ned fra den alt for høje formel-hest. Ellers risikerer vi, at den manglende fornemmelse for, hvad der får formlerne til at virke, låser fysikken fast i en fremmedgjort virkelighed.

Henvisninger

De berørte temaer i dette indlæg belyses mere udførligt i følgende artikler af forfatteren:

1. "Retur til virkeligheden", GAMMA nr. 52, marts 1983.
2. "Verden ifølge Peirce", IMFUFA tekst nr. 72, 1983.
3. "The Semiotics of Quantum-Non-Locality", IMFUFA tekst nr. 93, 1985.
4. "Springet fra København", Information d. 7. oktober, 1985.
5. "Tilfældigheden og nødvendigheden ifølge Peirce og fysikken", IMFUFA tekst nr. 118, 1985.
6. "Verdensformlen der blev væk", Information d. 23. januar, 1986.
7. "Aspect's eksperimenter: hvad er det, som er så svært at forstå?", Udg. af Statens Filmcentral efterår 1986 i forbindelse med filmen "Atomfysik og virkelighed" af Lars Becker Larsen.

Kan kvantemekanikken forstås?

Kan kvantemekanikken forstås?

(GAMMA nr. 73-74, nov.-dec. 1988).

Hvad vil det sige at forstå en faglig disciplin? Pædagoger vil som svar på dette spørgsmål opregne et helt hierarki af forståelsesniveauer, rækkende fra evne til at referere over evnen til at anvende og op til evnen til at kunne vurdere områdets betydning i en større sammenhæng. For en universitetslærer i kvantemekanik stiller sagen sig oftest ret enkelt: man forventer af sine elever at de skal kunne regne opgaverne til en skriftlig eksamen. Det vil sige, at den kvantemekaniske formalisme skal beherskes i en sådan grad, at den kan anvendes til at besvare numeriske spørgsmål i en konkret faglig sammenhæng.

Så vidt, så godt. Evnen til at anvende ligger på et højere niveau end evnen til at referere. I praksis er det heller ikke så vanskeligt for læreren at hjælpe eleverne frem til dette læremål. Det kræver en betydelig, men veldefineret exercits i opgaveregning, og anstrengelsen fører med rimelig sikkerhed til målet. Det matematiske apparat er tungt, men det kan læres, og vejen fra opgavens formulering til dens løsning er sikker og direkte. Langt værre forholder det sig i en matematisk lettere disciplin som termodynamik, hvor kendskab til de simple formler ikke er nok, men må suppleres med "fysisk fornemmelse". Et termodynamisk system har ikke bare én energifunktion, men et ikke nærmere defineret antal "frie energier", og hvilken, man skal vælge, afhænger af den eksperimentelle situation, om man har kontrol over tryk eller volumen, magnetfelt,

Kan kvantemekanikken forstås?

varmestrøm og utallige andre mulige faktorer for et makroskopisk system uden klart skelnelige atomare frihedsgrader. Hvis forståelseskriteriet er en bestået skriftlig eksamen, er det tilsyneladende let at forstå en tungt formaliseret disciplin som kvantemekanikken, der bygger på matematiske abstraktioner som Hilbert rum og egenverdier, hvorimod en matematisk letvægter som den klassiske termodynamik, hvor matematikken stort set indskrænker sig til, at differentiationsordenen er ligegyldig, men hvor man til gengæld indfører fysiske abstraktioner som semipermeable membraner og adiabatisk vægge, volder store problemer.

Da jeg for nogle år siden underviste i kvantemekanik på fysik 3 i København, kunne jeg ikke frigøre mig fra en stille undren over, hvor villigt og effektivt studenterne tilegnede sig formalismen og lærte at regne opgaverne på den foreskrevne tid. Alligevel var der adskillige af disse mestre i formalexercits, som gav udtryk for en vis utilfredshed, noget i retning af: "Nu har vi lært de rigtige knæbøjninger, sig os så, hvad det egentlig handler om!" Stillet over for dette spørgsmål kan man så henvise til lærebogens indledende, historiske kapitel, som ikke indgår i pensum til den skriftlige eksamen, eller man kan henvise til Bohrs "Atomfysik og menneskelig erkendelse" og til populære og filosofiske fremstillinger som Polkinghorne's "The Quantum World" og Nørretranders' "Det udelelige". Problemet er så, at det er svært at se forbindelsen fra de filosofiske til de formalistiske fremstillinger. Man får let det indtryk, at "komplementaritet" er et ord, som kun kan bruges af fysikere i festtaler eller som et kødben, filosoffer og humanister kan gnave på, medens de arbejdende fysikere beskæftiger sig med ganske andre sager.

Med hensyn til kvantemekanikken som den praktiseres og

Kan kvantemekanikken forstås?

doceres på universiteterne er vi i den pædagogisk set paradoksale situation, at det er nemmere at anvende den end at referere med jævne ord, hvad den handler om. Studenter kan med rette hævde, at de godt kan anvende den, men ikke forstå den, og det er vel at mærke "forståelse" på laveste niveau - evnen til at referere indholdet med jævne ord - der savnes. Det levende ord holder sig på respektfuld afstand af den egentlige, dvs. formalistiske kvantemekanik, og det er et påfaldende symptom på en erkendelsesmæssig mangeltilstand, eftersom Niels Bohr jo netop har fremhævet, at kvantemekanikken har belært os om vor fundamentale afhængighed af dagligsproget.

Refleksioner over en samtale med "Saint Bell" .

John Stuart Bell, en irsk højenergifytiker, som arbejder på CERN, tror ikke meget på, at man kan snakke sig til en forståelse. Han er yderst kritisk over for "Københavnerskolen", specielt Bohr og Rosenfeld, fordi de efter hans mening forsømte den formalistiske afklaring og fortabte sig i uforståelig snak. Her ligger Bell på linje med filosofen Karl Popper, som mener, at Københavnerfortolkningen er "a great quantum muddle". Som bevis på ordenes afmagt fremfører Bell bl.a. den observation, at fysikere, der snakker om kvantemekanik (i stedet for bare at bruge den) ikke tør fremføre deres egne formuleringer, men henholder sig til at citere Bohr direkte¹. Bell's foragt for den verbale kvantefilosofi omfatter også blødere discipliner i fysikken, såsom termodynamik. I en samtale, jeg havde med ham for et par år siden, sagde han, at termodynamik i og for sig var udmærket, men at denne disciplin forholdt sig til "rigtig fysik" lige som en kokebog til en lærebog i kemi.

Kan kvantemekanikken forstås?

Han var meget imødekommende over for mit ønske om at diskutere grundlæggende kvantemekanik, men betingede sig fra starten, at emner som "måling", "irreversibilitet" og "semiotik" ikke måtte komme på tale².

Bell er en repræsentant for "den Einsteinske skole" i kvantemekanikkens grundlagsdiskussion. Han ser den klassiske fysiks determinisme som idealet for al fysik, men føler sig godt tilpas med at anvende kvanteformalismen til beregning af tværsnit for elementarpartikelstød. Da han i 1964 beviste sine berømte uligheder som en konsekvens af Einsteins "lokale realisme", skabte han grundlag for en serie eksperimenter, bl.a. Aspect's i 1982, som klart har modbevist ulighederne og bekræftet kvantemekanikkens forudsigelser. Den Einsteinske vision, som formidlet af Bell, synes hermed modbevist, og det giver både ham og Aspect anledning til ærgrelse. Endnu værre for Bell er det dog, at hans uligheder har gjort ham til helgen og profet for en fremvoksende gruppe af "kvanteholister"³, som med henvisning til Aspect og Bell betragter den holistiske tese om verdens udelelighed som endeligt bevist.

Jeg må bekende, at min sympati overvejende ligger på Bell's side. Han har fremsat sine ideer på en klar og forståelig måde, således at en eksperimentel falsifikation er blevet mulig, og han er redelig nok til at anerkende, at hans ideer har vist sig at være forkerte, og at han derfor er noget frustreret. Men sit grundlæggende ideal, at fysikken skal kunne forstås, opgiver han ikke af den grund. Kvanteholisterne derimod forsøger at gøre en dyd af uforståeligheden ved at henvise til Bell's teorem og Aspect's forsøg. Det er ganske vist tydeligt, at de ikke selv forstår det, og at mange fremtrædende fysikere (bl.a. Dirac og Feynmann) har indrømmet, at de følte sig forvirrede over kvantemekanikkens tilsyneladende brud på lokalitets-

Kan kvantemekanikken forstås?

princippet, men forståelsesvanskeligheder er ikke noget godt argument for noget som helst og da slet ikke for en holistisk tese, som, hvis den skulle tages alvorligt, ville stemple al fysik, der forsøger at beskrive en del af verden som relativt uafhængig af resten, herunder kvantemekanikken, som uvederhæftig.

Lad os hellere i første omgang nøjes med at konstatere, at kvantemekanikken endnu en gang har vist sig korrekt, hvilket indbefatter, at Bell's uligheder er brudt under Aspect's forsøgsomstændigheder, og lad os derpå overveje, om dette såkaldte brud på lokalitetsprincippet har nogen praktiske konsekvenser i øvrigt. Hvis der ikke kan peges på sådanne konsekvenser (f.eks. kommunikation med overlyshastighed) er det fordi lokalitetsprincippet ikke er brudt i pragmatisk forstand, dvs. så er Bell's uligheder ikke et pragmatisk udtryk for lokalitetsprincippet, og vi behøver ikke være så bekymrede over bruddet på dem. Til gengæld vil der være grund til bekymring over kvaliteten af de aktuelle filosofiske overvejelser i kvantemekanikken.

Spørgsmålet, om bruddet på Bell's uligheder vil have praktiske konsekvenser, såsom at muliggøre superluminal signaludveksling, er retorisk. Der er intet, der tyder på, at noget sådant skulle være muligt på baggrund af vor nuværende viden. Det eneste skulle da være det, at en fysiker (Jack Sarfatti) har søgt patent på et apparat, der skulle kunne bruges til det, og at CIA og diverse amerikanske "think tanks" efter sigende skulle være stærkt interesserede i de efterretningsmæssige konsekvenser. Måske sidder der nu nogle strategiske eksperter og drømmer om et nyt centralt styresystem til missiler uden forsinkelse, dvs. den brøkdelen af et sekund hurtigere end modstanderens, som er nok til at vinde stjernekrigen.

Kan kvantemekanikken forstås?

De to grøfter

Bell er eksponent for en etisk holdning til videnskaben, som vi bør værne om med næb og klør. Man kan nok have megen sympati for Capra's og andre holisters kritik af den reduktionistiske videnskab og for deres krav om en ny, økologisk helhedstænkning. Men reduktionismen, som Bell praktiserer den, har i det mindste evnen til at indse sin egen begrænsning, hvorimod holismen let forfalder til en form for totalitær absolutisme. Vi ved nu, at Bell's formulering af "den lokale realisme" ikke kan forenes med kvantemekanikken og den eksperimentelle virkelighed. Vi må forsøge at redde den rationelle forståelse af fysikkens verden og holde os fri af de to grøfter:

a) Den glade kvanteholisme som vil forklare fænomenerne med henvisning til en guddommelig præetableret harmoni eller til parafysiske effekter som synkronicitet eller telepati eller ukendte signaler med overlyshastighed.

b) Formelrytteriet, dvs. den holdning, at kvantemekanikkens formler er korrekte, nærmest per definition, og at man ikke skal forsøge at forstå hvorfor.

I det følgende vil jeg forsøge at argumentere imod begge disse holdninger.

Med hensyn til a) går argumentet nærmest på, at de foreslåede "effekter" er rent ad hoc. Tilsyneladende har de kun den ene funktion at forklare den manglende lokale realisme i kvantemekanikken. Men det er kun Bell's version af "lokal realisme", ofte kaldet "lokal kausalitet", byggende på forestillingen om lokale skjulte variable, som er modbevist, og det er ikke den eneste mulige form for

Kan kvantemekanikken forstås?

realisme, der overholder Einsteins lokalitetsprincip. Jeg vil senere omtale et helt igennem lokalt (men måske ikke helt så realistisk) eksempel, hvor Bell's uligheder er brudt. Dette eksempel skal, i forbindelse med fraværet af praktiske konsekvenser af bruddet på ulighederne demonstrere, at der ingen overbevisende grund er til at stemple kvantemekanikken som ikke-lokal. Der er derimod mange gode grunde til at holde fast ved lokalitetsprincippet, som gang på gang har vist sin forklaringskraft. Der er derfor heller ingen grund til at påberåbe sig telepati eller signaler med overlyshastighed. Måske findes disse ting, men ikke i kvantemekanikken eller nogen anden veletableret del af fysikken.

Den anden grøft, b) er den, som fysikere lettest falder i, men de er også de eneste, som kan føle sig tilpas her, og de bidrager nok ikke så meget til videnskabens udvikling i den position. Hvis fagets autoriteter er formelryttere, vil dets studenter i deres berettigede krav på en forklaring let havne i a) og slå sig til tåls med pseudoforklaringer. En mere filosofisk indstillet person vil betragte eksistensen af en eksakt naturlov som en udfordring, som noget der skal kunne forstås. Er f.x. eksponenten i Coulomb's lov nøjagtigt 2 eller blot meget tæt på? Hvis man kan hævde, at den er nøjagtigt 2, så må man også kunne give en forklaring på det eller i det mindste have en fornemmelse af, at en forklaring er mulig. På tilsvarende måde må det også kunne forstås, at kvantemekanikken er præcis som den er, fordi det er det eneste rigtigt fornuftige. Argumentet, at sådan er verden nu engang indrettet, og det må vi bare acceptere, er ikke godt, for en grundlæggende fysisk teori prætenderer at være begrebslogisk eksakt, og det kan overensstemmelse med virkeligheden aldrig være, da den jo altid er underlagt eksperimentelle usikkerheder.

Normalt holder formelryttere sig væk fra filosofiske

debatter om kvantemekanik, men der er undtagelser. Et særlig grelt eksempel er J.A.Wheeler, som ofte føler sig kaldet til at fortælle den undrende offentlighed om, hvordan verden er indrettet, hvis kvantemekanikkens formler er universelt gyldige, hvad han ikke ville drømme om at betvivle. Wheeler fører sig gerne frem som en fortæller for den ortodokse københavnerfortolkning, bl.a. i hans ofte citerede bemærkning "intet fænomen er et fænomen, før det er et registreret fænomen". Det stemmer godt overens med københavnerskolens "billedforbud", som siger, at man skal vogte sig for at danne sig billeder af "kvantevirkeligheden". Wheeler holder sig imidlertid ikke tilbage med billeder som "smoky dragons". Han har støttet den såkaldte "mangeverdens-
fortolkning" af Everett og de Witt, som går ud på, at bølgefunktionen sammenfatter en uendelighed af virkeligheder, der realiseres i hver sit univers, når en fysiker laver en måling. Han har også sagt, at fysikerens målehandling virker baglæns i tid og skaber universets fortid. Ingen fortolkning er for bizar for ham, jo wheelere, jo bedre.

I forbindelse med ideen om baglæns kausalitet henviser han til såkaldte "delayed choice" eksperimenter. Et eksempel på et sådant, der stammer fra Niels Bohr, blev gennemgået af Erik Rüdinger for nylig⁴. Vi skal senere se nøjere på dette eksperiment og påvise, at de mystiske forhold, der ligner baglæns kausalitet, ikke vedrører det fysiske system, men kun eksperimentatorens mystiske opførsel. På samme måde forholder det sig med Wheeler's andre tankeeksperimenter, bl.a. et forslag om måling af selv-interferens af en foton, der har passeret "både over og under" en gravitationel linse i universet (en fjern galakse⁵) for mange år siden, men kun hvis Wheeler beslutter sig til at vise interferens i dag. Eksperimentet er af banale grunde uigennemførligt og kan kun have den funktion at demonstrere hvor mystisk kvante-

Kan kvantemekanikken forstås?

mekanikken er, hvis man skamrider dens formler til deres yderste, absurde konsekvens. Wheeler har kun hånsord til overs for den grasserende kvanteholisme, som han kalder "the californian disease", men hans egen fremtræden gør selv Capra til et mønster på mådehold.

Bølgefunktionens realitet .

Jeg har et par gange i det foregående dristet mig til at bruge ord som "virkelig" og "virkelighed", og det skal man ellers være forsigtig med, når det gælder kvantemekanik. Den amerikanske fysiker David Finkelstein (en stor kender af Peirce's filosofi) har udtrykt det på følgende måde: "Maybe 'real' is a four-letter word that we should not use in quantum company." Det er nu svært at undvære det ord, men heldigvis har David Favrhøldt jo for nylig⁶ påvist, at ikke al brug er misbrug, blot vi husker, at "i den klassiske fysik og dagliglivet har ordet 'virkelighed' en anvendelse, som ikke kan overføres til kvanteverdenen." Den ofte citerede Bohr-udtalelse "der er ingen kvante-virkelighed" er en løftet pegefinger, der skal minde os om farerne ved misbrug af billeder fra dagliglivet, men den skal ikke tages højtideligt i en sådan grad, at vi slet ikke tør danne os forestillingsbilleder om virkeligheden. En arbejdende fysiker er altid realist, selv om han måske fornægter realismen ved festlige lejligheder.

Et af de mest grundlæggende begreber i kvantemekanikken er bølgefunktionen, eller tilstandsvektoren, som har et ret problematisk forhold til virkeligheden. Ifølge den københavnske fortolkning er bølgefunktionen ikke virkelig. Den er en regnestørrelse, som bygger bro over den unævnelige kvanteverden mellem de sikre holdepunkter i den klassiske

Kan kvantemekanikken forstås?

virkelighed, fra præparation til detektion af objektet.

Hvis københavnerfortolkningen er realistisk, og det mener Favrholt og andre filosoffer⁷ nok, man kan sige, så er det i hvert i hvert tilfælde ikke en realisme, der omfatter bølgefunktionen. I dag er realisme et udvandet begreb, som ofte bruges som en modsætning til (subjektiv) idealisme, også i Favrholt's artikel. OK, Niels Bohr var ikke subjektiv idealist, fænomenalist, instrumentalist, positivist, osv., og tvivlede selvfølgelig ikke på, at den materielle omverden eksisterer uafhængigt af vore ideer. Men med hensyn til bølgefunktionen, som jo er et begreb, er han ikke realist. Hvis man mener, at almenbegreber (universalia) ikke har selvstændig eksistens, men blot er sammenfattende navne for individuelle fænomener med visse fællestræk (heste f.x.), er man ikke (begrebs)realist, men nominalist. Denne distinktion mellem realisme og nominalisme, som altså vedrører videnskabelige begreber, men ikke den materielle verden, går tilbage til senmiddelalderen (o. 1300), da William af Occam hævdede nominalismen som et modstykke til de fra antikken overleverede forskellige former for begrebsrealisme (Platon, Aristoteles).

Når jeg, i tilsyneladende modsætning til Favrholt, vil hævde, at københavnerskolen ikke er realistisk, skal det altså forstås på denne måde: i sin opfattelse af den kvantemekaniske bølgefunktion er Bohr nominalist. Andre fysikere, som Dirac og Feynmann, der mere end Bohr har sat deres præg på kvanteformalismen, er ikke nominalister, men har snarere en holdning, der kan karakteriseres som semiotisk realisme, hvis mest fremtrædende repræsentant i filosofien er den førnævnte C.S. Peirce⁸. Ifølge denne opfattelse er et fysisk begreb at opfatte som et symbol, der "oversætter" beslægtede, ikke-symbolske tegn i den fysiske omverden. Hvis jeg hævder, at bølgefunktionen er reel, mener

Kan kvantemekanikken forstås?

jeg selvfølgelig ikke, at der svæver Ψ er rundt i luften, men at vores Ψ er en symbolsk repræsentant for et ikke-symbolsk tegn, der findes uden for vores bevidsthed i den fysiske verden. Dette ikke-symbol, som Peirce kalder et index og Dirac en ket- eller bra-vektor, ($|k\rangle$ eller $\langle b|$), er altså et potentielt symbol, idet det kan afføde en mangfoldighed af symbolske repræsentanter i vor beskrivelse af kvanteverdenen, men repræsentationen (i Peirce's terminologi: interpretanten) skal sættes ved hjælp af en måleopstilling. Indexet eller ket-vektoren er vort begreb om den uobserverede virkelighed, og dens oversættelse til symbol er et aktivt indgreb i verdens gang, således at symbolet (bra-keten, $\langle b|k\rangle$) karakteriserer en vekselvirkning, måleakten, som en amplitude, hvis absolutkvadrat er sandsynligheden for måleresultatet b .

Københavnerskolens nominalisme er nok dens største svaghed og årsagen til, at den i så ringe grad i dag spiller en rolle for arbejdende fysikere. Den ortodokse københavnske filosofi, at bølgefunktionen kun er en regnestørrelse, hvis betydning udelukkende hviler i de sandsynligheder, den giver anledning til ved en måling (beskrevet i klassiske termer), virker i dag alt for puritansk-nominalistisk, eftersom alle jo ved, at bølgefunktionen viser sin realitet på mangfoldige måder, også når der ikke lige står en fysiker og måler noget. Den kemiske bindings stabilitet, krystallers symmetrier, og de makroskopiske kvanteeffekter som lasere og superfluide systemer gør nærmest bølgefunktionen til noget, man kan se med det blotte øje. Kvanteformalismen, dvs. den del af den, der beskriver den uobserverede virkelighed (Schrödingerligningen, betragtninger over symmetrier, udartning, bevægelseskonstanter, osv.) er i så god stand, at den ikke giver anledning til skoledannelser. Vanskelighederne ligger udelukkende i semantikken (eller

Kan kvantemekanikken forstås?

rettere, semiotikken), dvs. den mere filosofiske redegørelse for bølgefunktionens betydning i termer af klassiske og dagligsproglige begreber. Derfor må man snakke med almindelige ord om disse ting, for man kan ikke forklare formlers betydning med andre formler.

Med hensyn til bølgefunktionen, som strengt taget ikke er selve tilstandsvektoren, men dens repræsentant i stedsrummet, hævder københavnerfortolkningen altså, at dens betydning ligger i, at dens absolutkvadrat angiver sandsynligheden for, at partiklen er et bestemt sted. Ups! der kom jeg til at fortælle mig: det er jo netop ikke sandsynligheden for, at partiklen er på stedet, men for at finde den, hvis man laver en stedmåling. Hvis partiklen beskrives med en i rummet udsmyrt bølgefunktion, er den jo netop ikke noget bestemt sted. Bølgefunktionen eller dens absolutkvadrat er ikke i sig selv nogen sandsynlighedsfordeling; der skal en eksperimentalfysiker med et måleapparat til, for at den kan blive til det. Der sker så et kollaps (en reduktion) af bølgefunktionen, og det er i dette begreb, at alle de filosofiske vanskeligheder ligger. Kvantemekanikken som en teoretisk disciplin har et semantisk fundament i eksperimentalfysikernes evne til at lave målinger, der lever op til kollapspostulatet. For man kan jo ikke regne med, at enhver måling automatisk vil fremvise de rigtige sandsynligheder, som kvantemekanikken foreskriver. Vi må antage, at der findes "dårlige måleapparater" og måske endda dårlige eksperimentalfysikere, som ikke er gode nok til at ræsonnere i klassiske termer over deres apparaters kvalitet. Kollapspostulatet forudsætter altså i en eller anden forstand en "ideel måling", men kvantemekanikken kan ikke selv gøre rede for, hvad det er for noget, eftersom måleapparatet jo, ifølge Bohr, beskrives i klassiske termer. Ganske vist har Bohr

Kan kvantemekanikken forstås?

forsøgt at omgå denne vanskelighed med henvisning til korrespondensprincippet og en procedure, som forskyder "snittet" mellem kvante-objektet og den klassiske verden til den klassiske side, men argumentet er langt fra overbevisende, eftersom de termodynamisk-irreversible processer, der kendetegner måleprocessen, foregår i et gråt mellemområde, som hverken ligger i Hilbert-rummet eller i den klassiske fysiks domæne⁹. Korrespondensprincippet sikrer nok, at mekanikken går over i den klassiske ved store virkningskvantetal, men kan ikke gabe over termodynamikkens irreversibilitet, som imidlertid via sin afgørende rolle i måleprocesserne er en forudsætning for kvantesemantikens gyldighed.

Tendensen i københavnerfortolkningen er så, at den nominalistiske opfattelse af bølgefunktionen smitter af på dens kollaps, som man altså ikke opfatter som en reel proces og derfor slipper for at beskæftige sig seriøst med. Alligevel må man sige, at der skal en måling til, før kollapset finder sted, men målingen kommer så til at optræde nærmest som en rituel handling, der på overnaturlig vis sikrer, at bølgefunktionen forvandles til den specielle sandsynlighedsfordeling, som foreskrives af formalismen. Derfor ender skolens fortalere ofte som formelryttere, der opfatter forskriften "absolutkvadrat = sandsynlighed" som en af de formler, der må være opfyldt, uden at tænke på, at der skal en eksperimentalfysiker til for at gøre den gyldig, og at den derfor har en helt anden status end kvantemekanikkens andre formler. Og derfor vil disse vogtere af den rene lære altid mene, at Aspect eksperimentet er ret uinteressant "da det jo kun viser, hvad vi altid har vidst". Disse folk har i deres formelrus helt glemt at undre sig over, at kvantemekanikkens krav om ideelle målinger stadig kan opfyldes, når man måler korrelationer over makroskopiske

Kan kvantemekanikken forstås?

afstande, og de vil uden videre mene, at korrelationerne "findes" selv over kosmologiske afstande. Faren ved denne holdning er bl.a., at kvanteformalismen gøres til en selvopfyldende profeti: en måling er kun en måling, når den stemmer med kvantemekanikken.

Heri ligger den største fare ved københavnerskolens nominalisme. Man kan til nød få lov til at bruge ordet "virkelig", men kun, hvis man bruger det korrekt, og det vil sige, at formalismen gøres til dommer over, hvad man må opfatte som virkeligt. Så vidt jeg kan efterspore, kommer denne opfattelse første gang frem i Bohrs svar til Einstein, Podolski og Rosen fra 1935 et sted, hvor han taler om "the very conditions which define the possible types of predictions regarding the future behavior of the system" hvormed han mener kvanteformalismen, og hvor han så hævder, at disse "very conditions" er konstituerende for, hvad man kan kalde virkeligt. Det er et svagt og tåget argument i en snæver vending, og det ligner ikke rigtig Bohr, som tidligere havde argumenteret så overbevisende mod Einstein i Bruxelles. Man kan få en mistanke om, at Rosenfeld har haft en finger med i spillet, da det var ham, som skrev artkelen efter Bohrs diktat. Senere udtalelser af Bohr¹⁰ tyder på, at han følte sig noget utilpas ved det, hvorimod Rosenfeld hævder, at det ikke følger noget nyt til Bohrs komplementaritetsfilosofi¹¹. På det tidspunkt havde Bohr allerede status af en profet, som ikke kunne kritiseres, og tegnet på, at der er noget galt med argumentet, er da heller ikke, at mange har kritiseret det, men snarere, at så mange har villet forsvare det og udlægge det. Filosofen Peter Zinkernagel har bygget et omfattende system op på det¹², og Joachim Israel har her fundet et bevis på, at man kan puste en ballon op indefra¹³.

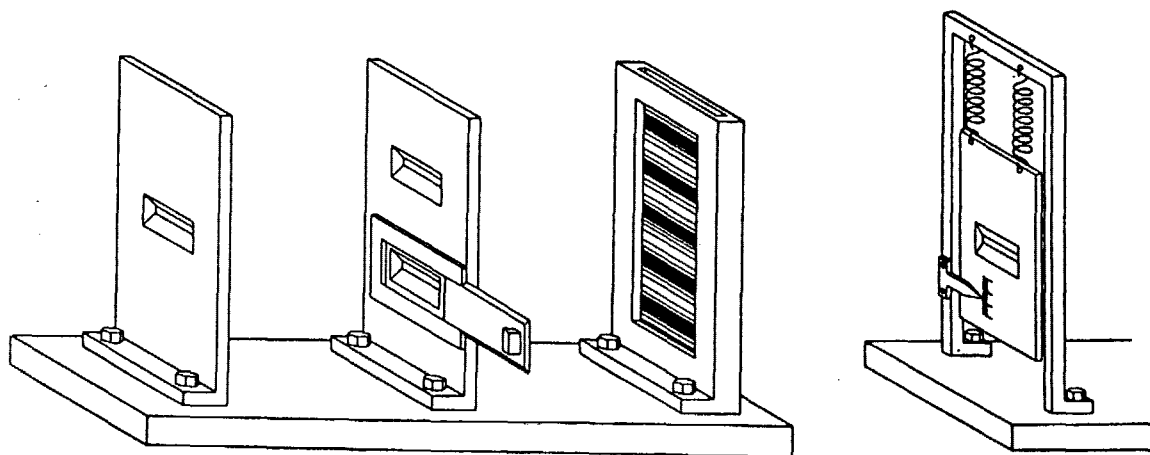
Hvis denne specielt københavnske form for nominalisme

Kan kvantemekanikken forstås?

skulle bestemme, var der ingen grund til at lave eksperimenter som Aspects, men heldigvis er gode eksperimentalfysikere realister. De ved, at virkeligheden til tider trodser selv de mest fikse idéer.

Dobbeltspalte forsøget .

Det velkendte tankeeksperiment til demonstration af bølge-partikel dualiteten er ikke længere blot et tankeeksperiment. Bl.a. neutron-interferometret¹⁴ har skabt muligheder for direkte påvisning af nogle af de effekter, hvorved bølgemeknikken adskiller sig mest radikalt fra den klassiske mekanik. Lad os alligevel (delvist af nostalgiske grunde) holde os til det gode gamle pseudo-realistiske apparat med bastante skærme, fastholdt af solide møtrikker.



Kan kvantemekanikken forstås?

I Rüdingers artikel⁴ diskuteres en "delayed choice" variant, som blev introduceret af Bohr i 1935 i svaret til Einstein, Podolski og Rosen (EPR)¹⁵. Vi sender en monokromatisk partikelstråle ind mod en skærm med to spalter, og på en bagved opsat fotografisk plade får vi så registreret et mønster af interferensstriber. Bølge-partikel dualiteten demonstreres ved, at interferensmønstret fremkommer, selv om der altid kun er én partikel undervejs mellem kilden og den fotografiske plade. Enhver partikel registreres i form af en prik på fotografiet, men prikkerne vil tilsammen opbygge et mønster af striber. Hvis kun den ene spalte er åben, kommer der ingen interferens. Vi må derfor konkludere, at interferensen skyldes, at hver enkelt partikel passerer gennem begge spalter i form af en bølge, og først ved mødet med den fotografiske plade sker kollapset, hvor bølgefunktionen lokaliseres i en prik, hvis sandsynlige beliggenhed er givet ved bølgefunktionens absolutkvadrat.

Hvis partikelstrålen på sin vej hen imod dobbeltspalten passerer gennem en enkelt spalte i en skærm, der er ophængt i fjedre, kan vi i princippet måle den til skærmen overførte impuls og derved afgøre hvilken af de to spalter, partiklen passerer igennem. Dette vil imidlertid ødelægge interferensen, for hvis skærmens impuls skal kunne måles med en usikkerhed, der er mindre end den af partiklen overførte impuls, så vil Heisenbergs usikkerhedsrelation sikre, at usikkerheden i spaltens position bliver større end afstanden mellem striberne i interferensmønstret, og derved tværes mønstret ud og forsvinder. Det er stadig væk fuldstændig rimeligt og foreneligt med en realistisk opfattelse af bølgefunktionen og kollapsprocessen. Men nu kommer vi så til den mystiske variant, som kaldes "delayed choice".

Ifølge Bohr og Rüdinger kan eksperimentatoren vente med at bestemme sig for, om han vil kende skærmens sted eller

Kan kvantemekanikken forstås?

dens impuls til efter, at partiklen har passeret skærmen. Det vil stadig væk være sådan, at impulsmålingen, som gør det muligt at afgøre, gennem hvilken spalte, partiklen har passeret, vil umuliggøre fremkomsten af et interferensmønster. Rüdinger påpeger endda, at det er ligemeget, om fysikeren venter med at beslutte sig, til efter, at partiklen har ramt den fotografiske plade. Resultatet af hans beslutning vil alligevel vise sig på samme måde, når pladen er fremkaldt. Det ser således ud som om, beslutningen virker baglæns i tid. Mon ikke, det er Bohrs "very conditions", der her er på spil, noget der virker i formalismen, men ikke i den fysiske verden. Dette kan naturligvis ikke forenes med en realistisk opfattelse af bølgefunktionen og dens kollaps, som jo ville tidsfæste kollapset til der, hvor partiklen rammer pladen, og ikke til hverken beslutningen, impulsmålingen, eller fremkaldelsen. Hvis vi overhovedet vil redde en form for realistisk fortolkning af "the very conditions" bliver det noget underligt noget med baglæns kausalitet. Det sidste er Wheeler's pointe, ikke Bohrs og Rüdingers.

Hos Bohr er alt dette noget kryptisk formuleret, men heldigvis har Rüdinger præciseret eksperimentets gang, og denne præcisering er velegnet til at tage vinden af det antirealistiske argument (hvad der jo nok ikke var meningen). Lad os tænke os, at fysikeren sætter gang i et stort antal eksperimenter, hvor der i hvert af disse kun registreres en enkelt partikel på den fotografiske plade, og lad os antage, at impulsen af alle skærmene er kendt ved forsøgets start med en usikkerhed, som er mindre end den impuls, der kan overføres til skærmen ved partiklens passage. For nemheds skyld vil vi tænke os, at alle skærmene er i hvile med impulsen 0. Dette medfører så, at spaltens position har en usikkerhed, som er større end

Kan kvantemekanikken forstås?

stribeafstanden i det potentielle interferens- mønster. Alle eksperimenterne løber fra kl. 0 til kl. T, hvorefter pladerne kan tages ud og fremkaldes.

Hvis vi nu i halvdelen af tilfældene måler skærmens impuls kl. T, så kender vi den overførte impuls og kan regne ud, hvilken spalte, partiklen har passeret. Til gengæld er usikkerheden i enkeltspalteskærmens position stadig større end stribeafstanden, så hvis vi vil konstatere, om der er interferens ved at lægge alle de fremkaldte (gennemsigtige) plader oven på hinanden og kigge igennem, så ved vi ikke, hvilket punkt på pladerne, der svarer til fasedifferensen 0; det vil variere mere end en stribeafstand for de forskellige plader, og derfor vil vi ikke se nogen striber.

I den anden halvdel af tilfældene beslutter vi os til at måle skærmens position, når forsøget slutter kl. T. Denne position kan så også med tilstrækkelig nøjagtighed opfattes som skærmens position på det (ukendte) tidspunkt, da partiklen passerede. Ganske vist har skærmen nået at bevæge sig i mellemtiden, men det er ganske lidt. Hvis f.eks. stribeafstanden er 1 mm og skærmens masse 100 g, så vil det tage ca $5 \cdot 10^{18}$ år, før den overførte impuls fra partiklen kan nå at bevæge skærmen en stribeafstand, og da forsøgstiden T jo er væsentligt mindre, kan vi roligt hævde, at vi kender skærmens position ved partiklens passage, når vi har målt den ved forsøgets slutning. Når vi så har fremkaldt pladerne, kan vi lægge dem oven på hinanden, således at punkterne med fasedifferensen 0 dækker hinanden, og vi vil se et nydeligt interferensmønster.

Der er imidlertid nogle praktiske problemer med forsøget: det tager lidt lang tid at forberede, for hvis skærmens impuls skal være så veldefineret fra starten, skal det være en meget kold skærm, ophængt i nogle meget kolde fjedre, og det vil, på grund af usikkerhedsrelationen tage

Kan kvantemekanikken forstås?

ca $5 \cdot 10^{18}$ år at køle så langt ned. Lavtemperaturteknikken skal også forbedres noget, før vi kan nå ned på de fornødne kuldegrader under 10^{-38} K, og vi må nok have udviklet nogle nye materialer, for fjedrene skal være bløde nok, til at amplituden af nulpunktssvingningen bliver større end 1 mm. Dog, lad det ikke komme an på det! En gang i tidernes morgen er vi måske startet med skærmen i en veldefineret position, men med ubestemt impuls (høj temperatur). Så har vi gradvist afkølet oscillatoren, bestående af fjedre og skærm, indtil den nåede til sin grundtilstand, og først da kan det egentlige "delayed choice" eksperiment tage sin begyndelse og forløbe over perioden T, som jo i alle tilfælde må være minimal i forhold til den samlede forløbne tid. Effektiviteten af vores evne til at påvirke fortiden (for nu at gå ind på Wheeler's tanke) er sløj, da det jo kun er denne sidste lille del af fortiden, tilbage til præparationen af partikeltstanden, vi kan påvirke via "the very conditions", og ikke, som Wheeler mener, al fortid tilbage til verdens skabelse.

Man kan også indvende, at de dyre fotografiske plader ikke anvendes effektivt nok, når der kun må registreres én partikel på hver plade. Men det skal heller ikke komme an på det. På dette punkt er det helt afgørende, at der ikke spares på forsøgets omkostninger, for hvis det skulle gå så galt, at der slap nogle flere partikler igennem til registrering på én af pladerne, og det måske oven i købet på en af de plader, som Rüdinger senere vil udse til at indgå i den pulje, som han retrospektivt vil ødelægge interferensen på ved en impulsmåling på skærmen, så vil disse formastelige partikler, som jo ikke kender Rüdingers fremtidige hensigt, komme til lave et interferensmønster, der vil afsløres ved fremkaldelsen og derved spolere pointen med hele forsøget. Måske er det alligevel bedst at lade det blive ved

Kan kvantemekanikken forstås?

tankeeksperimentet, for så risikerer vi ikke at få den smukke nominalistiske mystik ødelagt ved virkelighedens utidige indblanding.

Det ser nærmest ud som om, vi har frit valg mellem to måder at fremstille sagen på: En nominalistisk, hvor det hele ser meget mystisk ud med baglæns kausalitet, der dog kun virker på det formelle plan (the very conditions!), eller en realistisk, hvor der finder et kollaps af bølgefunktionen sted, hver gang en partikel reagerer irreversibelt med et korn på den fotografiske plade, men hvor alt, hvad iagttageren bagefter foretager sig er sagen uvedkommende, eftersom det kun vedrører den retrospektive databehandling, men ikke det kvantemekaniske system. Grunden til, at Bohr valgte den nominalistiske fremstilling, er, at eksemplet skulle bruges til at tilbagevise EPRs argumenter (med al deres falske åndrigheid, som Rosenfeld skriver). Her er der tale om to partikler, hvor man ved at måle sted eller impuls på den ene partikel tvinger den anden til være enten i lokaliseret "partikel"-tilstand eller en udsmyrt "bølge"-tilstand uden at vekselvirke med denne anden partikel. Bohr sammenligner skærmen i dobbeltspalteforsøget med partikel 1 og partiklen med partikel 2 og benytter sig så af den pointe, at vi ved at måle skærmens tilstand tilsyneladende bestemmer partiklens tilstand, selv om partiklen har passeret skærmen for længe siden og derfor ikke længere kan påvirkes fysisk.

Argumentet forudsætter jo imidlertid, at der kun er én iagttager, som sidder ved skærmen og herfra suverænt kan bestemme, hvordan de fotografiske plader skal behandles efter det egentlige forsøgs afslutning. Hvis analogien med EPR-forsøget skal være noget værd, må det være en anden iagttager, der uafhængigt af den første foretager registreringer af partiklernes nedslag på pladen. Denne

Kan kvantemekanikken forstås?

anden iagttager, som baserer sit synspunkt på den individuelle plade, må insistere på at få flere partikler at se på for at kunne afgøre, om der er et interferensfænomen, og hvis han får det, vil han se mønsteret opstå af prikker, der hver især skyldes en bestemt partikel. Altså, hvis denne anden iagttager overhovedet får chancen for at se mere end en enkelt prik (som jo ingenting fortæller), vil han altid se et interferensmønster opstå, uanset hvad den første iagttager laver af mystiske manøvrer bagefter, da det jo er en forudsætning, at skærmen ikke kan nå at flytte sig en stribebredde under forsøget. Konklusion: et "delayed choice" af den første iagttager har ingen indflydelse på den reelle kollapsproces, som sker, når partiklen rammer pladen. Den eneste mulige effekt vedrører den første iagttagers retrospektive databehandling, som foregår længe efter.

EPR, Aspect og Bell .

I EPR-tankeeksperimentet er der tale om to uafhængige målinger, fjernt fra hinanden i rummet. Iagttager 1 måler på partikel 1, iagttager 2 på partikel 2, og disse to partikler er blevet udsendt fra samme atom, således deres samlede impuls er nul. Vi kan nu tænke os, at iagttager 1 50% af gangene (tilfældigt udvalgt) måler impulsen på sin partikel og de resterende gange stedet, hvorimod iagttager 2 altid måler impulsen på sin partikel. Spørgsmålet er nu: Når de efter afslutningen af forsøgsrækken mødes et sted og sammenligner deres resultater, vil det så vise sig, at spredningen på de af iagttager 2 målte impulser er større i de tilfælde, hvor iagttager 1 målte stedet for sin partikel end i de tilfælde, hvor han målte impulsen? Hvis der overhovedet kan konstateres den mindste korrelation mellem

Kan kvantemekanikken forstås?

arten af 1s måling og spredningen på 2s impulser, så er der basis for at konstruere et apparat (som Jack Sarfatti jo desværre allerede har søgt patent på) til kommunikation med overlyshastighed. Hvad skal man tro? Svaret blæser i vinden, for eksperimentet er ikke lavet.

En realist, som tror på Einsteins lokalitetsprincip, vil uden tøven satse på, at der ikke kan være den mindste korrelation. De fleste nominalister af københavnerobservans vil satse på det samme, men ikke uden en vis tøven. Hvis de kender bølgefunktionen for topartikel-systemet (en s-tilstand), kan de selvfølgelig regne korrelationen ud og finde, at den ikke er der, men hvad nu, hvis bølgefunktionen så lidt anderledes ud? Kunne man så ikke tænke sig, at "the very conditions", som jo ifølge Bohr vil ødelægge impulsbestemmelsen for partikel 2 hver gang iagttager 1 har målt stedet for sin partikel, men ikke, når han har målt impulsen, kunne afstedkomme en vis effekt, som så ville muliggøre den superluminale kommunikation. Her må nominalisten så lægge sin arbejds-realisme til side og tage nominalist-kasketten på (den bruges jo ellers kun ved festlige lejligheder) og minde sig selv om, at "the very conditions" kun agerer i formalismen, ikke i den fysiske virkelighed, og at de to adskilte iagttagere, som jo opererer i uafhængige reference-systemer, ikke nødvendigvis bruger formalismen på helt samme måde og derfor måske heller ikke har helt samme udgave af "the very conditions". Måske vil det derfor i praksis være umuligt at få det smarte kommunikations-device til at virke. Hvis nominalisten når så langt som hertil i sin tankegang, har han allerede lagt kasketten væk igen og er faldet tilbage i sin gamle (ubevidste) rolle som pragmatiker og realist, der anerkender gyldigheden af lokalitetsprincippet.¹⁶

Hvad så med Aspect-eksperimentet, som jo har bekræftet

Kan kvantemekanikken forstås?

kvantemekanikken og tilintetgjort Bell's version af Einsteins lokale realisme? Her er det ikke sted og impuls, men polarisation af fotoner, det drejer sig om. Dvs. de komplementære observable, x- og y- polarisation, er af samme art, de kan drejes over i hinanden, og det er dette specielle træk, som gør det muligt at formulere Bell-uligheder, hvilket man ikke kan, når de komplementære observable er af forskellig natur, som EPRs sted og impuls.

Bell's uligheder er utvivlsomt brudt i Aspect's forsøg, og det betyder dødsstødet for varianter af den lokale realisme, der knytter fortolkning af kvantemekanikken til forestillingen om lokale skjulte variable. Der er ganske vist nogle svage "loopholes", som enkelte (Bell, Marshall) knytter deres forhåbninger til, men de har karakter af ad hoc effekter, som nærmest ligner en sammensværgelse eller et besynderligt sammentræf, der får kvantemekanikkens formler til at virke, uden at ånden i kvantemekanikken gør sig gældende. Der er jo ikke blot tale om, at ulighederne er brudt, men om en fuldstændig overensstemmelse med kvantemekanikkens præcise forudsigelse, som enhver student på fysik 3 kan regne sig frem til, hvorimod loophole-teorierne er højst indviklede og forskelligartede.

Bruddet på Bell's uligheder giver ikke i sig selv anledning til mulighed for kommunikation med overlyshastighed, men hvis det virkelig er tegn på, at Einsteins lokalitetsprincip ikke er overholdt, må det vel samtidig være tegn på, at det ikke er helt urealistisk at tænke i baner af et sådant device? Tilsyneladende ikke. Princippet er kun brudt "i svag forstand" dvs. uden praktiske konsekvenser. Bell har udtrykt det på følgende måde¹⁷: "Det er som om vi har nogle tog, der om dagen, når de transporterer passagerer, altid respekterer Einsteins hastighedsbegrænsning. Men når vi studerer køreplanerne, kan vi se, at

Kan kvantemekanikken forstås?

det er nødvendigt at føre togene tilbage til endestationen om natten med overlysfart."

Dette vil jeg udlægge som en indrømmelse af, at der ikke er nogen praktiske konsekvenser overhovedet, men kun den teoretiske konsekvens, at lokale skjulte variable er yt!

Hvad så med ikke-lokale skjulte variable, som bl.a. Bohm går ind for? Ja, her er der frit slag for kvanteholismen og diverse former for indfoldet orden og præetableret harmoni. Indtil videre er disse teorier frit svævende og ude af stand til at forklare noget, som kvantemekanikken ikke kan forklare lettere. De mest lovende former for sådanne ikke-lokale størrelser ligner grangiveligt bølgefunktionen selv. Så hvorfor ikke lade bølgefunktionen være sin egen skjulte variabel, hvis man nu absolut skal bruge den slags. Bølgefunktionen for de to partikler er jo ikke-lokal i og med, at den afhænger af 2×3 stedvariable, men kun én tid. Ja, men bølgefunktionen er kun ikke-lokal i kraft af sin forhistorie, som er fuldt beskrevet ved en helt lokal Laplace-ligning for 4-vektor-potentialet. Der er ikke noget mystisk ved den form for ikke-lokalitet, men kun en bekræftelse af Einsteins lokalitetsprincip. Det eneste lidt mærkelige er vel det, at der i forbindelse med de to stedvektorer kun optræder én tid. Formalismen (den ikke-relativistiske kvantemekanik) forudsætter, at de to iagttagere i EPR eksperimenter har en fælles tid, synkrone og isokrone ure¹⁸. Hvis ikke de har det, vil det være umuligt for dem at afgøre, om to partikler, de hver især har observeret, er et sammenhørende par, udgåede fra samme kaskade-henfald i et calcium atom.

I praksis løses samtidighedsproblemet i Aspect's og alle andres forsøg ved, at alle registreringer foregår centralt i en coincidenstæller, som kun reagerer, hvis den inden for et fast tidsvindue på ca 20 nanosekunder modtager

Kan kvantemekanikken forstås?

impulser fra fotomultiplikatorer i begge ender af opstillingen. Ledningerne, der forbinder foto multiplikatorerne (12 m fra hinanden) til den centrale coincidentstøller er omhyggeligt afmålt, så signalerne forsinkes lige meget. Alligevel er der en vis risiko for falske coincidenser, men i princippet kan denne risiko gøres meget lille ved, at kildehastigheden gøres tilsvarende lille, hvilket ganske vist forlænger den tid, eksperimentet må vare, for at statistikken kan blive god nok, men ikke uoverkommeligt. Aspect kan imidlertid også korrigere direkte for falske coincidenser ved hjælp af en ekstra coincidentstøller, hvor den ene tilledning er forlænget svarende til en tidsforsinkelse væsentligt større end vinduet på 20 ns.

Brugen af coincidentstøllere virker måske som en teknisk detalje, der er den principielle debat uvedkommende. Men kvantemekanikken, som den foreligger, giver faktisk ingen muligheder for at afgøre præcis hvilke eksperimentelle detaljer, der er uvedkommende. I Bohrs diskussioner med Einstein på Solvay-møderne i Bruxelles 27-30 var det jo eksperimentelle detaljer, som Einstein havde betragtet som uvæsentlige, der afgjorde sagen i Bohrs favør. Det er sund eksperimentel logik, der fører til brugen af coincidentstøllere, og som tidligere påpeget, er kvantemekanikken i sit semantiske fundament dybt afhængig af, at eksperimentalfysikken har sin egen logik, der fungerer godt nok til at honorere det implicitte krav om ideelle målinger. Der er imidlertid den ulempe ved brugen af coincidentstøllere, at de umuliggør en registrering af den ene partikel, uden at den anden partikel samtidig registreres. Der forekommer altid kun centralt registrerede par-begivenheder, og man kan derfor ikke tale om, hvorvidt en måling på den ene partikel kan påvirke tilstanden af den anden. Måske er det derfor lidt af en tilsnigelse at sige, at Aspect's forsøg har vist,

Kan kvantemekanikken forstås?

at Bohr havde ret og EPR uret.

I langt de fleste populære redegørelser for eksperimenternes betydning lades som om, de to partikler detekteres af uafhængige måleopstillinger, der i princippet kunne befinde sig på forskellige planeter. D. Mermin, som har leveret en af de klareste og simpleste redegørelser¹⁹, gør meget ud af, at der ikke må være nogen "relevante" forbindelser mellem enkeltpartikel-detektorerne (men gerne irrelevante, såsom at de står på samme bord), men han er ikke glad for at skulle tage stilling til spørgsmålet om, hvorvidt ledningerne til coincidentstællerne er relevante eller ej²⁰. Måske har han i sit foredragsmanuskript, dér hvor der står, at der ikke er nogen forbindelser, tilføjet en bemærkning i marginen ligesom præsten: "hæv stemmen, argumentet svagt", for da han nåede dertil i sin tale på NBI for nogle år siden, råbte han og slog i bordet, så det gav genlyd i auditorium A.

Ikke-lokalitet eller kontekst-afhængighed ?

Mermin viser, at modsætningen mellem kvantemekanikken og Bell's lokale realisme kan koges ned til en enkelt simpel ulighed. Lad os udvælge tre ligeværdige polarisationsretninger, f.eks. 0° , 60° og 120° . Et par switch-anordninger som i Aspect's sidste forsøg sørger for, at partikel 1 detekteres i polarisationsretningerne 0° eller 60° , partikel 2 i retningerne 60° eller 120° . Der må så bruges 4 coincidentstællere, idet hver af retningerne for partikel 1 skal kombineres med hver af retningerne for partikel 2. Hvis vi kalder retningerne for a, b og c, kan coincidentstællerne benævnes C(a,b), C(a,c), C(b,b) og C(b,c). Hvis vi måler antallet af tællinger på C(a,b) over

Kan kvantemekanikken forstås?

en vis tid og så dividerer det med antallet af tællinger på samme tæller i et forsøg over lige så lang tid, men uden polarisationsfiltre, så får vi coincidenssandsynligheden $p(a,b)$. Af symmetri Grunde vil coincidenssandsynlighederne for forskellige retninger, $p(a,b)$, $p(a,c)$ og $p(b,c)$ have samme værdi, p_f , medens den for samme retning, $p(b,b)$, har en anden værdi, p_s . Vi vil antage, at polarisationsfiltrene er ideelle, således at sandsynligheden for, at den enkelte partikel slipper igennem et filter i vilkårlig retning, er $\frac{1}{2}$. Bell's uligheder medfører da, at coincidens-summen C nedenfor ikke kan være negativ :

$$C = 3 \cdot p_f - p_s \geq 0 \quad (1)$$

Kvantemekanikken leverer imidlertid en præcis formel. Hvis de to polarisatorer danner vinklen v med hinanden, er coincidenssandsynligheden givet ved:

$$p(v) = \frac{1}{2} \cdot \cos^2 v \quad (2)$$

Dvs. p_s i (1), som svarer til $v = 0^\circ$, må have værdien $\frac{1}{2}$, medens p_f ($v = 60^\circ$ eller 120°) er $1/8$. Størrelsen C i (1) får da værdien $-1/8$, dvs. uligheden er brudt. Bell's lokale realisme kan udmærket acceptere den kvantemekaniske værdi for enten p_s eller p_f , men ikke dem begge. Aspect har bekræftet, at kvantemekanikken har ret, når forsøget foregår under de rette omstændigheder, hvilket jo, som tidligere bemærket, indebærer, at alle registreringer foregår i centrale coincidenstællere. Der er ikke lavet lignende forsøg, som lever op til kravet om uafhængige målinger på de to partikler, men der har været lavet andre forsøg end Aspect's, der måler coincidenser for polarisationsfiltrede kaskadefotoner²¹ og nogle af disse, først og fremmest Holt's

Kan kvantemekanikken forstås?

og Pipkin's, som er den direkte forløber for Aspect's, har bekræftet Bell's uligheder. Set fra den eksperimentalfysiske side er sagen altså ikke helt så entydig, som bedrevidende teoretikers skrāsikre udsagn lader formode. Overensstemmelse med kvantemekanikken er ikke i sig selv et godt argument for at foretrække Aspect's resultater for Holt's og Pipkin's; man må lytte til eksperimentalfysikernes egne argumenter "i klassiske termer". Holt og Pipkin mener også, at Aspect's forsøg er det bedste, og peger på mulige fejlkilder i deres eget forsøg, såsom lysbrydende spændinger i en glaskolbe. Det er heller ikke uvæsentligt, at Aspect tydeligvis havde ønsket det modsatte resultat.

Vi må altså acceptere, at kvantemekanikken har ret og Bell uret, og derpå overveje, om det virkelig betyder, at "verden er absurd", som Holger Bech Nielsen har sagt. Dvs. er det et bevis for, at "virkeligheden i virkeligheden ikke eksisterer", som Jens Bang ironisk bemærkede²², eller at den fysiske virkelighed (hvis den eksisterer) ikke retter sig efter Einsteins lokalitetsprincip?

Udledningen af Bell's uligheder er let at gennemføre, hvis vi forestiller os, at tilstanden af et fysisk system indbefatter en sandsynlighedsfordeling for alle tænkelige fysiske observable. Dette er imidlertid i klar modstrid med kvantemekanikken, da komplementære observable ikke samtidigt kan tilskrives sandsynligheder. Der er heller ikke noget mystisk eller ikke-lokalt i dette, eftersom måleopstillingerne udelukker hinanden. Der er imidlertid ikke tale om noget sådant, når vi sammenligner observable for to adskilte partikler, hvor måleopstillingerne ikke kan udelukke hinanden, og hvor operatorerne for de adskilte observable altid kommuterer. Bell's udledning af ulighederne forudsætter da heller ikke en samtidig sandsynlighedsfordeling for alle observable, men kun for de kompatible størrelser, hørende til

Kan kvantemekanikken forstås?

to forskellige partikler. Han antager så, at topartikelsystemet kan beskrives med en sandsynlighedsfordeling for en skjult variabel, og at måleresultatet for den enkelte partikel afgøres rent lokalt ud fra værdien af denne og indstillingen af polarisatoren for den pågældende partikel, men uafhængigt af polarisatoren for den anden partikel. Det er endvidere afgørende for Bell's bevis, at sandsynlighedsfordelingen for den skjulte variabel er uafhængig af polarisatorernes indstilling. Hvis vi ikke havde dette krav, kunne selv kvantemekanikken opfattes som en skjult variabel teori i Bell's forstand.

Bell mener altså, at lokalitetsprincippet medfører, at måleopstillingen ikke må virke tilbage på den skjulte variabel, der beskriver systemets potentielle egenskaber. Dette er selvfølgelig også en slags lokalitetsprincip, men det er ikke det samme som Einstein-lokalitet. Snarere må man sige, at Bell forlanger kontekst-uafhængighed^{2b} for målingerne på de to partikler, altså at måleresultatet for partikel 1 er uafhængigt af den eksperimentelle kontekst for partikel 2. Dette krav kan udmærket være brudt, uden at der findes mystiske fjernvirkninger, for hvis der er sat en fælles kontekst for de to partikler, som afhænger af kombinationen af måleopstillingerne for de to partikler, så kan partikel 1 måske rent lokalt mærke forskel på en situation, hvor den selv spørges om a og partikel 2 om b, og en anden situation, hvor den spørges om a og partikel 2 om c. Med denne fælles kontekst tænker jeg selvfølgelig på coincidenstællerne i Aspect's forsøg, som jo er forskellige for de forskellige kombinationer af polarisationsmålinger, og som sidder fast i opstillingen, uanset hvor meget fotonbanerne switches. Det er måske svært at forestille sig, at den enkelte foton kan mærke, i hvilken coincidenstæller, den er på vej til at registreres, og jeg vil da heller ikke

Kan kvantemekanikken forstås?

opfordre til, at man forsøger at tænke i detaljer på det.

Ud fra en generel, semiotisk realisme er det ikke svært at forestille sig situationer, hvor en fælles kontekst, sat for partikler eller forsøgspersoner på forskellige lokaliteter, kan skabe coincidenser, der bryder Bell's uligheder. Der kan opstilles en mængde scenarier i form af spørgeskemaundersøgelser, med fifty-fifty ja/nej svar, hvor det er afgørende for bruddet på uligheden (1), at det er den samme sociolog, der spørger de to adskilte "tvillinge"-forsøgspersoner. Hvis det er to forskellige (statistisk uafhængige) sociologer, der spørger, vil uligheden altid være opfyldt²³. Bell har altså ret, hvis konteksten for de to målinger er sat forskelligt, og Einstein lokaliteten gælder. Det vil sige, hvis der er tale om fysisk uafhængige målinger på de to adskilte partikler. Når Bell-ulighederne er brudt, som i Aspect-eksperimentet og i (de ikke helt urealistiske) sociolog-historier, så er det altså ikke nødvendigvis et brud på Einstein-lokaliteten. Det kan være tegn på, at der eksperimentelt er sat en fælles kontekst, der afhænger af spørgsmåls-kombinationerne. Og i Aspect-eksperimentet - hvad kan det vel være andet end coincidenstællerne?

Der er for en københavner-fysiker ikke noget specielt mærkeligt i (eller burde ikke være det) at måleresultater afspejler den eksperimentelle kontekst. Sådan har det altid været i københavner-fortolkningen, den gode gamle fra før 1935. Konteksten kan imidlertid ikke i almindelighed sættes på form af en lokal skjult variabel, så skal det i hvert tilfælde være på en form, der er mindst lige så mangedimensional som den kvantemekaniske tilstandsvektor, da de eksperimentelle omgivelser er langt mere indviklede end det kvantemekaniske system, man studerer. Derfor skal man heller ikke forvente en smuk teori for, hvordan coincidenstællerne medvirker til topartikel-bølgefunktionens

Kan kvantemekanikken forstås?

kollaps. Det er en del af den grundlæggende kvante-semantik, som det er op til eksperimentalfysikeren at gøre gyldig. Kvantemekanikken er for simpel en teori til, at vi kan kræve en totalbeskrivelse af den klassiske verden af den, men den er samtidig en norm for videnskabelig objektivitet, der i en lang periode har kunnet fungere i kraft af en logisk konsistent og velfungerende formalisme.

Men kvanteformalismens normsættende rolle kan ikke udstrækkes til vilkårlige, tænkte eksperimentelle situationer. Man kan skræve så meget, at bukserne revner, og det gør man, hvis man postulerer EPR-korrelationer over "kosmologiske afstande". De 12 m, som Aspect har kunnet skræve over, er i sig selv imponerende, men han ville bestemt ikke bryde sig om at skulle gennemføre et lignende forsøg uden den koordinerende og synkroniserende elektronik med coincidentstællerne i centrum²⁴. Det kan jo imidlertid godt lade sig gøre med tilstrækkeligt nøjagtige ure i de to ender af opstillingen at erstatte den "forudsatte" med en "retrospektiv" coincidentstilling, således at man efter forsøgets afslutning sammenligner tidspunkter for de uafhængigt registrerede enkeltpartikler og derved finder coincidens-sandsynlighederne, der indgår i Bell's ulighed.

Der er visse vanskeligheder ved et sådant forsøg, idet uafhængige ure af tilfældige årsager diffunderer ud af takt, og derfor må coincidensvinduet, dvs. den tolererede tidsforskel for de to begivenheder, der udnævnes til en coincidens, gøres større, jo længere forsøgsperioden er. For at undgå falske coincidenser må man så sætte kildehastigheden ned, men så må forsøgsperioden gøres længere for at opnå en ordentlig statistik. Hvis man skal undersøge, om uligheden (1) er brudt, kan man ikke tolerere mere end allerhøjst 20% falske coincidenser. (I det første og det tredje Aspect-forsøg er der 40% falske coincidenser, som

imidlertid fratrækkes ved hjælp af en forsinket coincident-tæller.) Alt i alt ser det ud til, at et forsøg uden forudsat coincidentstilling rimeligt let kan gennemføres i et laboratorium (afstand 12 m) på en overskuelig tid (et par timer), men den fornødne tid vokser med ottende potens af afstanden, så det er urealistisk at gå til "kosmologiske afstande" (f.eks. 100 m).

Hvad kan man opnå ved at lave et sådant forsøg? Først og fremmest en større ærlighed, en bedre overensstemmelse mellem de populære og filosofiske idealiserede fremstillinger og den eksperimentelle virkelighed. Hvis det så viser sig, at Bell's uligheder stadig er brudt, så må jeg jo indrømme, at det ser lidt mystisk ud: enten er Einsteins lokalitetsprincip ikke opfyldt, eller også sætter virkeligheden en fælles kontekst, som ikke umiddelbart fremgår af den eksperimentelle opstilling. Det ville være en kedelig sag for en semiotisk realisme og også for den traditionelle københavnerfortolkning (før 1935), som jo insisterede på, at kvante-semantikken må begrundes i den eksperimentelle kontekst. At denne fortolkning kan falsificeres af et muligt (men ikke af noget tidligere udført) eksperiment viser imidlertid, at den ikke er indholdsløs, og derfor må man håbe, at en dygtig eksperimentalfysiker tager udfordringen op. Det kræver imidlertid, at der er nogen, som kan se, at problemet er der, og derfor har jeg endnu en gang forsøgt at argumentere for det. For mig at se er der stadig ingen grund til at betvivle, at kvantemekanikken kan forstås som en logisk teori, der både er realistisk og lokal, og ønsket om det omtalte eksperiment må udspringe af en sådan forståelse, der fører til et opgør, både med florumvunden mystik og med den ureflekterede accept af formler på deres glatte ansigt.

Kan kvantemekanikken forstås?

Noter .

1. Udtalelsen blev fremsat i et interview med Bell i svensk TV i foråret 1985.
2. Samtalen fandt sted d. 12. februar 1986 på CERN. Jeg havde i forvejen sendt Bell en kopi af min artikel
 - a. The Semiotics of Quantum Non-Locality, IMFUFA tekst nr. 93, 1985.
Heri diskuteres kvantemekanikken og den lokale realisme på baggrund af C.S.Peirce's pragmatiske filosofi og hans tegnteori, semiotikken. Synspunktet præsenteres også i min senere artikel
 - b. Context and Non-Locality, a Peircean Approach, IMFUFA tekst nr 144, 1987, også trykt i Proceedings of the Symposium on the Foundations of Modern Physics, The Copenhagen Interpretation 60 years after the Como Lecture, Joensuu, Finland, 6-8 august 1987, World Scientific, Singapore, 1987.
3. Ordet "kvanteholisme" betegner her en filosofi, der prøver at begrunde den holistiske tese (at verden ikke kan reduceres til uafhængige enkeltdele) med henvisning til kvantemekanikken, specielt Einstein-Podolski-Rosen debatten og dens udløbere, Bell's uligheder og Aspect's eksperimenter. Som repræsentanter for denne holdning kan henvises til:
 - a. F. Capra, The Turning Point, s. 83 ff. (Bantam Books, N.Y. 1983).
 - b. E. Damman, Bak tid og rom, s. 54 ff. (Dreyers forlag, Oslo, 1987).En vildere udgave af kvanteholismen, som bygger på en grov misforståelse af Heisenbergs usikkerhedsrelation

Kan kvantemekanikken forstås?

kan findes i:

- c. I. Bentov, Det vilde pendul: energiens bevidsthed, (Borgen, Kbh. 1982).
4. E. Rüdinger, Bohrs dobbeltspalte-eksperiment - endnu engang!, Gamma 71, 1988.
5. R.Florentin Nielsen og A.B.Saust, Kvasarer og gravitationelle linser, Gamma 71, 1988.
6. D. Favrholt, Niels Bohr og realisme begrebet, Gamma 72, 1988.
7. H.J.Folse, The Philosophy of Niels Bohr: The Framework of Complementarity, North Holland Physics Publishing, Amsterdam, 1985.
8. Den amerikanske filosof C.S.Peirce (1839-1914) kendte ikke kvantemekanikken, og kvantemekanikkens fædre kendte desværre ikke Peirce. I filosofien er han mest kendt som opfinder af det pragmatiske meningskriterium, som af hans ven William James blev videreudviklet (og i nogen grad forvansket) til den filosofiske retning pragmatismen. Bohr stiftede tidligt bekendtskab med disse tanker, gennem sin filosofiske læremester Harald Høffding, som kendte James. Peirce er desuden en pioner inden for semiotikken, læren om tegn. Som matematiker har han beskæftiget sig med relationslogik og mængdelære og på flere punkter foregrebet Cantors, Freges og Dedekinds arbejder. Som naturvidenskabsmand har han ydet bidrag til metrologi og geofysik, bl.a. har han (før Eötvös) opfundet en metode til præcise målinger af tyngdefeltets variationer. Som kemiker og

Kan kvantemekanikken forstås?

astronom har han udviklet spektroskopiske målemetoder. Det mest interessante i forbindelse med naturvidenskaben er nok hans sene, naturfilosofiske arbejder (o. 1890-1910), hvor han i sin kritik af den klassiske mekanik klart foregriber kvantemekanikken, bl.a. i artiklen "The Doctrine of Necessity Examined" fra 1892.

9. Umuligheden af en direkte udvidelse af den simple Hilbert-rums kvantemekanik (Dirac, v. Neumann) til beskrivelse af irreversible processer påpeges bl.a. i: G.G. Emch, Algebraic Methods in Statistical Mechanics and Quantum Field Theory, Wiley-Interscience, N.Y. 1972.
10. N. Bohr, Atomfysik og menneskelig erkendelse, Schultz, København, 1957, s. 76.
11. L. Rosenfeld, s. 124 i bogen Niels Bohr. Hans liv og virke, Schultz, København 1964.
12. P. Zinkernagel, Omverdensproblemet, Gad, Kbh., 1957.
- - - - -, Conditions for descriptions, Routledge & Kegan Paul, London, 1962.
13. J. Israel, Kunsten at blæse en ballon op indefra, Gyldendal, Kbh., 1983.
14. D.M. Greenberg, The neutron interferometer as a device for illustrating the strange behavior of quantum systems, Revs. Mod. Phys., vol. 55, p. 875, 1983.
15. Einstein, Podolski og Rosen lagde ud i
a. Phys. Rev., vol. 47, p. 777, 1935.

Niels Bohr skrev kort tid efter som svar et letter til Nature, men den egentlige svarartikel kom i

- b. Phys. Rev., vol. 48, p. 696, 1935.

Begge artiklerne har titlen "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete".

16. Sml. diskussionen i

A. Shimony, Controllable and Uncontrollable Non-Localilty, Proc. Int. Symp. Foundations of Quantum Mechanics, Tokyo, 1983, pp. 225-230.

Shimony, der er både fysiker og filosof, foreslår, at EPRs "action at a distance" i stedet betegnes "passion at a distance". I artiklen refereres et kvantemekanisk bevis for umuligheden af superluminal kommunikation, som imidlertid bygger på den tvivlsomme antagelse, at måleprocessen kan beskrives med en (lokal) hamilton-operator.

17. Udtalelsen faldt i et interview i Lars Becker Larsens film "Atomfysik og virkelighed", Statens Filmcentral, 1985.

18. Foranlediget af en bemærkning af idéhistorikeren Mogens Wegener, AU (Paradigma nr. 3, 1987; tak til MW herfor) skal jeg præcisere sprogbrugen: At rumligt adskilte ure både er synkrone og isokrone betyder her, at de én gang er indstillet til at vise samme tidspunkt (er synkrone) og derefter bliver ved med at følges ad i deres gang (er isokrone). Som det senere skal påpeges, består det eksperimentelle problem i at få urene gjort isokrone. Jeg har i et par tidligere artikler (Paradigma nr. 2, 1987; Profil nr. 3, 1988) beskrevet coincidenstællernes

Kan kvantemekanikken forstås?

rolle i Aspect-forsøget ved at sige, at de etablerer et isokront felt.

19. D.Mermin, Is the Moon There when Nobody Looks?, Physics Today, april 1985.
20. Se læserbrevene som reaktion på ref. 19 og Mermin's svar i Physics Today, november 1985.
21. En udmærket oversigt over de teoretiske og eksperimentelle forudsætninger for Aspect-gruppens eksperimenter findes i:
 - a. J.F.Clauser and A.Shimony, Bell's Theorem: experimental tests and implications, Rep. Prog. Phys., vol. 41, p. 1881, 1976.
Flg. artikel sammenfatter overvejelserne bag og resultaterne af Orsay-gruppens (Aspect m.fl.) tre vigtigste forsøg:
 - b. A.Aspect and P.Grangier, Experiments on Einstein-Podolsky-Rosen-Type Correlations with Pairs of Visible Photons, Proc. Int. Symp. Foundations of Quantum Mechanics, Tokyo, 1983, pp. 214-224.
22. J.Bang, For whom the Bell tolls, Gamma 52, 1983.
Se også min artikel "Retur til virkeligheden" i samme nummer, hvor der refereres til Wheeler's og Holger Bech Nielsens udtalelser.
23. Jeg har skildret et af de lokalrealistiske scenarier, der bryder Bell's ulighed i et upubliceret skrift med titlen "Kvantelogik eller semiotik", IMFUFA, marts 88. Eksemplet er også gennemgået i en NAT-BAS rapport fra RUC, forår 88, vejledt af Jens Gravesen:

J.Riedel et al, Aspects forsøg - analyse og baggrund. Det drejer sig om en spørgeskema-undersøgelse af adskilte "tvillingers" tilhørsforhold til ét af tre mulige "partier". Konteksten sættes ved, at den spørgende sociolog bærer et synligt tegn på sit eget parti og at det er ham forbudt at spørge om medlemskab til netop dette parti. Endvidere antages, at de tre partier har en ikke-transitiv "hakkeorden" og at der i den adspurgte befolkning er en brøkdel q af særligt kontekst-sensitive (frygtsomme) personer. Det vises så, at størrelsen C i (1) får værdien $q/2$, hvis det er to forskellige sociologer, der udspørger tvillingerne, men $-q/2$, hvis det er den samme sociolog. Altså: fælles kontekst kan føre til brud på Bell's ulighed, selv om alle vekselvirkninger er rent lokale.

24. Aspect's tanker om muligheden og ønskeligheden af at gennemføre et eksperiment uden coincidentstøllere er refereret af Tor Nørretranders i "Det udelelige", side 176. (Gyldendal, 1985).

Peirce as participant in the Bohr-Einstein discussion .

Paper presented at the Charles S. Peirce Sesquicentennial Congress, Harvard University, september 4. - 10., 1989.

Abstract .

In 1891-93 Peirce presented his views on metaphysics and the coherence of science in a series of five papers to The Monist. From a physical point of view these papers appear prophetic today, especially regarding their account of the inadequacies of classical mechanics and the guidelines laid out for the principles of a new dynamic theory of atoms. Many difficulties concerning the foundation of quantum mechanics could have been avoided if Peirce's arguments had been known.

The discussions between Bohr and Einstein had two main parts. In the first part Einstein advocated a necessitarian attitude which Peirce had argued against in the second paper "The Doctrine of Necessity Examined". The second part of the Bohr-Einstein discussion is concerned with the Einstein-Podolsky-Rosen argument from 1935. In consequence of his "synechistic" philosophy of continuity, outlined in the third paper "The Law of Mind" Peirce would here probably have supported Einstein, whose viewpoint is based on the locality-principle, i.e. the absence of "action at a distance". Although recent experiments (Aspect et al.) seem to support Bohr's viewpoint there is in fact no evidence against a synechistic interpretation. The local realism, as defined by Peirce, is a way of saving quantum mechanics from extravagant ontologies.

Introduction .

The development of the triadic system of categories in 1885 served for Peirce as a bridge back from general ideas of epistemology and semiotic to specific questions in physics. In the years 1891-93 he presented to the public these new ways of his thinking in a series of five papers to the new philosophical journal *The Monist*. Today, after almost 100 years of radical changes in physics, these papers still present a surprising wealth of relevant ideas.

In the last decade of the 19th century the main questions in physics concerned the theories of heat and energy and the existence of atoms and molecules. The central person in this debate was the austrian physicist L. Boltzmann who had two main groups of opponents. One group was the *energeticists* who favored the new theory of heat, thermodynamics, but did not believe in the reality of atoms. Another group of *mechanicists* were more willing to believe in atoms, but could not accept thermodynamics, because the thermodynamical concept of irreversibility, as expressed by Clausius in the law of increasing entropy, contradicted the principles of Newton's classical mechanics. At the same time, in U.S.A. arguments were developed that might have helped Boltzmann in his struggle against these two groups, had they been appreciated in time: J. W. Gibbs created the new discipline *Statistical Mechanics* and Peirce introduced the viewpoints of *tychism* and *synechism* in his *Monist*-papers. Gibbs' contribution was to become one of the most important founding blocks of 20th century physics, whereas Peirce's remained unknown. Today we are in a better position to understand the importance of Peirce's ideas, for several reasons. First, because his criticism against classical mechanics and his prophetic vision of a new cosmology where laws are developed out of

chaos are in accordance with modern physics. Second, because some fundamental problems in the interpretation of Quantum Mechanics remain a puzzling source of disagreement in continuation of the long debate between Bohr and Einstein, and Peirce appears as a highly relevant third part in this discussion, whose ideas are in many ways similar to Bohr's, but in other ways closer to Einstein's.

In the debate between Boltzmann and his two groups of opponents Peirce did not hesitate to express his opinion. Although he doesn't mention Boltzmann in the five Monist papers he clearly shares his views. Atoms exist, as a long chain of experimental evidence shows. The simplest and most convincing proof, according to Peirce, is a small piece of apparatus known as Crookes' radiometer that can still be found in the shelves of physics-classrooms. It consists of a closed glass bulb filled with air at a rather low pressure. Inside the bulb is a small mill wheel whose three or four wings are reflecting on one side and black on the other side. When light is shone on the mill it rotates with the black side of the wings to the rear in the direction of rotation. If one doesn't believe in molecules one would be tempted to say that the mill is driven by "light pressure", but this cannot be true because the momentum change of the light particles is greater on the reflecting side of the wings which therefore ought to be behind. The fact that the black is behind is, on the other hand, easily explained by the molecular hypothesis, because the black side gets heated by absorbing the light and the molecules are therefore reflected with greater momentum here than on the light reflecting side.

So much for the energeticists. The other group of Boltzmann's opponents, the mechanical reductionists who didn't believe in thermodynamics because it contradicts the

doctrine that mechanical laws explain everything, got a longer and much more carefully elaborated refutation in the second Monist paper "The Doctrine of Necessity Examined". This paper is without doubt one of Peirce's most remarkable. Not only does it present philosophically strong arguments against the universal validity of classical mechanics and its metaphysical follower, necessitarianism; it also presents its adverse doctrine, *tychism*, i.e. the viewpoint that chance is a genuine factor in the physical universe and precedes order and laws of nature in its evolution. Apart from being able to bring the concept of Evolution to harmonize with physics *tychism* also presents some thoughts about the nature of physical observables that are very pertinent to the early phase of the Bohr-Einstein discussion.

Does God play dice ?

In 1927 the first mathematical formulation of quantum mechanics was being developed by Heisenberg who worked in Copenhagen in close collaboration with Bohr. At the same time Bohr struggled to shape philosophical ideas he had cultivated since his early youth into an epistemology of the new atomic physics. The results were Heisenberg's matrix formulation of quantum mechanics, which included the uncertainty relations, and Bohr's theory of *complementarity*.

One of the main points of discussion between Bohr and Heisenberg was the ontological status of the uncertainty relations. Heisenberg tried to maintain a classical view, that the quantities in question, e.g. the position and momentum of an atomic particle, had some true values unknown to the observer. When a measurement tried to determine these values they would be disturbed from their true values due to the

interaction with the measuring apparatus, and this disturbance could not be arbitrarily small due to the finite value of the quantum of action. Bohr, however, strongly objected against this theory of disturbance, because he objected to the metaphysical idea of quantities having true values when these values in principle never could be known. By using all his famous powers of persuasion Bohr was finally able to convince Heisenberg that the complementarity viewpoint was correct and the disturbance theory wrong, but other physicists outside the Copenhagen circle, like Schrödinger and Einstein were not convinced.

Bohr regarded the act of measurement as a two stage performance: first, the apparatus would tell the system what kind of property was being measured. Second, the system, having accepted the assumption of this property, would choose a numerical value for it. Therefore, the properties of an undisturbed system are only potential properties until the proper setting occurs, and then the property suddenly appears by an abrupt and random choice called the *collapse of the wavefunction*. The situation is like a human choice, as described by the existentialist danish philosopher S. Kierkegaard, e.g. in the book "The Concept of Dread" (1844), whom Bohr admired highly and had been studying in his youth. As a simple example one may take the case when one person, A, asks another person, B: "what number are you thinking of now?". The question will first force B to think of the concept of number, which presumably he didn't do before the question, and then choose a value before he answers, e.g. "17". Einstein strongly objected to the element of chance in connection with a choice having a legitimate place in fundamental physics. The legend tells that Einstein exclaimed: "God doesn't play dice", and Bohr replied: "Stop telling God what to do!". (It is true that Einstein wrote such a remark

in a letter to Max Born in 1926, but Bohr's reply is more dubious).

Peirce's paper from 1892 "The Doctrine of Necessity Examined" might have given Bohr some more elaborate possible replies if he had known it. There are no signs that Bohr knew any of Peirce's writings in 1927, but his teacher of philosophy H. Høffding had been visiting two of Peirce's close friends, W. James and Lady Welby in the autumn 1904, and Bohr had read James' "The Principles of Psychology" in 1905. There are strong similarities between the Copenhagen school of quantum mechanics and american pragmatism, and it seems a reasonable conjecture that Bohr would have accepted Peirce's arguments in favor of tychism.

Peirce, after having refuted several necessitarian arguments, considered the idea that continuous observables had exact values prior to measurement. As an experienced experimentalist he could easily reject the claim that this idea was supported by experiments:

" -- an error indefinitely small is indefinitely improbable, so that any statement to the effect that a certain continuous quantity has a certain exact value, if well founded at all, must be founded on something other than observation."

Thus, Peirce did not exclude the possibility that some continuous quantities could have exact values independent of measurement. in fact he gave several examples where such a claim would seem reasonable, but he did not accept exactitude a priori, i.e. without arguments based on some kind of experience.

To Einstein the independent existence of exact values was a necessary axiom because it seemed to be equivalent to

a notion of an independently existing physical reality, and realism was not to be given up lightly. Bohr was not eager to give up realism either, but his realism became suspicious in the eyes of many physicists, because it was not supported by the doctrine of exact values of physical observables *an sich*. It became increasingly difficult for Bohr to maintain realism, and in 1935, in the answer to Einstein, Podolski, and Rosen, he seemed to have abandoned it completely in favour of a special kind of nominalism with the quantum mechanical formalism in the role of a supreme judge of what might correctly be regarded as reality. We shall return to a discussion of this viewpoint in the next section.

The reason why Peirce could maintain his realism without the notion of exact numerical values of potential observables was that he had developed *semiotic* to a point where it was able to treat classes of signs existing independent of the human consciousness. The *index* category of signs seemed to have acted as a "secret weapon" (it wasn't mentioned directly in the *Monist* papers) that gave him the strength to withstand the nominalistic temptation. In general, a sign is conceived as a genuine triadic relation between 1. a sign vehicle, 2. an object, and 3. an interpretant. However, the interpretant may be *latent* and in its absence the sign is of a "degenerate" type, called *index*, expressing a dyadic relation between sign vehicle and object. Thus, a physicist is concerned with translating the indexical signs of Nature to symbolical signs of Physics, and this process involves the setting of an interpretant. The quantum mechanical measurement process fits well to this general description with the measurement apparatus as the embodiment of the interpretant.

The final mathematization of quantum mechanics was made by Dirac, who, without knowing of Peirce's *semiotic*, inven-

ted a system of notation that contains just enough to distinguish between the indexical signs of physical systems by themselves and the symbolic values of measured observable quantities. The system by itself is described by a state vector without a coordinate representation (the "kets" and "bras") and the measurement apparatus serves to define a coordinate system in the vector space of the system. Finally, the symbolic values pertaining to an observable are represented as eigenvalues of the operator representing the process of measurement. The state vectors of Dirac are pure indices and make it possible to refer to the system *an sich* without the metaphysical assumption of symbolic "hidden variables" belonging to it. Dirac's notation is now applied by most physicists. It facilitates an unphilosophical work-day realism, but on festive occasions when verbal declarations are needed Bohr's somewhat nominalistic statements are often quoted literally.

Synechism and local realism .

In the third paper of the Monist series, "The Law of Mind", Peirce began to expose a theme that was to become very important for his thinking in his last years, the philosophy of continuity called *synechism*. This development was partly inspired by Cantor's invention of the mathematical theory of sets, particularly the notion of cardinal numbers of different degrees of infinity. Peirce expressed great admiration for Cantor, but in later papers and letters he gradually turned away from the notion of the continuum as a collection of points and came closer to what is now known as non-standard-analysis (Dauben, 1984). This is already apparent in "The Law of Mind" where he describes the continuum

as made up of infinitesimal intervals.

The synechistic philosophy of Peirce is built on a realistic conception of signs as living entities existing inside and outside the human mind. The signs live in a continuum where they propagate by a wavelike or diffusive motion, and when they meet other signs a merging and fusion occurs whereby new meaning arises. The essence of continuity is that no jumps occur in the propagation of signs and no action-at-a-distance is possible. Thus, synechism at first sight is unfavorable to phenomena like telepathy, but, as Peirce cautiously remarks near the end of the article, there may be other continua than space and time wherein such things may propagate.

The existence of a maximum velocity for signal propagation, the velocity of light, is a consequence of Einstein's special theory of relativity from 1905 and was not known to Peirce in 1892, but it would have been a strong argument for synechism which in some ways is very close to Einstein's concept of *local realism*.

In 1935 Einstein, Podolsky, and Rosen (EPR) wrote a paper with the title "Can Quantum Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?". This paper is Einstein's comeback in his discussions with Bohr after his defeat at the Solvay-meetings in Bruxelles, 1927 and 1930. The idea of EPR is to show that quantum mechanics is incomplete because it for some special situations violates the principles of local realism (Einstein locality) and seems to invoke action-at-a-distance in connection with the collapse of the wave function. The situation described in the EPR paper is one where two particles are emitted from an atom such that their total momentum is zero. By measuring the momentum of particle 1 one is at the same time forcing particle 2 into a state of well defined momentum even though

the particle is far away and did not possess this property before the measurement.

Immediately after the reception of the EPR article Bohr produced an answer with the same title. Surprisingly, Bohr did not deny that quantum mechanics would have such strange implications. As for the principle of local realism he did not question the locality principle but only Einsteins conception of realism. According to Bohr the measurement on particle 1 is not able to influence particle 2 by physical means but only by something called "*The very conditions which define the possible types of predictions regarding the future behavior of the system.*" These mysterious *very conditions* belong exclusively to the formalism and have no counterpart in physical reality. By introducing them in his philosophy Bohr finally abandoned realism and adopted a peculiar sort of nominalism in which the quantum mechanical formalism decides how one may speak *correctly* about reality. Strangely enough Bohr did not consider the possibility that one could make an independent measurement on particle 2 in order to see if it would act in accordance with the *very conditions*. Between the lines the article states that if such a measurement did not agree with the prediction the measurement must be in error.

In 1965 the irish physicist John S. Bell, working at CERN in Geneva, published a paper which finally made such experiments possible. Instead of momentum Belle proposed to measure the components of spin or polarization perpendicular to the direction of motion of the two particles. Bell made a mathematical formulation of Einstein's principle of local realism by assuming that the state of the particles could be described locally by a set of hidden variables. When a measurement were performed on one particle the outcome would depend on the values of the hidden variables and the setting

of the local measuring apparatus, but it would be independent of the setting of the remote apparatus measuring on the other particle of the pair. This formulation of the locality principle led to a set of inequalities that might be tested experimentally.

Bell's inequalities were subsequently tested in a long series of experiments measuring correlations of the polarizations in pairs of photons emitted by an atomic cascade process. The first experiments gave conflicting results, some of them seemed to confirm Bell's inequalities, others agreed with quantum mechanics. Finally, the experiments conducted by Aspect and his coworkers at Orsay (finished 1982) have convinced most physicists that quantum mechanics is correct and Bell is wrong.

The concept of local realism, formulated with local hidden variables having exact but unknown values thus seems to be refuted, although some weak loopholes in the analysis of the experiments still exist. Many physicists and popular essayists have then jumped to the conclusion that nature permits some sort of action-at-a-distance, even though EPR-like experiments do not make superluminal communication possible. A. Shimony has accordingly proposed the name "passion-at-a-distance" for this strange "effect" that apparently has no practical consequences except to violate Bell's inequalities under certain special circumstances.

Many extravagant ontological interpretations of the quantum mechanical formalism have gained credibility due to the Aspect experiment, like splitting universes and/or backwards causality (Wheeler), non-local hidden variables (Bohm) or just a vague holistic notion that everything depends on everything else (Capra and many others). This is unfortunate because the experiments just confirm the formalism which is suited to describe simple experiments with atomic particles

and not to be extrapolated to a "theory of everything" including telepathy and synchronicity. To the opinion of the author the situation calls for a rethinking of the philosophical principle of local realism in connection with the formalism and for this purpose Peirce's concept of synechism may be used.

As emphasized earlier Peirce's realism doesn't need the notion of hidden variables having exact values independent of measurement. Dirac's state vector is sufficient because it has the character of an index and this category, according to Peirce, is just the right sort of signs to expect in reality prior to the setting of an interpretant, i.e. a measurement. The symbolic values that are the outcomes of measurements are always contextual, i.e. they depend on the whole context of measurement. If one can point to a *common context* for the two measurements on the particles of the pair in the EPR experiments one may expect another outcome than if the two measurements are independent.

By pursuing this kind of contextual logic one can show that Peirce's concept of local realism, synechism, does not lead to Bell's inequalities. It is possible to have a situation where no communication is possible between the two "twins" but where Bell's inequalities are violated. If, for example, two human twins are asked about their political persuasion by *the same person* we have a situation where the inequalities may be violated. This is because the answers may depend on unconscious "signals" emitted by the interviewer. For two statistically independent interviewers, however, the inequalities will always be satisfied, provided no possibility of communication exists between the twins.

In all of the EPR-like experiments that have been performed it is easy to point to a common context for the two single-particle measurements. All registrations take place

in a centrally placed *coincidence counter*. It is impossible to detect one of the particles without simultaneously detecting the other. However, in most popular accounts of the experiments the situation is described as if the measurements are independent, such that in principle the distance involved could be "cosmological". It is very difficult to draw wires from one planet to another, so an experiment over cosmological distances will have to wait until it becomes possible to perform the experiment as it is described in the popular accounts, i.e. without the use of coincidence counters. If such an experiment were performed (it doesn't need to be from one planet to another, from one end of a laboratory to the other would be sufficient) without a clearly visible common context for the single-particle detections, and if it was found that Bell's inequalities are still violated, then one could say that local realism is in trouble.

Until then we can safely believe in *synechism* as the sort of local realism that has not been violated by any experiments, and we can skip the extravagant ontologies in order to understand quantum mechanics as a logically consistent theory inside its limited field of application. Future may show that neither Bohr nor Einstein, but Peirce had the correct interpretation of a theory he didn't even know.

References .

Bell, J. S., (1965), Physics vol. 1, p. 195.

Bohr, N., (1935), Phys. Rev. vol. 48, p. 696.

Dauben, J. W., (1984), C. S. Peirce's Philosophy of Infinite Sets, Mathematics: People - Problems - Results , ed. Camp-

Peirce as participant in the Bohr-Einstein discussion

bell-Higgins, Woodsworth Int.

Einstein, A., Podolsky, B., and Rosen, N., (1935), Phys. Rev. vol. 47, p. 777.

Peirce, C. S., (1891):

The Architecture of Theories, The Monist vol. 1, p. 161.
1892:

The Doctrine of Necessity Examined, ibid. vol. 2. p.321.

The Law of Mind, ibid. vol. 2, p. 533.

Man's Glassy Essence, ibid. vol. 3, p. 1.

1893:

Evolutionary Love, ibid. vol. 3, p. 176.

Peircean local realism does not imply Bell's inequalities

Peircean local realism does not imply Bell's inequalities

Extended abstract for a paper submitted to the "Symposium on the Foundations of Modern Physics", Joensuu, august 1990.

The paper following the abstract consists in part of material from a poster presented at the symposium. The last part was developed in a dialogue with A. Zeilinger.

The concept of "local realism", also called "local causality" or "Einstein locality" was introduced in connection with the famous 1935-paper by Einstein, Podolsky and Rosen with the purpose of indicating a fundamental incompleteness of the quantum mechanical formalism. Later, Bell connected the concept with the existence of "local hidden variables" and was able to show that the existence of such quantities lead to inequalities concerning correlations of spins or polarizations of a particle pair, and that these inequalities sometimes are violated by quantum mechanics. A considerable number of sophisticated experiments, mainly Aspect's in 1982, have subsequently shown that quantum mechanics gives the correct predictions under such circumstances, and that the Bell-inequalities are violated. Still some small "loopholes" exist, but the conclusion seems reasonably clear: The concept of local realism that is connected with the existence of local hidden variables is incompatible with the experiments.

This conclusion is then in many cases regarded as evidence for non-locality of the quantum mechanical formalism. It is the purpose of this paper to point out that

this needs not be the case. As regards practical consequences of the presumed non-locality, such as possibilities for sending superluminal signals they seem to be non-existing. From a pragmatic point of view it therefore seems less than satisfactory to adopt a philosophical interpretation of the formalism that allows non-locality even a "ghost-like" existence. This problem can be avoided if it can be demonstrated that the broader concept of local realism, as needed in the Einstein-Podolsky-Rosen argumentation is not equivalent with Bell's idea of local hidden variables.

Indeed, there exists a more general conception of local realism that can be mathematically formalized and is compatible with the quantum mechanical formalism. The so called "synechistic" philosophy which occupied a considerable part of C.S. Peirce's thinking from 1892 to his death in 1914 lives up to these specifications. Unfortunately, Peirce's synechism has been virtually unknown by the pioneers of quantum philosophy due to the late and insufficient publication of his papers. Moreover, some of the editors of Peirce's work have been too quick to express the opinion that that the Peircean philosophy of continuity (i.e. synechism) is unable to grasp the essential discreteness of quantum physics. This paper will show that the discreteness of the transition from potentiality to actuality connected with the collapse of the wave function is well described in peircean semiotic as a transition between the sign categories index and symbol. An index cannot in general be represented numerically and the indexical character of quantum mechanical state vectors is, therefore, not compatible with the notion of hidden variables. There is no difficulty in regarding Dirac's quantum formalism as an instance of Peircean semiotic and the locality and continuity expressed by the partial differential wave

Peircean local realism does not imply Bell's inequalities

equations corresponds well with Peircean synechism.

A consequence of the Peircean view of state vectors as indices is that numerical properties of quantum systems are always contextual, i.e. they exist only in connection with well defined setups of measuring apparatuses. A property of a pair of particles may therefore be expected to depend on whether there exist a common context for the measurements on the single particles, or not. Following this line of thought it is possible to construct a classical scenario where every interaction is strictly local, but where Bell's inequalities are clearly violated. The example can be formulated as an interview where a sociologist ask a couple of "twins" about their political affiliations, but where the truth of the answers depends on certain "signals" emitted by the sociologist. It turns out that Bell's inequalities may be violated if the twins are interviewed by the same sociologist, but never with two different sociologists.

Although the example has no direct connection with quantum mechanics and Aspect's experiments it suggests some points that may be worth investigating. The coincidence counters used in the experiments look like a common context for the polarization measurements of the two photons in a cascade pair, so it may be suggested that a similar experiment performed with truly independent measurements on the two particles may conform with Bell's inequalities. This point can only be investigated experimentally. A philosophical point that can be made on the basis of the example, or Peircean synechism in general, is that there is no need to look for more or less extravagant ontological speculations, like splitting universes, backwards causality, or superluminal signals in order to justify the consistency and relative completeness of the quantum formalism.

The american philosopher Charles Sanders Peirce (1839-1914) was an early advocate of ideas that are now associated with the Copenhagen philosophy of Quantum Mechanics. These ideas can be summarized under the following three headings: ¹

Pragmatism

The meaning of concepts, such as numerical values of physical variables, is defined in the context of experiment.

Tychism

Chance is an objective part of reality. Nature is fundamentally indeterministic.

Synechism

There is no action-at-a-distance. Signs are propagated by local interactions in the continuum of space.

Pragmatism and tychism are similar to Bohr's philosophy, but synechism is closer to Einstein's local realism, although it does not support the idea of hidden variables.

Continuity versus discreteness

Charles Hartshorne, one of the editors of Peirce's "Collected Papers" has expressed the view that Peirce's interest in the continuity concept in his philosophy of synechism represents a failure to grasp the essential discreteness of the new physics soon to arise:

"I find something pathetic in Peirce's failure to anticipate both basic aspects of quantum physics, instead of only one of them (indeterminism), for he had all the conceptual tools needed for the second anticipation (discontinuity). Moreover, indicating the right direction for the development of physics was one of his professed ambitions and, he thought, a test for the soundness of his philosophy." (Hartshorne ², quoted from Fernandez ³).

Hartshorne seem to have overlooked that synechism also treats the concept of discreteness, or discontinuity as a necessary ingredient in the continuum. Indeed, in several discussions of mathematics that were omitted in the "Collected Papers" by Hartshorne but later included in the "New Elements of Mathematics" (NEM) collected by Carolyn Eisele⁴, Peirce draws attention to the topological invariants of space (the Listing numbers, NEM III.112) as a class of non-relative properties that precede the continuity properties. Moreover, in his triadic system of categories continuity is described as a "thirdness" whereas discreteness is a "secondness". This corresponds with the semiotic classification of the signs that point to distinguishable objects, indices, as secondary or dyadic signs whereas continuous numerical properties are described as full triadic signs

depending on an interpretant, i.e. symbols, whose meaning is only defined in the context of statistical uncertainties arising from the experimental situation.

According to Peirce a sign is an irreducible triadic relation between 1. a sign vehicle, 2. an object, and 3. an interpretant. A full-fledged triadic sign is called a *symbol*. However, there exist "degenerate" types of signs where one or more of the factors in the sign relation are latent. Thus, in the absence of an interpretant the sign degenerates to a dyadic type called an *index*, and if also the object is latent (or "in the shadow" of the sign vehicle) we have a monadic sign called an *icon*.

In quantum mechanics we find a clear example of the use of these three categories of signs. Thus, the basic notion of a particle is an icon, its state vector without regard to any representation is an index, and its numerically measurable properties, given by matrix elements of certain operators in a representation determined by the experimental context, can be classified as symbols. The setting of an interpretant is a discrete topological transformation of the sign relation, and therefore discreteness is somehow inherent in the quantum formalism. The quantum jump described as "the collapse of the wave function" can be regarded as a discrete transition from a potential symbolic property to an actual one, and this type of discrete jump is therefore of a topological nature in connection with the very nature of the sign relation. Another type of discreteness in quantum mechanics is connected with the eigenvalue spectrum of the operators representing observables of bounded systems. This is explained in wave mechanics as due to the finite value of the quantum of action and therefore not directly related to Peirce's semiotic. However, as the operators are defined on a continuous space, nothing contradicts synechism.

Bell's inequalities .

Classical probabilistic logic proceeds from the assumption that the truth value of a proposition "a" can be determined without dependence on the experimental context for determining another proposition "b". This assumption leads to Kolmogorov's axiom for the probability that either a or b is true:

$$p(a \vee b) = p(a) + p(b) - p(a \wedge b)$$

By introducing the "measure of separation"

$$S(a, b) = p(a \vee b) - p(a \wedge b)$$

E. Santos⁵ has shown that Bell's inequalities follow from classical logic and can be formulated in the following way:

$$0 \leq S(a_1, a_2) + S(a_1, b_2) + S(b_1, a_2) - S(b_1, b_2) \leq 2$$

Where a_i and b_j are properties of two separated objects, "1" and "2".

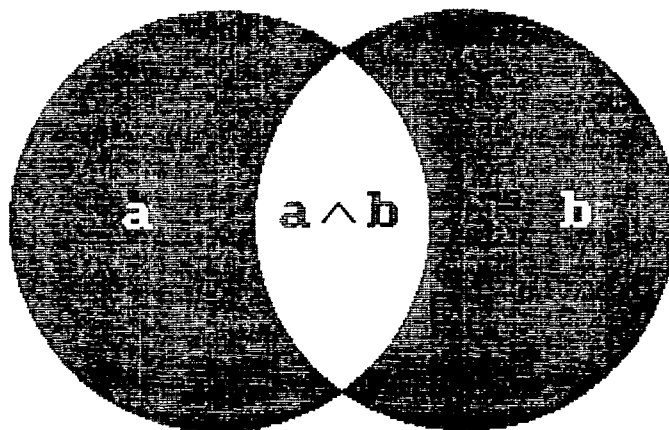


Fig. 1 For two propositions a and b, the "probability of coincidence" is shown white, and the "measure of separation" is shown as the shaded area.

In cases where the probability of each of the single propositions a_i , b_j being true is $1/2$ the inequalities of separation can be reformulated to inequalities of coincidence (by Kolmogorov's axiom):

$$1 \geq p(a_1 \wedge a_2) + p(a_1 \wedge b_2) + p(b_1 \wedge a_2) - p(b_1 \wedge b_2) \geq 0$$

If the particles 1 and 2 are "twins" and b_1 and b_2 express the same property of the two-particles we have $p(b_1 \wedge b_2) = 1/2$. If the three other properties are "equally different" the right inequality tells that the probability of measuring different properties of the two particles will be not less than $1/6$. This is the case discussed by Mermin in a popular paper.⁶

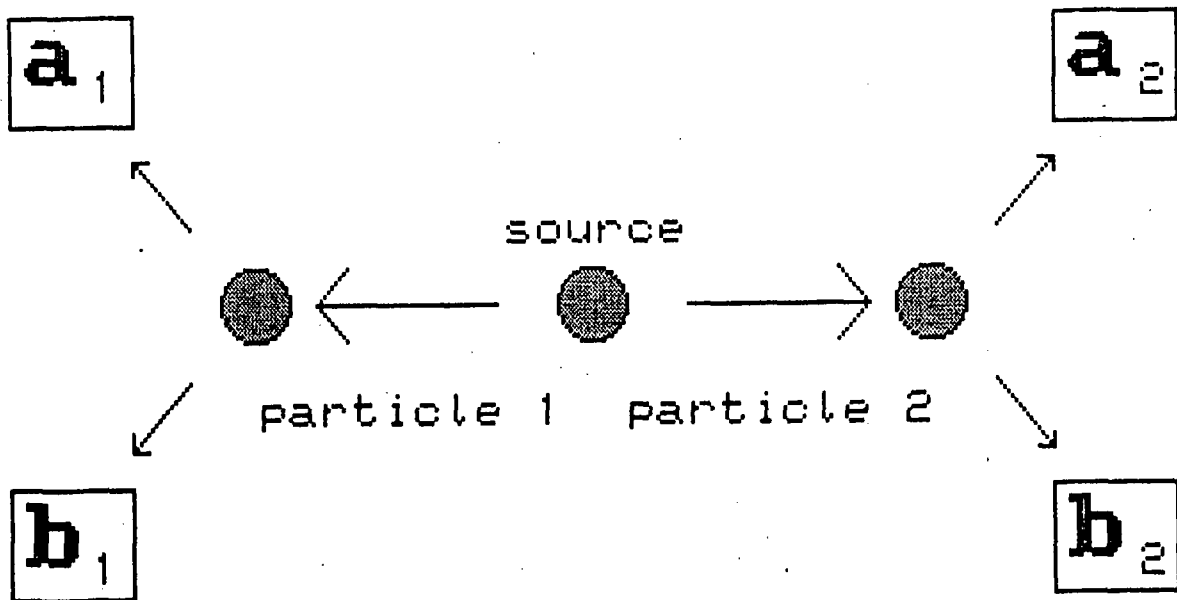


Fig. 2 Measuring properties of "twins" (Aspect/Mermin).

Derivation of Bell's inequalities and Fine's theorem

The derivation of Bell's inequalities from classical probabilistic logic seems to suffer from the supposition that joint distributions exist for properties like a_1 and b_1 that are incompatible according to quantum mechanics. Consider the following derivation where we disregard all questions of incompatibility. The whole probability space can then be divided into 16 subsets of the 4 properties a_1 , b_1 , a_2 , and b_2 . In the table below these subsets are indicated in a binary notation in the leftmost four columns. To the right other four columns show with an x if a certain subset belong to one of the four separation sets $S(a_1, a_2)$, $S(a_1, b_2)$, $S(b_1, a_2)$, and $S(b_1, b_2)$. Finally, in the rightmost column a number shows how many times a subset counts in the sum $S = S(a_1, a_2) + S(a_1, b_2) + S(b_1, a_2) - S(b_1, b_2)$.

| a_1 | b_1 | a_2 | b_2 | $S(a_1, a_2)$ | $S(a_1, b_2)$ | $S(b_1, a_2)$ | $S(b_1, b_2)$ | S |
|-------|-------|-------|-------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----|
| 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | | x | | x | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | x | | x | | 2 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | x | x | x | x | 2 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | | | x | x | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | | x | x | | 2 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | x | | | x | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | x | x | | | 2 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | x | x | | | 2 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | x | | | x | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | | x | x | | 2 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | | | x | x | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | x | x | x | x | 2 |
| 1 | 1 | 0 | 1 | x | | x | | 2 |
| 1 | 1 | 1 | 0 | | x | | x | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | 0 |

It is seen that each of the subsets counts either twice or nothing to the sum S , and as the total probability measure of all the subsets adds to unity, the value of S must lie between 0 and 2, which is equivalent to Bell's inequalities^{5,7}.

The original derivation of the inequalities did not assume the existence of joint distributions for incompatible properties, but instead it assumed the existence of local hidden variables with distributions independent of the experimental setup. In 1982 it was shown by A. Fine⁸ that the assumptions are equivalent: if Bell's inequalities are valid joint distributions of all combinations of properties will exist, at least in a mathematical sense. The assumption of local hidden variables is therefore unnecessary, and the whole derivation of the inequalities can be regarded as an application of classical probabilistic logic, as has been done in the preceding paragraphs.

In connection with his theorem Fine raised the question whether the observed violations of the inequalities had been misinterpreted when it was considered a sign of an inherent non-locality in nature. What they really are about is rather the existence of joint distributions that are forbidden by quantum mechanics, says Fine. This remark may then be taken as a justification for the common view among the adherents of the Copenhagen interpretation, that there is no reason at all to be concerned about the presumed non-locality. Another conception, which is more in accordance with Peirce's local realism, is that the violation of classical logic is due to contextuality. Shimony⁹ has presented a contextual hidden variable theory where he argues that Fine's joint distribution of incompatible properties is unphysical because no experimental context exists for their measurement. This is true, but contextuality needs no hidden variables!¹⁰

How to violate the inequalities

The violation of Bell's inequalities in Aspect's and other experiments is often quoted as an example of non-locality, a sort of mysterious action-at-a-distance that seems to have no other action than violating the inequalities (it might be called a "passion-at-a-distance" as proposed by Shimony)¹¹. According to Peirce's pragmatic philosophy and the idea of synechism the interpretation looks more like a theoretical artefact. There is no need to jump to the conclusion that Quantum Mechanics is non-local, just because it violates Bell's inequalities. Quantum Mechanics and its basic semantic is built on a contextual logic that is a straightforward example of the "logic of relatives" invented by Peirce. This logic does not imply Bell's inequalities unless the experimental contexts for the two particles are independent. There is no need for a quantum of action or any non-local effects in order to explain their violation. In other words: it must be possible to construct a purely classical scenario leading to violation

A classical scenario .

In the country "Smullyana" ¹³ there are three clubs, A, B and C. Every inhabitant is a member of at least one of the clubs, and no one is a member of more than two. The following figure shows exactly how the population is divided among the clubs.

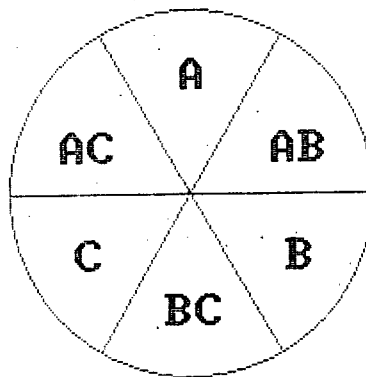


Fig. 3 . The distribution of inhabitants of Smullyana on the three clubs, A, B, and C.

In Smullyana there are many pairs of twins, and the two members of such a pair always belong to the same club or clubs. If an "objective" sociologist picks a random pair of twins and asks each of the two persons if he or she is a member of a certain club, the probability of getting the answer "yes" is $1/2$ (see fig. 3), at least if the persons answer truthfully. If the two twins are asked separately, not necessarily the same question, and if both answer "yes" the sociologist will report a "coincidence" to his institute. If now the objective sociologist asks twin 1 if he is a member of club A and twin 2 if he is a member of club B, and both twins answer truthfully, then the probabi-

Peircean local realism does not imply Bell's inequalities

lity of getting a coincidence (two "yes"es) will be exactly $1/6$ (see fig. 3). This is an example of how classical context-free logic can get us to the lower limit of Bell's inequality (Mermin's version), but not below. Let us now introduce contextuality in order to get below the lower limit of $1/6$ probability of coincidence when two different questions are asked.

We now assume that the three clubs have an established non-transitive order of verbal attacks, such that

- club A always attacks club B,
- club B always attacks club C, and
- club C always attacks club A.

We further assume that a certain fraction, q , of the twins are "fearful" such that they will not answer truthfully when asked if they are members of a club they really belong to, if they know that the person asking the question belongs to the club that always attacks their own club, and they will always answer "yes" when asked if they are member of the club that attacks the sociologist's club. The sociologists (not being aware of this fact) choose to expose their own membership of one of the clubs by wearing a T-shirt with its letter clearly printed, but the sociological institute prefers to conduct its investigation of twin-memberships in such a way that a sociologist never is allowed to ask about membership in the club whose letter he is wearing himself. Assuming that the sociologists are equally distributed in the clubs the institute decides who may pose a certain pair of questions by random choice among the suitable coworkers. If for example the pair of questions is "A?/A?" it may be asked by B- or C-sociologists, whereas if it is "A?/B?" it may only be asked by C-sociologists, assuming that the same sociologist asks both members of the pair.

If now an A-twin is asked by a C-sociologist, if he is

a member of club A, he will not answer truthfully, if he belongs to the "fearful" part of the population. He will not know what question his twin brother is asked (it might be A? or B?), but he is seduced by the context (the T-shirt of the sociologist) to deviate from truth. If twins are assumed to share the property of being fearful or not, and the other (fearful) twin is asked B? he will answer "yes", but the probability of a coincidence has been diminished by the common context. One finds that the probability of a coincidence for two different questions is $p_d = (1-q)/6$, whereas that for the same question (averaged over the different possible sociologists) still is $1/2$. The coincidence sum is $3p_d - p_s = -q/2$, below the lower limit according to Bell.

That the violation of Bell's inequality is due to a common context is illustrated by the same example if one modifies the rule such that it is always two different sociologists that ask the two questions to the separate members of a pair of twins. The two questioners are supposed to be picked at random among the suitable members of the institute. In this case one finds that the occurrence of fearful twins adds to the probability of coincidence for two different questions, such that it becomes $1/6 + q/12$. So in this case Bell's inequality is satisfied, which is to be expected when the two contexts are statistically independent. It's a bit more complicated in this case, because the probability of coincidence for the same question (e.g. A?/A?) is reduced to $p_s = 1/2 - q/4$ whereas that for different questions is increased to $p_d = 1/6 + q/12$. So, $3p_d - p_s = q/2 \geq 0$, in accordance with Bell and Mermin.

Although the scenario is highly artificial it should illustrate that violation of Bell's inequality can occur in the absence of quantum effects or any sort of non-locality. There is nothing mysterious about it, just common context.

The Aspect experiment

Fig. 4 shows some more of the experimental context of the Aspect experiment (1982) than is shown in fig. 2 and most popular accounts (e.g. Mermin's). It looks as if there is a common context for the detection of the two distant particles, namely the centrally placed coincidence counters where all registrations take place.¹²

Are these connections relevant?

Can they explain the results?

Maybe somebody will try to make a similar experiment without coincidence counters in order to see if they are relevant. The basic formalism of Quantum Mechanics does not attempt to explain what goes on in a measuring apparatus. The collapse postulate defines the meaning of the wave function invoking a concept of an ideal experiment, not by description of a real one. Everybody can make an experiment that does not agree with Quantum Mechanics. It requires the hard work of an experimentalist to prove that "the ideal quantum measurement" is not an empty postulate. But there is no guarantee that it will always work.

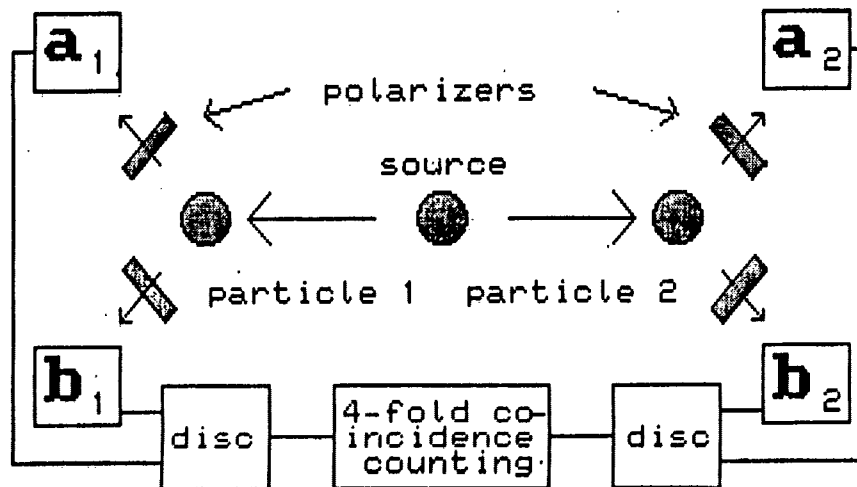


Fig. 4 . Aspect's "switching" experiment.

The GHZ experiment

Greenberger, Horne, and Zeilinger (GHZ)¹⁴ has considered the case when more than two spin- $\frac{1}{2}$ particles are emitted from a single source with total spin 0. A corresponding number of Stern-Gerlach apparatuses are situated around the source such that we can imagine that all particles are detected with either spin up or down relative to the field direction of each apparatus. If the angles of the fields with respect to an arbitrarily chosen direction sum to an integral multiple of 180° , a "superclassical" case occurs such that the direction of one of the spins can be predicted with a 100% accuracy according to quantum mechanics, if all the other spin directions have been measured.

In their original paper GHZ showed for the four-particle *gedanken* experiment that the superclassical correlations cannot be produced by a local hidden variable theory. As discussed by Mermin¹⁵, this feature is general when the number of particles is greater than 2. For the Bohm-variant of the EPR experiment (or Aspect's) with only 2 particles the superclassical correlation for parallel polarizers conforms with Bell's inequality.

For the case of three particles in a certain state Mermin shows¹⁶ that the product of the three measured spin values $s_1s_2s_3$ (s is +1 for up-spin, and -1 for down) is +1 every time two of the particle spins are measured in the y -direction and the remaining in the x -direction, but if all three spins are measured in the x -direction, the product will be -1. This then means that we can predict the third spin with certainty when we know the values of the first two. Such a correlation could not be produced by a classical model, claimed Zeilinger at the Joensuu Conference. A similar claim had also been put forward by H. Stapp.

Peircean local realism does not imply Bell's inequalities

In my remark at the discussion of Zeilinger's paper I maintained that classical models of such correlations could easily be made, provided a common experimental context existed for the separate particle detections, a coincidence counter. The next day I presented to Zeilinger a story from Smullyana to prove my point. As Zeilinger's presentation of the case was slightly different from Mermin's, my story was also slightly different from the one below.

The sociology institute has now an investigation going where they study "triple families", consisting of three people. Every such triple is interviewed with its members separated such that they cannot communicate and do not know what questions the other members are asked. The questions are always of the type: "Do you like the letter x (or y)?", and they are to be answered with either "yes" or "no". Every triple family is to be asked either about x to all its members or about x to one of them and about y to the other two.

The institute's staff consists of black men, white men, black women, and white women. For some reason the institute decides that every time the number of y-questions is 2 the interview of the members of a triple family shall be conducted by a woman (black or white) and by a man (black or white) every time this number is zero.

What the sociologists don't know is that every triple family contains exactly one "sexist" and two "racists". A sexist will always answer "yes" to such an innocent question when it is asked by a woman and "no" to a man. A racist will always answer "no" to a black and "yes" to a white.

One can then easily see, that the product of the three answer values (+1 for yes, -1 for no) will have the same value as in the GHZ-three-particle-experiment. Whenever all the questions concern the letter x, they are asked by a male sociologist, so the sexist will answer "no" and the two

racists will answer the same, depending on whether he is black or white, so the product is -1 . When two of the questions concerns y and the remaining x , and the interviewer is female the sexist answers "yes" and the two racists answer the same, and the product is $+1$.

Zeilinger remarked to the story that the correlations would not arise if the questions were asked by different people (statistically independent, regarding gender and race) and the answers compared afterwards, and I agree of course. This is just the crucial point: Superclassical correlations or violation of Bell's inequalities may arise within a classical framework in the absence of any non-local effects, but only in a situation where a common context exists for the different questions such that this context in some way reflects the combination of questions.

In real experiments the coincidence counters are the only visible common context for the different particle detections. My conjecture is therefore that an experiment without these central counters (i.e. with individual time records of single-detections and "retrospective" coincidence counting) would conform with Bell's inequalities. If such an experiment is performed and it turns out that the inequalities are broken in the way predicted by quantum mechanics, I would still maintain that there exists a common context like in the examples above, but it would be difficult to point to any specific part of the experimental equipment as providing this contextuality. That would be a real drawback for the comprehensibility of quantum mechanics. As pointed out by Fernandez³ quantum mechanics as developed by Bohr shares with Peirce the faith in the validity in "theorematic reasoning", i.e. logical conclusions based on idealized diagrams of experimental situations. It must be possible for experimentalists to describe the decisive features of their equip-

ment "in classical terms" as Bohr said and by means of icons (diagrams) as Peirce said, such that these icons, instead of the real physical apparatuses, can be used by theoreticians as the basis for drawing inferences. If this principle is not valid, quantum mechanics and the whole of physics will be in serious trouble and the door is wide open for extravagant and unfalsifiable ontological claims (many-worlds).

It is of course a problem to understand how the coincidence counters can make their presence known to the individual particles, because the normal assumption is, that the amplification in the single-detectors act in a way to make the connections to the coincidence counters act as classical one-way-channels. I have elsewhere¹⁷ pointed to the quantum mechanical zero-point noise in the dissipative registration devices as described in the fluctuation-dissipation theorem as a sign of consistency for quantum mechanics pointing to the limitation of the formalism in connection with dissipative processes, especially the measuring processes. The description of an idealized measurement inherent in the collapse postulate is the semantic basis for quantum mechanics and as such it lies outside the scope of explanation of the simple theory. The conceptual difficulties like Schrödinger's cat and the missing "objectification of the pointer position" described by Mittelstaedt and others at this conference points to the need of a measurement theory that involves something beyond the usual Hilbert space formulation, e.g. an "algebraic quantum mechanics" (Primas), a stochastic dynamic (Ghirardi) or some hidden variables describing the real equipment instead of some mysterious "implicate order" of nature.

However, if it is not possible to understand the basic quantum semantic by theorematic reasoning the whole foundation of the more elaborate theories seems very shaky.

References

1. J. Buchler (ed.), Philosophical Writings of Peirce, Dover, N.Y. (1955). (Especially the articles "The Architecture of Theories" (1891), "The Doctrine of Necessity Examined", and "The Law of Mind" (1892).
2. C. Hartshorne, Charles S. Peirce and Quantum Mechanics, Transactions of the Charles S. Peirce Society, 9, 191 - 201 (1973).
3. E. Fernandez, From Peirce to Bohr: Theorematic Reasoning and Idealization in Physics. Paper presented at the Charles S. Peirce Sesquicentennial Congress, Harvard, September 1989.
4. The New Elements of Mathematics by Charles S. Peirce, ed. Carolyn Eisele, The Hague: Mouton, vol. 1-4 (1976).
5. E. Santos, Phys. Letters, A 115, 363 (1986).
6. D. Mermin, Physics Today, april 1985. (See also the comments in the issue of november).
7. J. F. Clauser and A. Shimony, Rep. Prog. Phys. 41, 1981 (1978).
8. A. Fine, Phys. Rev. Letters, 48, 291 (1982).
9. A. Shimony, British Journal for the Philosophy of Science 35, 25 (1984).

Peircean local realism does not imply Bell's inequalities

10. P. V. Christiansen, Proceedings of the 1987 Joensuu Conference, Symposium on the Foundations of Modern Physics, World Scientific, Singapore (1987). (Preprint available as IMFUFA text no. 144.)
11. A. Shimony, Proc. Int. Symp. Foundations of Quantum Mechanics Tokyo (1983), pp. 225 - 230.
12. A. Aspect and P. Grangier, ibid. pp. 214 - 224.
13. R. Smullyan, What is the Name of This Book?, Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall (1978).
14. D. M. Greenberger, M. A. Horne, and A. Zeilinger, in Bell's Theorem, Quantum Theory and Conceptions of the Universe, ed. M. Kafatos, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (1989).
15. N. D. Mermin, Phys. Rev. Lett., 65, 1838 (1990).
16. N. D. Mermin, Physics Today, 43 (6), 9 (1990).
17. P. V. Christiansen, The Semiotics of Quantum-Non-Locali-ty, IMFUFA text no. 93 (1985).

- 1/78 "TANKER OM EN PRAKSIS" - et matematikprojekt. Projektrapport af: Anne Jensen, Lena Lindenskov, Marianne Kesselhahn og Nicolai Lomholt. Vejleder: Anders Madsen
- 2/78 "OPTIMERING" - Menneskets forøgede beherskelsesmuligheder af natur og samfund. Projektrapport af: Tom J. Andersen, Tommy R. Andersen, Gert Krenøe og Peter H. Lassen. Vejleder: Bernhelm Boss.
- 3/78 "OPCAVESAMLING", breddekursus i fysik. Af: Lasse Rasmussen, Aage Bonde Kræmmer og Jens Højgaard Jensen.
- 4/78 "TRE ESSAYS" - om matematikundervisning, matematiklæreruddannelsen og videnskabsrindalismen. Af: Mogens Niss. Nr. 4 er p.t. udgået.
- 5/78 "BIBLIOGRAFISK VEJLEDNING til studiet af DEN MODERNE FYSIKS HISTORIE". Af: Helge Kragh. Nr. 5 er p.t. udgået.
- 6/78 "NOGLE ARTIKLER OG DEBATINDLÆG OM - læreruddannelse og undervisning i fysik, og - de naturvidenskabelige fags situation efter studenteroprøret". Af: Karin Beyer, Jens Højgaard Jensen og Bent C. Jørgensen.
- 7/78 "MATEMATIKKENS FORHOLD TIL SAMFUNDSØKONOMIEN". Af: B.V. Gnedenko. Nr. 7 er udgået.
- 8/78 "DYNAMIK OG DIAGRAMMER". Introduktion til energy-bond-graph formalismen. Af: Peder Voetmann Christiansen.
- 9/78 "OM PRAKSIS' INDFLYDELSE PÅ MATEMATIKKENS UDVIKLING". - Motiver til Kepler's: "Nova Stereometria Doliorum Vinarium". Projektrapport af: Lasse Rasmussen. Vejleder: Anders Madsen.
-
- 10/79 "TERMODYNAMIK I GYMNASIET". Projektrapport af: Jan Christensen og Jeanne Mortensen. Vejledere: Karin Beyer og Peder Voetmann Christiansen.
- 11/79 "STATISTISKE MATERIALER". Af: Jørgen Larsen.
- 12/79 "LINEÆRE DIFFERENTIALLIGNINGER OG DIFFERENTIALLIGNINGSSYSTEMER". Af: Mogens Brun Heefelt. Nr. 12 er udgået.
- 13/79 "CAVENDISH'S FORSØG I GYMNASIET". Projektrapport af: Gert Kreinøe. Vejleder: Albert Chr. Paulsen.
- 14/79 "BOOKS ABOUT MATHEMATICS: History, Philosophy, Education, Models, System Theory, and Works of". Af: Else Høyrup. Nr. 14 er p.t. udgået.
- 15/79 "STRUKTUREL STABILITET OG KATASTROFER i systemer i og udenfor termodynamisk ligevægt". Specialeopgave af: Leif S. Striegler. Vejleder: Peder Voetmann Christiansen.
- 16/79 "STATISTIK I KRÆFTFORSKNINGEN". Projektrapport af: Michael Olsen og Jørn Jensen. Vejleder: Jørgen Larsen.
- 17/79 "AT SPØRGE OG AT SVARE i fysikundervisningen". Af: Albert Christian Paulsen.
- 18/79 "MATHEMATICS AND THE REAL WORLD", Proceedings of an International Workshop, Roskilde University Centre, Denmark, 1978. Preprint. Af: Bernhelm Booss og Mogens Niss (eds.)
- 19/79 "GEOMETRI, SKOLE OG VIRKELIGHED". Projektrapport af: Tom J. Andersen, Tommy R. Andersen og Per H.H. Larsen. Vejleder: Mogens Niss.
- 20/79 "STATISTISKE MODELLER TIL BESTEMMELSE AF SIKRE DOSER FOR CARCINOGENE STOFFER". Projektrapport af: Michael Olsen og Jørn Jensen. Vejleder: Jørgen Larsen.
- 21/79 "KONTROL I GYMNASIET-FORMÅL OG KONSEKVENSER". Projektrapport af: Crilles Bacher, Per S. Jensen, Preben Jensen og Torben Nysteen.
- 22/79 "SEMIOTIK OG SYSTEMEGENSKABER (1)". 1-port lineært response og støj i fysikken. Af: Peder Voetmann Christiansen.
- 23/79 "ON THE HISTORY OF EARLY WAVE MECHANICS - with special emphasis on the role of reality". Af: Helge Kragh.
-
- 24/80 "MATEMATIKOPFATTELSE hos 2.C'ERE". a+b. 1. En analyse. 2. Interviewmateriale. Projektrapport af: Jan Christensen og Knud Lindhardt Rasmussen. Vejleder: Mogens Niss.
- 25/80 "EKSAMENSOPGAVER", Dybdemodulet/fysik 1974-79.
- 26/80 "OM MATEMATISKE MODELLER". En projektrapport og to artikler. Af: Jens Højgaard Jensen m.fl.
- 27/80 "METHODOLOGY AND PHILOSOPHY OF SCIENCE IN PAUL DIRAC'S PHYSICS". Af: Helge Kragh.
- 28/80 "DILEMTRISK RELAXATION - et forslag til en ny model bygget på væskemes viscoelastiske egenskaber". Projektrapport af: Gert Kreinøe. Vejleder: Niels Boye Olsen.
- 29/80 "ODIN - undervisningsmateriale til et kursus i differentiaalligningsmodeller". Projektrapport af: Tommy R. Andersen, Per H.H. Larsen og Peter H. Lassen. Vejleder: Mogens Brun Heefelt.
- 30/80 "FUSIONSENERGIEN - - - ATOMSAMFUNDETS ENDESTATION". Af: Oluf Danielsen. Nr. 30 er udgået.
- 31/80 "VIDENSKABSTEORETISKE PROBLEMER VED UNDERVISNINGSSYSTEMER BASERET PÅ MØNGDELERE". Projektrapport af: Troels Lange og Jørgen Karrebæk. Vejleder: Stig Andur Pedersen. Nr. 31 er p.t. udgået.
- 32/80 "POLYMERE STOFFERS VISCOELASTISKE EGENSKABER - BELYST VED HJÆLP AF MEKANISKE IMPEDANSMÅLINGER - MOSSBAUEREFEKTIVMÅLINGER". Projektrapport af: Crilles Bacher og Preben Jensen. Vejledere: Niels Boye Olsen og Peder Voetmann Christiansen.
- 33/80 "KONSTITUERING AF FAG INDEN FOR TEKNISK - NATURVIDENSKABELIGE UDDANNELSER. I-II". Af: Arne Jakobsen.
- 34/80 "ENVIRONMENTAL IMPACT OF WIND ENERGY UTILIZATION". ENERGY SERIES NO. 1. Af: Bent Sørensen. Nr. 34 er udgået.

- 35/80 "HISTORISKE STUDIER I DEN NYERE ATOMFYSIKS UDVIKLING".
Af: Helge Kragh.
- 36/80 "HVAD ER MENINGEN MED MATEMATIKUNDERVISNINGEN?".
Fire artikler.
Af: Mogens Niss.
- 37/80 "RENEWABLE ENERGY AND ENERGY STORAGE".
ENERGY SERIES NO. 2.
Af: Bent Sørensen.
-
- 38/81 "TIL EN HISTORIE TEORI OM NATURERKENDELSE, TEKNOLOGI OG SAMFUND".
Projekt rapport af: Erik Gade, Hans Hedal, Henrik Lau og Finn Physant.
Vejledere: Stig Andur Pedersen, Helge Kragh og Ib Thiersen.
Nr. 38 er p.t. udgået.
- 39/81 "TIL KRITIKKEN AF VÆKSTØKONOMIEN".
Af: Jens Højgaard Jensen.
- 40/81 "TELEKOMMUNIKATION I DANMARK - oplæg til en teknologivurdering".
Projekt rapport af: Arne Jørgensen, Bruno Petersen og Jan Vedde.
Vejleder: Per Nørgaard.
- 41/81 "PLANNING AND POLICY CONSIDERATIONS RELATED TO THE INTRODUCTION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES INTO ENERGY SUPPLY SYSTEMS".
ENERGY SERIES NO. 3.
Af: Bent Sørensen.
- 42/81 "VIDENSKAB TEORI SAMFUND - En introduktion til materialistiske videnskabsopfattelser".
Af: Helge Kragh og Stig Andur Pedersen.
- 43/81 1. "COMPARATIVE RISK ASSESSMENT OF TOTAL ENERGY SYSTEMS".
2. "ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF DECENTRALIZATION".
ENERGY SERIES NO. 4.
Af: Bent Sørensen.
- 44/81 "HISTORISKE UNDERSØGELSER AF DE EKSPERIMENTELLE FORUDSÆTNINGER FOR RUTHERFORDS ATOMMODEL".
Projekt rapport af: Niels Thor Nielsen.
Vejleder: Bent C. Jørgensen.
-
- 45/82 Er aldrig udkommet.
- 46/82 "EKSEMPLARISK UNDERVISNING OG FYSISK ERKENDELSE-1+11 ILLUSTRERET VED TO EKSEMPLER".
Projekt rapport af: Torben O. Olsen, Lasse Rasmussen og Niels Dreyer Sørensen.
Vejleder: Bent C. Jørgensen.
- 47/82 "BARSEBÄCK OG DET VÆRST OFFICIELT-TÆNKELIGE UHELD".
ENERGY SERIES NO. 5.
Af: Bent Sørensen.
- 48/82 "EN UNDERSØGELSE AF MATEMATIKUNDERVISNINGEN PÅ ADGANGSKURSUS TIL KØBENHAVNS TEKNIKUM".
Projekt rapport af: Lis Ellertzen, Jørgen Karrebæk, Troels Lange, Preben Nørregaard, Lissi Pedersen, Laust Rishøj, Lill Røn og Isac Showiki.
Vejleder: Mogens Niss.
- 49/82 "ANALYSE AF MULTISPEKTRALE SATELLITBILLEDER".
Projekt rapport af: Preben Nørregaard.
Vejledere: Jørgen Larsen og Rasmus Ole Rasmussen.
- 50/82 "HERSLEV - MULIGHEDER FOR VEDVARENDE ENERGI I EN LANDSBY".
ENERGY SERIES NO. 6.
Rapport af: Bent Christensen, Bent Hove Jensen, Dennis B. Møller, Bjarne Laursen, Bjarne Lillethorup og Jacob Mørch Pedersen.
Vejleder: Bent Sørensen.
- 51/82 "HVAD KAN DER GØRES FOR AT AFHJÆLPE PICERS BLOKERING OVERFOR MATEMATIK?".
Projekt rapport af: Lis Ellertzen, Lissi Pedersen, Lill Røn og Susanne Stender.
- 52/82 "DESUSPENSION OF SPLITTING ELLIPTIC SYMBOLS".
Af: Bernhelm Booss og Krzysztof Wojciechowski.
- 53/82 "THE CONSTITUTION OF SUBJECTS IN ENGINEERING EDUCATION".
Af: Arne Jacobsen og Stig Andur Pedersen.
- 54/82 "FUTURES RESEARCH" - A Philosophical Analysis of Its Subject-Matter and Methods.
Af: Stig Andur Pedersen og Johannes Witt-Hansen.
- 55/82 "MATEMATISKE MODELLER" - Litteratur på Roskilde Universitetsbibliotek.
En biografi.
Af: Else Høytrup.
- Vedr. tekst nr. 55/82 se også tekst nr. 62/83.
- 56/82 "EN - TO - MANGE" -
En undersøgelse af matematisk økologi.
Projekt rapport af: Troels Lange.
Vejleder: Anders Madsen.
-
- 57/83 "ASPECT EKSPERIMENTET"-
Skjulte variable i kvantemekanikken?
Projekt rapport af: Tom Juul Andersen.
Vejleder: Peder Voetmann Christiansen.
Nr. 57 er udgået.
- 58/83 "MATEMATISKE VANDRINGER" - Modelbetragtninger over spredning af dyr mellem småbiotoper i agerlandet.
Projekt rapport af: Per Hammershøj Jensen og Lene Vagn Rasmussen.
Vejleder: Jørgen Larsen.
- 59/83 "THE METHODOLOGY OF ENERGY PLANNING".
ENERGY SERIES NO. 7.
Af: Bent Sørensen.
- 60/83 "MATEMATISK MODEKSPERTISE"- et eksempel.
Projekt rapport af: Erik O. Gade, Jørgen Karrebæk og Preben Nørregaard.
Vejleder: Anders Madsen.
- 61/83 "FYSIKS IDEOLOGISKE FUNKTION, SOM ET EKSEMPEL PÅ EN NATURVIDENSKAB - HISTORISK SET".
Projekt rapport af: Annette Post Nielsen.
Vejledere: Jens Høytrup, Jens Højgaard Jensen og Jørgen Vogelius.
- 62/83 "MATEMATISKE MODELLER" - Litteratur på Roskilde Universitetsbibliotek.
En biografi 2. rev. udgave.
Af: Else Høytrup.
- 63/83 "CREATING ENERGY FUTURES: A SHORT GUIDE TO ENERGY PLANNING".
ENERGY SERIES NO. 8.
Af: David Crossley og Bent Sørensen.
- 64/83 "VON MATEMATIK UND KRIEG".
Af: Bernhelm Booss og Jens Høytrup.
- 65/83 "ANVENDT MATEMATIK - TEORI ELLER PRAKSIS".
Projekt rapport af: Per Hedegård Andersen, Kirsten Habekost, Carsten Holst-Jensen, Annelise von Moos, Else Marie Pedersen og Erling Møller Pedersen.
Vejledere: Bernhelm Booss og Klaus Grünbaum.
- 66/83 "MATEMATISKE MODELLER FOR PERIODISK SELEKTION I ESCHERICHIA COLI".
Projekt rapport af: Hanne Lisbet Andersen, Ole Richard Jensen og Klavs Frisdahl.
Vejledere: Jørgen Larsen og Anders Hede Madsen.
- 67/83 "ELEPSOIDE METODEN - EN NY METODE TIL LINEAR PROGRAMMERING?".
Projekt rapport af: Lone Billmann og Lars Boye.
Vejleder: Mogens Brun Høefelt.
- 68/83 "STOKASTISKE MODELLER I POPULATIONSGENETIK" - til kritikken af teoriladede modeller.
Projekt rapport af: Lise Odgård Gade, Susanne Hansen, Michael Hviid og Frank Mølgård Olsen.
Vejleder: Jørgen Larsen.

- 69/83 "ELEVFORUDSÆTNINGER I FYSIK"
- en test i l.g med kommentarer.
Af: Albert C. Paulsen.
- 70/83 "INDLÆRINGS - OG FORMIDLINGSPROBLEMER I MATEMATIK PÅ VOKSENUNDERVISNINGSNIVEAU".
Projektrapport af: Hanne Lisbet Andersen, Torben J. Andreasen, Svend Åge Houmann, Helle Glerup Jensen, Keld Fl. Nielsen, Lene Vagn Rasmussen.
Vejleder: Klaus Grünbaum og Anders Hede Madsen.
- 71/83 "PIGER OG FYSIK"
- et problem og en udfordring for skolen?
Af: Karin Beyer, Sussanne Blegaa, Birthe Olsen, Jette Reich og Mette Vedelsby.
- 72/83 "VERDEN IFØLGE PEIRCE" - to metafysiske essays, om og af C.S Peirce.
Af: Peder Voetmann Christiansen.
- 73/83 ""EN ENERGIANALYSE AF LANDBRUG"
- økologisk contra traditionelt.
ENERGY SERIES NO. 9
Specialeopgave i fysik af: Bent Hove Jensen.
Vejleder: Bent Sørensen.
-
- 74/84 "MINIATURISERING AF MIKROELEKTRONIK" - om videnskabeliggjort teknologi og nytten af at lære fysik.
Projektrapport af: Bodil Harder og Linda Szkotak Jensen.
Vejledere: Jens Højgaard Jensen og Bent C. Jørgensen.
- 75/84 "MATEMATIKUNDERVISNINGEN I FREMTIDENS GYMNASIUM"
- Case: Lineær programmering.
Projektrapport af: Morten Blomhøj, Klavs Frisdahl og Frank Mølgaard Olsen.
Vejledere: Mogens Brun Heefelt og Jens Bjørneboe.
- 76/84 "KERNEKRAFT I DANMARK?" - Et høringssvar indkaldt af miljøministeriet, med kritik af miljøstyrelsens rapporter af 15. marts 1984.
ENERGY SERIES No. 10
Af: Niels Boye Olsen og Bent Sørensen.
- 77/84 "POLITISKE INDEKS - FUP ELLER FAKTA?"
Opinionsundersøgelser belyst ved statistiske modeller.
Projektrapport af: Svend Åge Houmann, Keld Nielsen og Susanne Stender.
Vejledere: Jørgen Larsen og Jens Bjørneboe.
- 78/84 "JÆVNSTRØMSLEDNINGSEVNE OG GITTERSTRUKTUR I AMORFT GERMANIUM".
Specialrapport af: Hans Hedal, Frank C. Løvkvigen og Finn C. Physant.
Vejleder: Niels Boye Olsen.
- 79/84 "MATEMATIK OG ALMENDANNELSE".
Projektrapport af: Henrik Coster, Mikael Wennerberg Johansen, Povl Kattler, Birgitte Lydholm og Morten Overgaard Nielsen.
Vejleder: Bernhelm Booss.
- 80/84 "KURSUSMATERIALE TIL MATEMATIK B".
Af: Mogens Brun Heefelt.
- 81/84 "FREKVENSafhængig ledningsevne i amorft germanium".
Specialrapport af: Jørgen Wind Petersen og Jan Christensen.
Vejleder: Niels Boye Olsen.
- 82/84 "MATEMATIK - OG FYSIKUNDERVISNINGEN I DET AUTOMATISEREDE SAMFUND".
Rapport fra et seminar afholdt i Hvidovre 25-27. april 1983.
Red.: Jens Højgaard Jensen, Bent C. Jørgensen og Mogens Niss.
- 83/84 "ON THE QUANTIFICATION OF SECURITY":
PEACE RESEARCH SERIES NO. 1
Af: Bent Sørensen
nr. 83 er p.t. udgået
- 84/84 "NOGLE ARTIKLER OM MATEMATIK, FYSIK OG ALMENDANNELSE".
Af: Jens Højgaard Jensen, Mogens Niss m. fl.
- 85/84 "CENTRIFUGALREGULATORER OG MATEMATIK".
Specialrapport af: Per Hødegård Andersen, Carsten Holst-Jensen, Else Marie Pedersen og Erling Møller Pedersen.
Vejleder: Stig Andur Pedersen.
- 86/84 "SECURITY IMPLICATIONS OF ALTERNATIVE DEFENSE OPTIONS FOR WESTERN EUROPE".
PEACE RESEARCH SERIES NO. 2
Af: Bent Sørensen.
- 87/84 "A SIMPLE MODEL OF AC HOPPING CONDUCTIVITY IN DISORDERED SOLIDS".
Af: Jeppe C. Dyre.
- 88/84 "RISE, FALL AND RESURRECTION OF INFINITESIMALS".
Af: Detlef Laugwitz.
- 89/84 "FJERNVARMEOPTIMERING".
Af: Bjarne Lillethorup og Jacob Mørch Pedersen.
- 90/84 "ENERGI I L.G - EN TEORI FOR TILRETTELÆGGELSE".
Af: Albert Chr. Paulsen.
-
- 91/85 "KVANTETEORI FOR GYMNASIET".
1. Lærervejledning
Projektrapport af: Biger Lundgren, Henning Sten Hansen og John Johansson.
Vejleder: Torsten Meyer.
- 92/85 "KVANTETEORI FOR GYMNASIET".
2. Materiale
Projektrapport af: Biger Lundgren, Henning Sten Hansen og John Johansson.
Vejleder: Torsten Meyer.
- 93/85 "THE SEMIOTICS OF QUANTUM - NON - LOCALITY".
Af: Peder Voetmann Christiansen.
- 94/85 "TREENIGHEDEN BOURBAKI - generalen, matematikeren og ånden".
Projektrapport af: Morten Blomhøj, Klavs Frisdahl og Frank M. Olsen.
Vejleder: Mogens Niss.
- 95/85 "AN ALTERNATIV DEFENSE PLAN FOR WESTERN EUROPE".
PEACE RESEARCH SERIES NO. 3
Af: Bent Sørensen
- 96/85 "ASPEKTER VED KRAFTVARMEFORSYNING".
Af: Bjarne Lillethorup.
Vejleder: Bent Sørensen.
- 97/85 "ON THE PHYSICS OF A.C. HOPPING CONDUCTIVITY".
Af: Jeppe C. Dyre.
- 98/85 "VALGMULIGHEDER I INFORMATIONSDEREN".
Af: Bent Sørensen.
- 99/85 "Der er langt fra Q til R".
Projektrapport af: Niels Jørgensen og Mikael Klintorp.
Vejleder: Stig Andur Pedersen.
- 100/85 "TALSISTEMETS OPBYGNING".
Af: Mogens Niss.
- 101/85 "EXTENDED MOMENTUM THEORY FOR WINDMILLS IN PERTURBATIVE FORM".
Af: Ganesh Sengupta.
- 102/85 OPSTILLING OG ANALYSE AF MATEMATISKE MODELLER, BELYST VED MODELLER OVER KØERS FODEROPTAGELSE OG - OMSETNING".
Projektrapport af: Lis Eilertzen, Kirsten Habekost, Lill Røn og Susanne Stender.
Vejleder: Klaus Grünbaum.

- 103/85 "ØDSLE KOLDKRIGERE OG VIDENSKABENS LYSE IDEER".
 Projekt rapport af: Niels Ole Dam og Kurt Jensen.
 Vejleder: Bent Sørensen.
- 104/85 "ANALOGREGNEMASKINEN OG LORENZLIGNINGER".
 Af: Jens Jøger.
- 105/85 "THE FREQUENCY DEPENDENCE OF THE SPECIFIC HEAT OF THE GLASS TRANSITION".
 Af: Tage Christensen.
- "A SIMPLE MODEL OF AC HOPPING CONDUCTIVITY".
 Af: Jeppe C. Dyre.
 Contributions to the Third International Conference on the Structure of Non - Crystalline Materials held in Grenoble July 1985.
- 106/85 "QUANTUM THEORY OF EXTENDED PARTICLES".
 Af: Bent Sørensen.
- 107/85 "EN MYG GØR INGEN EPIDEMI".
 - flodblindhed som eksempel på matematisk modellering af et epidemiologisk problem.
 Projekt rapport af: Per Hedegård Andersen, Lars Boye, Carsten Holst Jensen, Else Marie Pedersen og Erling Møller Pedersen.
 Vejleder: Jesper Larsen.
- 108/85 "APPLICATIONS AND MODELLING IN THE MATHEMATICS CURRICULUM" - state and trends -
 Af: Mogens Niss.
- 109/85 "COX I STUDIEETIDEN" - Cox's regressionsmodel anvendt på studenteroplysninger fra RUC.
 Projekt rapport af: Mikael Wænerberg Johansen, Poul Kattler og Torben J. Andreassen.
 Vejleder: Jørgen Larsen.
- 110/85 "PLANNING FOR SECURITY".
 Af: Bent Sørensen
- 111/85 "JORDEN RUNDT PÅ FLADE KORT".
 Projekt rapport af: Birgit Andresen, Beatriz Quinones og Jimmy Staal.
 Vejleder: Mogens Niss.
- 112/85 "VIDENSKABELIGGØRELSE AF DANSK TEKNOLOGISK INNOVATION FRA 1950 - BELYST VED EKSEMPLER".
 Projekt rapport af: Erik Odgaard Gade, Hans Hedal, Frank C. Ludvigsen, Annette Post Nielsen og Finn Physant.
 Vejleder: Claus Bryld og Bent C. Jørgensen.
- 113/85 "DESUSPENSION OF SPLITTING ELLIPTIC SYMBOLS II".
 Af: Bernhard Booss og Krzysztof Wojciechowski.
- 114/85 "ANVENDELSE AF GRAFISKE METODER TIL ANALYSE AF KONTIGENTABELLER".
 Projekt rapport af: Lone Billmann, Ole R. Jensen og Arne-Lise von Moos.
 Vejleder: Jørgen Larsen.
- 115/85 "MATEMATIKKENS UDVIKLING OP TIL RENESSANCEN".
 Af: Mogens Niss.
- 116/85 "A PHENOMENOLOGICAL MODEL FOR THE MEYER-NELDEL RULE".
 Af: Jeppe C. Dyre.
- 117/85 "KRAFT & FJERNVARMEOPTIMERING".
 Af: Jacob Mørch Pedersen.
 Vejleder: Bent Sørensen
- 118/85 "TILFELDIGHEDEN OG NØDVENDIGHEDEN IFØLGE FEYNMAN OG FYSIKKEN".
 Af: Peder Voetmann Christiansen
- 120/86 "ET ANTAL STATISTISKE STANDARDMODELLER".
 Af: Jørgen Larsen
- 121/86 "SIMULATION I KONTINUERT TID".
 Af: Peder Voetmann Christiansen.
- 122/86 "ON THE MECHANISM OF GLASS IONIC CONDUCTIVITY".
 Af: Jeppe C. Dyre.
- 123/86 "GYMNASIEFYSIKKEN OG DEN STORE VERDEN".
 Fysiklærerforeningen, IMFUFA, RUC.
- 124/86 "OPGAVESAMLING I MATEMATIK".
 Samtlige opgaver stillet i tiden 1974-jan. 1986.
- 125/86 "UVBY, B - systemet - en effektiv fotometrisk spektral-klassifikation af B-, A- og F-stjerner".
 Projekt rapport af: Birger Lundgren.
- 126/86 "OM UDVIKLINGEN AF DEN SPECIELLE RELATIVITETSTEORI".
 Projekt rapport af: Lise Odgaard & Linda Szkotak Jensen
 Vejledere: Karin Beyer & Stig Andur Pedersen.
- 127/86 "GALOIS' BIDRAG TIL UDVIKLINGEN AF DEN ABSTRAKTE ALGEBRA".
 Projekt rapport af: Pernille Sand, Heine Larsen & Lars Frandsen.
 Vejleder: Mogens Niss.
- 128/86 "SMÅKRYB" - om ikke-standard analyse.
 Projekt rapport af: Niels Jørgensen & Mikael Klinton.
 Vejleder: Jeppe Dyre.
- 129/86 "PHYSICS IN SOCIETY"
 Lecture Notes 1983 (1986)
 Af: Bent Sørensen
- 130/86 "Studies in Wind Power"
 Af: Bent Sørensen
- 131/86 "FYSIK OG SAMFUND" - Et integreret fysik/historie-projekt om naturanskuelsens historiske udvikling og dens samfundsmæssige betingethed.
 Projekt rapport af: Jakob Heckscher, Søren Brønd, Andy Wierød.
 Vejledere: Jens Høyrup, Jørgen Vogelius, Jens Højgaard Jensen.
- 132/86 "FYSIK OG DANDELSE"
 Projekt rapport af: Søren Brønd, Andy Wierød.
 Vejledere: Karin Beyer, Jørgen Vogelius.
- 133/86 "CHERNOBYL ACCIDENT: ASSESSING THE DATA. ENERGY SERIES NO. 15.
 Af: Bent Sørensen.
-
- 134/87 "THE D.C. AND THE A.C. ELECTRICAL TRANSPORT IN AsSeTe SYSTEM"
 Authors: M.B.El-Den, N.B.Olsen, Ib Høst Pedersen, Petr Viscör
- 135/87 "INTUITIONISTISK MATEMATIKS METODER OG ERKENDELSESTEORETISKE FORUDSÆTNINGER"
 MATEMATIKSPECIALE: Claus Larsen
 Vejledere: Anton Jensen og Stig Andur Pedersen
- 136/87 "Mystisk og naturlig filosofi: En skitse af kristendommens første og andet møde med græsk filosofi"
 Projekt rapport af Frank Colding Ludvigsen
 Vejledere: Historie: Ib Thiersen
 Fysik: Jens Højgaard Jensen
- 137/87 "HOPMODELLER FOR ELEKTRISK LEDNING I UORDNEDE FASTE STOFFER" - Resume af licentiatforhandling
 Af: Jeppe Dyre
 Vejledere: Niels Boye Olsen og Peder Voetmann Christiansen.
- 119/86 "DET ER GANSKE VIST - - EUKLIDS FEMTE POSTULAT KUNNE NOK SKABE RØRE I ANDEDAMMEN".
 Af: Iben Maj Christiansen
 Vejleder: Mogens Niss.

- 138/87 "JOSEPHSON EFFECT AND CIRCLE MAP."
Paper presented at The International Workshop on Teaching Nonlinear Phenomena at Universities and Schools, "Chaos in Education". Balaton, Hungary, 26 April-2 May 1987.
By: Peder Voetmann Christiansen
- 139/87 "Machbarkeit nichtbeherrschbarer Technik durch Fortschritte in der Erkennbarkeit der Natur"
Af: Bernhelm Booss-Bavnbek
Martin Bohle-Carbonell
- 140/87 "ON THE TOPOLOGY OF SPACES OF HOLOMORPHIC MAPS"
By: Jens Gravesen
- 141/87 "RADIOMETERS UDVIKLING AF BLODGASAPPARATUR - ET TEKNOLOGIHISTORISK PROJEKT"
Projektrapport af Finn C. Physant
Vejleder: Ib Thiersen
- 142/87 "The Calderón Projektor for Operators With Splitting Elliptic Symbols"
by: Bernhelm Booss-Bavnbek og
Krzysztof P. Wojciechowski
- 143/87 "Kursusmateriale til Matematik på NAT-BAS"
af: Mogens Brun Heefelt
- 144/87 "Context and Non-Locality - A Peircan Approach .
Paper presented at the Symposium on the Foundations of Modern Physics The Copenhagen Interpretation 60 Years after the Como Lecture. Joensuu, Finland, 6 - 8 august 1987.
By: Peder Voetmann Christiansen
- 145/87 "AIMS AND SCOPE OF APPLICATIONS AND MODELLING IN MATHEMATICS CURRICULA"
Manuscript of a plenary lecture delivered at ICMTA 3, Kassel, FRG 8.-11.9.1987
By: Mogens Niss
- 146/87 "BESTEMMELSE AF BULKRESISTIVITETEN I SILICIUM"
- en ny frekvensbaseret målemetode.
Fysikspeciale af Jan Vedde
Vejledere: Niels Boye Olsen & Petr Višćor
- 147/87 "Rapport om BIS på NAT-BAS"
redigeret af: Mogens Brun Heefelt
- 148/87 "Naturvidenskabsundervisning med Samfundsperspektiv"
af: Peter Colding-Jørgensen DLH
Albert Chr. Paulsen
- 149/87 "In-Situ Measurements of the density of amorphous germanium prepared in ultra high vacuum"
by: Petr Višćor
- 150/87 "Structure and the Existence of the first sharp diffraction peak in amorphous germanium prepared in UHV and measured in-situ"
by: Petr Višćor
- 151/87 "DYNAMISK PROGRAMMERING"
Matematikprojekt af:
Birgit Andresen, Keld Nielsen og Jimmy Staal
Vejleder: Mogens Niss
- 152/87 "PSEUDO-DIFFERENTIAL PROJECTIONS AND THE TOPOLOGY OF CERTAIN SPACES OF ELLIPTIC BOUNDARY VALUE PROBLEMS"
by: Bernhelm Booss-Bavnbek
Krzysztof P. Wojciechowski
- 153/88 "HALVLEDERTEKNOLOGIENS UDVIKLING MELLEM MILITÆRE OG CIVILE KRÆFTER"
Et eksempel på humanistisk teknologihistorie
Historiespeciale
Af: Hans Medal
Vejleder: Ib Thiersen
- 154/88 "MASTER EQUATION APPROACH TO VISCOUS LIQUIDS AND THE GLASS TRANSITION"
By: Jeppe Dyre
- 155/88 "A NOTE ON THE ACTION OF THE POISSON SOLUTION OPERATOR TO THE DIRICHLET PROBLEM FOR A FORMALLY SELFADJOINT DIFFERENTIAL OPERATOR"
by: Michael Pedersen
- 156/88 "THE RANDOM FREE ENERGY BARRIER MODEL FOR AC CONDUCTION IN DISORDERED SOLIDS"
by: Jeppe C. Dyre
- 157/88 " STABILIZATION OF PARTIAL DIFFERENTIAL EQUATIONS BY FINITE DIMENSIONAL BOUNDARY FEEDBACK CONTROL: A pseudo-differential approach."
by: Michael Pedersen
- 158/88 "UNIFIED FORMALISM FOR EXCESS CURRENT NOISE IN RANDOM WALK MODELS"
by: Jeppe Dyre
- 159/88 "STUDIES IN SOLAR ENERGY"
by: Bent Sørensen
- 160/88 "LOOP GROUPS AND INSTANTONS IN DIMENSION TWO"
by: Jens Gravesen
- 161/88 "PSEUDO-DIFFERENTIAL PERTURBATIONS AND STABILIZATION OF DISTRIBUTED PARAMETER SYSTEMS: Dirichlet feedback control problems"
by: Michael Pedersen
- 162/88 "PIGER & FYSIK - OG MEGET MERE"
AF: Karin Beyer, Sussanne Blegaa, Birthe Olsen,
Jette Reich , Mette Vedelsby
- 163/88 "EN MATEMATISK MODEL TIL BESTEMMELSE AF PERMEABILITETEN FOR BLOD-NETHINDE-BARRIEREN"
Af: Finn Langberg, Michael Jarden, Lars Frellesen
Vejleder: Jesper Larsen
- 164/88 "Vurdering af matematisk teknologi
Technology Assessment
Technikfolgenabschätzung"
Af: Bernhelm Booss-Bavnbek, Glen Pate med
Martin Bohle-Carbonell og Jens Højgaard Jensen
- 165/88 "COMPLEX STRUCTURES IN THE NASH-MOSER CATEGORY"
by: Jens Gravesen

- 166/88 "Grundbegreber i Sandsynlighedsregningen"
Af: Jørgen Larsen
- 167a/88 "BASISSTATISTIK 1. Diskrete modeller"
Af: Jørgen Larsen
- 167b/88 "BASISSTATISTIK 2. Kontinuerte modeller"
Af: Jørgen Larsen
- 168/88 "OVERFLADEN AF PLANETEN MARS"
Laboratorie-simulering og MARS-analoger undersøgt ved Mossbauerspektroskopi.
Fysikspeciale af:
Birger Lundgren
Vejleder: Jens Martin Knudsen
Fys.Lab./HCØ
- 169/88 "CHARLES S. PEIRCE: MURSTEN OG MØRTEL TIL EN METAFYSIK."
Fem artikler fra tidsskriftet "The Monist" 1891-93.
Introduktion og oversættelse:
Peder Voetmann Christiansen
- 170/88 "OPGAVESAMLING I MATEMATIK"
Samtlige opgaver stillet i tiden 1974 - juni 1988
- 171/88 "The Dirac Equation with Light-Cone Data"
af: Johnny Tom Ottesen
- 172/88 "FYSIK OG VIRKELIGHED"
Kvantemekanikkens grundlagsproblem i gymnasiet.
Fysikprojekt af:
Erik Lund og Kurt Jensen
Vejledere: Albert Chr. Paulsen og Peder Voetmann Christiansen
-
- 173/89 "NUMERISKE ALGORITMER"
af: Mogens Brun Heefelt
- 174/89 "GRAFISK FREMSTILLING AF FRAKTALER OG KAOS"
af: Peder Voetmann Christiansen
- 175/89 "AN ELEMENTARY ANALYSIS OF THE TIME DEPENDENT SPECTRUM OF THE NON-STATIONARY SOLUTION TO THE OPERATOR RICCATI EQUATION"
af: Michael Pedersen
- 176/89 "A MAXIMUM ENTROPY ANSATZ FOR NONLINEAR RESPONSE THEORY"
af: Jeppe Dyre
- 177/89 "HVAD SKAL ADAM STÅ MODEL TIL"
af: Morten Andersen, Ulla Engström, Thomas Gravesen, Nanna Lund, Pia Madsen, Dina Rawat, Peter Torstensen
Vejleder: Mogens Brun Heefelt
- 178/89 "BIOSYNTESEN AF PENICILLIN - en matematisk model"
af: Ulla Eghave Rasmussen, Hans Oxvang Mortensen, Michael Jarden
vejleder i matematik: Jesper Larsen
biologi: Erling Lauridsen
- 179a/89 "LÆRERVEJLEDNING M.M. til et eksperimentelt forløb om kaos"
af: Andy Wierød, Søren Brønd og Jimmy Staal
Vejledere: Peder Voetmann Christiansen
Karin Beyer
- 179b/89 "ELEVHEFTE: Noter til et eksperimentelt kursus om kaos"
af: Andy Wierød, Søren Brønd og Jimmy Staal
Vejledere: Peder Voetmann Christiansen
Karin Beyer
- 180/89 "KAOS I FYSISKE SYSTEMER eksemplificeret ved torsions- og dobbeltpendul".
af: Andy Wierød, Søren Brønd og Jimmy Staal
- 181/89 "A ZERO-PARAMETER CONSTITUTIVE RELATION FOR PURE SHEAR VISCOELASTICITY"
by: Jeppe Dyre
- 183/89 "MATHEMATICAL PROBLEM SOLVING, MODELLING. APPLICATIONS AND LINKS TO OTHER SUBJECTS - State. trends and issues in mathematics instruction
by: WERNER BLUM, Kassel (FRG) og
MOGENS NISS, Roskilde (Denmark)
- 184/89 "En metode til bestemmelse af den frekvensafhængige varmfylde af en underafkølet væske ved glasovergangen"
af: Tage Emil Christensen
-
- 185/90 "EN NÆSTEN PERIODISK HISTORIE"
Et matematisk projekt
af: Steen Grode og Thomas Jessen
Vejleder: Jacob Jacobsen
- 186/90 "RITUAL OG RATIONALITET i videnskabers udvikling"
redigeret af Arne Jakobsen og Stig Andur Pedersen
- 187/90 "RSA - et kryptisk system"
af: Annetette Sofie Olufsen, Lars Frellesen og Ole Møller Nielsen
Vejledere: Michael Pedersen og Finn Munk
- 188/90 "FERMICONDENSATION - AN ALMOST IDEAL GLASS TRANSITION"
by: Jeppe Dyre
- 189/90 "DATAMATER I MATEMATIKUNDERVISNINGEN PÅ GYMNASIET OG HØJERE LÆREANSTALTER
af: Finn Langberg

190/90 "FIVE REQUIREMENTS FOR AN
APPROXIMATE NONLINEAR RESPONSE
THEORY"

by: Jeppe Dyre

191/90 "MOORE COHOMOLOGY, PRINCIPAL
BUNDLES. AND ACTIONS OF GROUPS
ON C*-ALGEBRAS"

by: Iain Raeburn and Dana P. Williams

192/90 "Age-dependent host mortality in the
dynamics of endemic infectious diseases
and
SIR-models of the epidemiology and natural
selection of co-circulating influenza virus
with partial cross-immunity"

by: Viggo Andreasen

193/90 "Causal and Diagnostic Reasoning"

by: Stig Andur Pedersen

195/90 "STADIER PÅ PARADIGMETS VEJ"

Et projekt om den videnskabelige udvikling
der førte til dannelsen af kvantemekanikken.

Projektrapport for 1. modul på fysikuddan-
nelsen, skrevet af:

Anja Boisen, Thomas Hougård, Anders Gorm
Larsen, Nicolai Ryge.

Vejleder: Peder Voetmann Christiansen

196/90 "ER KAOS NØDVENDIGT?"

- en projektrapport om kaos' paradigmatisk
status i fysikken.

af: Johannes K. Nielsen, Jimmy Staal og
Peter Bøggild

Vejleder: Peder Voetmann Christiansen