



Atomfysik og virkelighed

Statens Filmcentral

ATOMFYSIK OG VIRKELIGHED

16 mm farve, 40 min, Danmark 1985

Instruktion og manuskript:
Lars Becker-Larsen

Konsulenter:
Tom Juul Andersen
Peder Voetmann Christiansen
Erland Brun Hansen

Fotograf:
Anders Lykkeboe
Fotograf ass.:
Ole Ellesøe

Lyd:
Svend Erik Holst Jensen

Musik:
Anders Koppel

Animation og ikonografi:
Jakob Koch

Klip:
Jens Bidstrup

Indtaling:
Torben Hundahl

Fotografier:
American Institute of Physics
Niels Bohr Institutttet
Det Kongelige Bibliotek

Fotoarbejde:
Flemming Gedsted Rasmussen

Medvirkende i filmen:
Alain Aspect, Institut d'Optique Paris
John S. Bell, CERN Geneve
Abner Shimony, Boston University
Holger Bech Nielsen, Niels Bohr Institutttet
David Bohm, University of London
John A. Wheeler, University of Texas
at Austin

Produceret af Jørlunde Film
med støtte fra:

Det Danske Filmværksted
Statens Filmcentral
Danmarks Radio/TVK

© Jørlunde Film 1985

Udlejning:
Statens Filmcentral

Redaktion af folder: Lars Becker-Larsen
Lay out: Kjeld Brandt
Trykt hos Frede Rasmussen, København
Udgivet af SFC, 1986

Denne pjece, der er udgivet af Statens
Filmcentral, udleveres gratis i forbindelse
med forevisning af filmen. Henvendelse til
Statens Filmcentral, Vestergade 27, 1456
København K. eller Jyllandskontoret,
Lundingsgade 33, 8000 Århus C.

*Forsidebillede: Niels Bohr og Albert Einstein,
fotograferet 1930 af Paul Ehrenfest.
(American Institute of Physics).*

*Billede overfor: Forside af særnummer af det franske
tidsskrift »Sciences et Avenir«, 1984.*

Indhold

Fysikkens forbløffende forvandling Side 4
– kvantefysikken: bruddet med den
naturvidenskabelige tradition
af Tor Nørretranders

Aspects eksperimenter Side 15
– hvad er det, som er så svært at forstå?
af Peder Voetmann Christiansen





Om filmen:

»Atomfysik og virkelighed« handler om de filosofiske diskussioner, som udsprang af fysikkens udvikling i dette århundredes begyndelse. Den moderne atomfysik – kvantemekanikken – stillede fysikerne over for forhold, som ikke lod sig forene med det hidtidige fysiske verdensbillede.

I kvantefysikken syntes en objektiv iagttagelsessituation ikke mulig. Man kunne ikke forstå, at lys og stof kan opfattes *både* som partikler og bølger. Det var spørgsmål, som mindede fysikerne om tilsvarende problemstillinger inden for østens filosofi.

Niels Bohr og Albert Einstein var de kendteste debatorer i de lidenskabelige diskussioner, som stod igennem 1920'erne. Filosofisk var de meget forskellige: hvor Bohrs Københavnerskole mente, at man må afstå fra et egentligt billede af den atomare verden, fastholdt Einstein troen på at man kan nå en fuldstændig forståelse af naturens orden.

Den sidste runde af deres diskussioner var en artikel i *Physical Review* i 1935, hvor Einstein sammen med kol-

legerne Podolsky og Rosen udfordrede Niels Bohr. I den berømte EPR-artikel demonstrerede Einstein med et tanke-eksperiment nogle paradoksale følger af Bohrs atomfysik: selv over store afstande er atompartikler forbundet med hinanden. Det kunne ikke passe, mente Einstein, men han og Bohr nåede aldrig til en afklaring af problemet.

I 1964 skete der imidlertid en overraskende udvikling med et teoretisk arbejde af CERN-fysikeren John Bell. Det skulle gøre det muligt for den franske fysiker Alain Aspect i 1982 at gennemføre Einstein, Podolsky og Rosen's eksperiment. Mange fysikere havde indtil da betragtet hele problemet som et spørgsmål om filosofisk smag.

I filmen fremlægger en række fysikere deres syn på de filosofiske følger af Alain Aspects eksperiment. For fysikeren David Bohm betyder det i sin fulde konsekvens, at universet på atomart plan må betragtes som en samlet helhed, hvor alt selv over store afstande er forbundet. Niels Bohrs elev, amerikaneren John Wheeler fremhæver kvantefysikkens revolutionerende lære om vilkårene for vores iagttagelse.

Diskussionen mellem Einstein og Bohr forvandlede med Aspects eksperiment fra filosofisk strid til praktisk virkelighed, og forenede dermed på ejendommelig vis naturvidenskab og filosofi.

Lars Becker-Larsen

*Bohr og Einstein ved Solvay-kongres i Belgien, 1933.
(American Institute of Physics).*

Fysikkens forbløffende forvandling

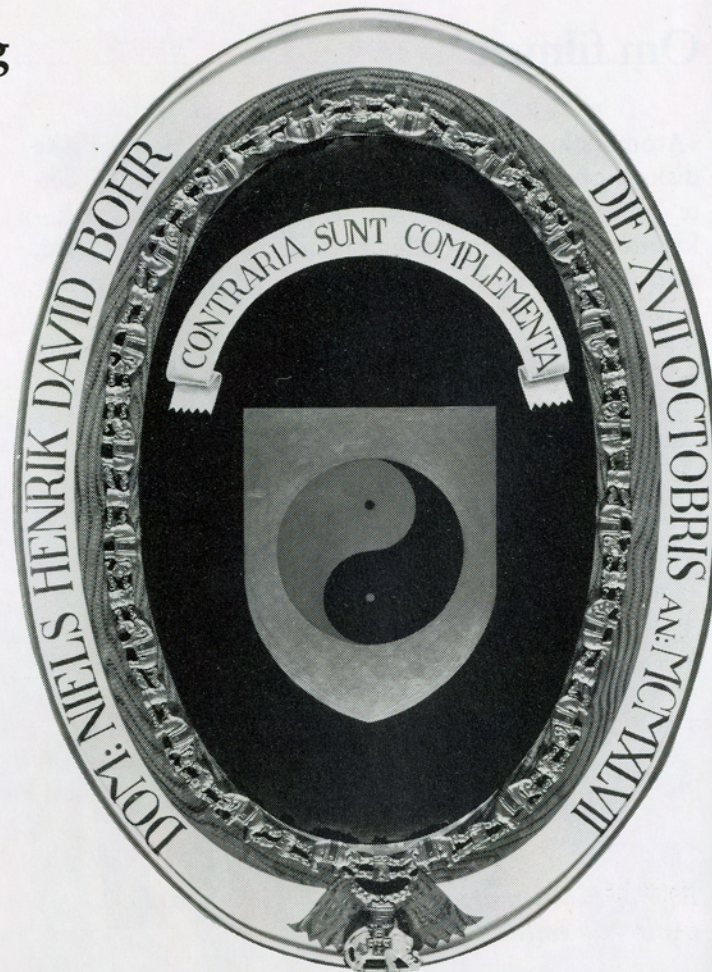
Kvantefysikken: bruddet med den naturvidenskabelige tradition

Af Tor Nørretranders

Kvantefysikken blev et chok for de fysikere, der udviklede den. Et chok, fordi det var en overraskende teori for fysikerne. Et chok, fordi fysikerne i forvirring måtte forlade mange af de grundbegreber, de var vant til at bruge, når der skulle gives en videnskabelig beskrivelse af naturen.

Denne historiske kendsgerning, at kvantefysikken var noget af en personlig prøvelse for dens skabere, fremgår ikke ret ofte af lærebøger i fysik – hverken i folkeskolen, gymnasiet eller på universitetet.

Det er en skam. Men ikke noget tilfælde. I det halve århundrede, hvor kvantefysikken har udgjort en af grundpillerne i det fysiske verdensbillede, har diskussionen om, hvad denne grundpille egentlig bestod af, været meget afdæmpet. De dramatiske filosofiske diskussioner om den nye fysik, der prægede billedet i 1920'erne og 30'erne, blev glemt, og en hel generation af fysikere voksede op, uden at få et nøje kendskab til de chok, deres læremestre havde gennemgået.



Man kan give mange forklaringer på dette historiske forhold, men vi kan her hæfte os ved den høfligste: fysikernes opgave er nu engang at lave fysik, ikke at diskutere filosofi. Og lige som kvantefysikken efterlod sig meget dybe filosofiske spørgsmål, åbnede den for helt nye og lovende horisonter for fysikken, som fysikerne siden har været ivrigt optaget af at udforske.

Offentlig interesse

I de senere år er kvantefysikken og dens filosofi igen ved at komme i fokus. Det er sket både i den brede offentlighed og i den videnskabelige verden. Det internationale bogmarked bugner af populære introduktioner til kvantefysik, ofte præget af store filosofiske armsving.

Den mest berømte af de bøger, der har skabt en offentlig interesse for kvantefysikken, hedder »Fysikkens Tao« og er skrevet af den østrigsk-amerikanske fysiker Fritjof Capra. Denne bogs budskab er, at den moderne fysik ser helt anderledes ud, end det billede af verden, de fleste af os lærer i skolen. Og helt specielt helt anderledes, end det billede af verden, vi lærer i fysiktimerne. Det moderne fysiske verdensbillede, siger Capra, beskriver en

Modsætningerne er komplementære – Niels Bohrs våbenskjold på Frederiksborg Slot, Hillerød. (Lennart Larsen, Frederiksborg museet).

verden, der ikke befinder sig »derude«, uafhængigt af os, men snarere står i stadig vekselvirkning med os. Universet er ikke en kold og fjern maskine, men en sammenhængende organisme, hvorfra vi udgør en del.

Dette vigtige budskab, som Capra beskriver på en meget smuk og læseværdig måde, fører ham så til det andet af hans budskaber, som straks er mere tvivlsomt, men har stor appel til publikum. Capra mener, at dette moderne fysiske verdensbillede minder meget stærkt om det verdensbillede, der i årtusinder har præget filosofi og mystisk tænkning i lande som Kina, Indien og Japan. Den vestlige fysik er begyndt at minde om den østlige mystik, siger han.

Dette budskab har bred appel, fordi akkurat de østlige filosofier og religioner fik et voldsomt gennembrud i hele den vestlige verden på samme tidspunkt, som Capras bog første gang udkom, midt i halvfjerdsene. Følelsen af, at den vestlige kultur og civilisation, midt i al den materielle velstand, havde mistet grebet om tilværelsens mest fundamentale værdier, fik mange til at vende sig mod østlig livsvisdom. Og hvad var da mere behændigt, end at denne visdom kunne siges at ligne den vestlige fysiks mest moderne udgave?

De fleste fysikere bryder sig meget lidt om Capras bog. De bryder sig ikke om, at deres videnskab bliver brugt som argument for religiøse livsanskuelser. Tilsvarende er der mange kyndige udøvere af østlig visdom, der me-

get har sig frabedt, at man vil til at bruge fysikken som bevis for deres anskuelser.

Ret beset er da også Capras sammenligning mellem øst og vest temmelig tvivlsom. Han bruger i bogen primært den metode, at han sammenligner korte citater skrevet af store fysikere i vest og store mystikere i øst. Når så teksterne har nogenlunde samme sproglige udformning, siger Capra, at der er tale om samme indsigt. Det er meget tvivlsomt, at det er tilfældet. Dels kan man diskutere, om der rent faktisk er overensstemmelse mellem citaterne, dels kan man spørge, om det overhovedet er det samme, de to traditioner taler om. Fordi både fysikere og mystikere taler om, at verden hænger sammen, behøver det ikke at være det samme, de taler om.

Men det er på den anden side også forkert blot og bart at afvise Capras pointe. For han har fat i en meget vigtig sag: dette århundredes fysik har bevæget sig meget langt bort fra den fysik, man har kendt fra de tidligere århundreder. Det verdensbillede, der er skabt med relativitetsteoriene og kvantemekanikken, er meget anderledes, end det verdensbillede, der blev skabt i Vesteuropa i Isaac Newtons dage.

Vi må derfor skelne mellem to spørgsmål: 1) Bevæger det 20. århundredes fysik sig *bort fra* den klassiske vestlige fysik? 2) Bevæger det 20. århundredes fysik sig *hen mod* den østlige mystik?

Det ville allerede være fremgået, at synspunktet i denne artikel er, at man må svare ja til det første spørgsmål, men næppe til det andet. Men det er vigtigt at fastholde, at meget af den offentlige interesse for kvantefysikken skyldes interessen for verdensbilleder, der bryder med det klassiske vestlige.

Det klassiske verdensbillede

Et helt afgørende træk ved det såkaldt klassiske naturvidenskabelige billede er, at det beskriver en *reversibel* verden. Ordet reversibel betegner processer, der kan vendes om, for eksempel i tid. De fysiske love beskriver processer, der lige så vel kunne forløbe den ene vej, som den anden. Man kunne optage en film af sådanne processer, afspille den baglæns – og den ville fortsat give mening.

De mekaniske love, der blev grundlagt af Galilei og Newton, udgør fundamentet for dette klassiske verdensbillede, som stort set er identisk med den fysik, man lærer i skolen og i gymnasiet. De mekaniske love beskriver for eksempel, hvad der sker, når man spiller billard. Kuglernes sammenstød med hinanden og banderne følger visse fysiske regler. Optog man en film af disse sammenstød, ville den fortsat give mening, hvis den blev afspillet baglæns – når lige bortses fra, at gnidningsmodstanden bringer kuglerne til standsning.

En sådan reversibel proces kendetegnes ved, at det, der er sket, kan gøres usket. Vender man påvirkningerne om, kunne man bringe systemet tilbage til dets begyndelsestilstand, uden at der er sket forandringer undervejs. Tilsvarende kan man altid beregne sig til, hvad der vil ske, når en bestemt påvirkning sætter ind. Og man kan regne baglæns i tid, for at finde ud af, hvordan systemet så ud, før en bestemt kraft virkede ind.

Billard-bordet er et godt billede på det klassiske naturvidenskabelige verdensbillede, som det blev udformet fra 1600-tallet og frem til dette århundrede. Der er adskilte kugler, der påvirkes af bestemte kræfter fra spillernes stød med køen. Der gælder klare love for, hvorledes kuglerne bevæger sig rundt.

Det pudsige er så, at dette reversible billede svarer meget dårligt til vores hverdag. Hvis man taber et ukogt æg på gulvet, går det i stykker. Optog man den scene på film, ville den tage sig underlig ud, hvis filmen blev spillet baglæns: Ingen kunne tænke sig, at det usteget spejlæg på gulvet trak sig sammen, foldede skallen fint om sig og bevægede sig op mod en hånd, der samlede sig om det.

Vi ved alle fra hverdagen, at verden bestemt ikke er reversibel. Når tiden går, sker der ting, der ikke kan gøres om igen.

Da fysikerne i sidste århundrede begyndte at få teoretisk styr på termodynamikken – varmelæren – blev det

klart, at mange forhold bestemt ikke kan beskrives som reversible. Tiden er en reel størrelse i den fysiske verden. Frem og tilbage er ikke lige langt i tiden.

Reversibiliteten er ellers meget vigtig for det klassiske naturvidenskabelige verdensbillede. For det er den, der gør, at verden kan ses som en klart forudsigelig maskine, der følger veldefinerede love, således at man kan regne sig til dens fortid og fremtid. Verden består af adskilte dele, der nok vekselvirker, men på en måde, man kan redegøre for – og endda gøre om, blot ved at vende forløbet om, så man går tilbage i tiden.

Det besynderlige kvant

Men med kvantefysikken kom det for alvor til et opgør med billedet af verden som reversibel. Årsagen var det besynderlige *kvant*, som den tyske fysiker Max Planck så sig nødsaget til at indføre i 1900-tallet.

Kvantet er en sær størrelse. Det udtrykker den mindste *virkning*, der kan forekomme i verden, altså det mindste, der kan ske.

Der er altså en nedre grænse for, hvor små vekselvirkninger, der kan ske i verden. Det er interessant af mange grunde, men mest af alle af én grund, der har at gøre med beskrivelsen af den fysiske verden. Når et eller andet fysisk system skal iagttages, må man nødvendigvis ud-

veksle information med systemet. Det betyder igen, at man må udveksle energi med dette system.

I det daglige udgør dette ikke noget problem, fordi Solen skinner. Hverdagens genstande er badet i store mængder energi fra Solens lys. Dette lys kastes tilbage fra genstandene og giver os information om dem, når lyset kommer ind i vore øjne eller sværter en fotografisk film.

Der er i dagligverdenen et overskud af energi, der igen rummer en voldsom mængde information, som vi kan bruge løs af, uden at det gør nogen forskel for det, vi kigger på.

Men sådan er det ikke i den atomare verden, kvantefysikken beskriver. Her er de genstande, der er tale om, så små, at man ikke skal vekselvirke ret meget med dem for at forstyrre dem. Faktisk skal man vekselvirke så lidt med dem, hvis man vil undgå at forstyrre dem, at denne vekselvirkning bliver mindre end den mindst mulige vekselvirkning, der kan forekomme i verden. Eksistensen af kvantet som den nedre grænse for vekselvirkninger betyder, at man ikke kan iagttage meget små ting – som atomernes dele – uden at forstyrre dem.

Det betyder igen, at når man har iagttaget et eller andet atomart fænomen, er det forandret på en afgørende vis. Hvor vi er vant til, at man kan aflure hverdagsfænomener, uden at det ændrer på andet end vores egen opfattelse, må vi i atomernes verden indse, at enhver iagttagelse

Fysikerne samlet på Solvay-kongressen i Bruxelles, 1930 for at diskutere læren af den nye fysik.

Stående fra venstre:

E. Henriot, J. Verschaffelt, Manneback, A. Cotton, J. Errera, O. Stern, A. Piccard, W. Gerlach, C. Darwin, P.A. Dirac, H. Bauer, P. Kapitza, L. Brillouin, H.A. Kramers, P. Debye, W. Pauli, J. Dorfman, J.H. van Vleck, E. Fermi, W. Heisenberg.

Siddende fra venstre:

Th. de Donder, P. Zeeman, P. Weiss, A. Sommerfeld, Madame Curie, P. Langevin, A. Einstein, O. Richardson, B. Cabrera, N. Bohr, W.J. de Haas. (Niels Bohr Institutet).

medfører en forandring af irreversibel art. Når vi iagttager tingene, forandres de irreversibelt.

Dette forhold var overraskende, fordi det ikke længere tillod fysikerne at tænke på den verden, de beskrev, som en verden »derude« på den anden side af en glastrude, men tvang dem til at indse, at mennesket er en del af den verden, det beskriver.

Men det er vigtigt at fastslå, at denne vekselvirkning mellem iagttageren og det, der iagttages, ikke er udtryk for, at det er iagttageren, der »skaber« det, han iagttager.



Det er ikke således, at videnskabens erkendelse bliver subjektiv, eller at bevidstheden spiller nogen rolle for den atomare verdens indretning, som mange populærvidenskabelige beretninger har lydt på. Det er blot sådan, at selve erkendelsesarbejdet medfører en vis forstyrrelse af det, der erkendes. Men denne vekselvirkning kan også ske – og sker hele tiden – mellem fysiske genstande, der overhovedet ikke er interesseret i at iagttage hinanden, men blot og blindt vekselvirker.

Alligevel var denne erkendelsessituation meget overraskende for kvantefysikerne. Det viste sig, at denne nye

iagttagelsessituation ikke var det eneste underlige ved kvantefysikken. Den udsprang af, at naturen fundamentalt set er præget af springvise forandringer (det er det samme som at sige, at der er en nedre grænse for hvor små vekselvirkninger, der kan forekomme, nemlig kvantet). Det besynderlige er så, at når disse små spring skal ske, kan man ikke i sædvanlig forstand tillægge dem årsager, for når virkningerne har et mindstemål, får årsagerne det også.

Derfor blev det kvantefysiske billede, der blev udviklet i 1920'erne præget af en hel række underlige forhold:



Iagttagelsen indvirker irreversibelt på det iagttagne; ikke alle virkninger kan siges at have en årsag; ikke alle virkninger kan nøje forudsiges; naturen er præget af tilfældighed og uforudsigelighed.

Dette billede adskiller sig meget klart fra det klassiske verdensbillede, hvor naturen ses som kontinuerlig, reversibel, forudsigelig og helt adskilt fra iagttageren.

Et eksempel på, hvor pinagtigt problemet med uforudsigeligheden og årsagsløsheden var, er radioaktivitet. Har man en masse atomer af et radioaktivt grundstof – for eksempel et gram uran – kan man med stor præcision forudsige, hvor mange atomer, der spaltes i løbet af en time. Men man kan intet sige om, hvilke atomer, der vil spaltes, kun hvor mange. Tager man en enkelt atom ud, kan man sige noget om, hvor stor sandsynligheden er, for at dette atom spaltes i løbet af den næste time. Men man kan ikke sige, om det vil ske i næste sekund, eller om tusind milliarder år. Det betyder, at man ikke kan angive nogen årsag til, at et bestemt atom spaltes på akkurat dét tidspunkt. Man har kun mulighed for at sige, at et bestemt antal atomer vil blive spaltet, men der er ikke nogen årsag, der afgør hvilke, der bliver tale om.

Foto: Niels Bohr Instituttet.

Debatten mellem Bohr og Einstein

De fysikere, der var med til at udforme kvantefysikken i dette århundredes første årtier, delte sig i to lejre, da de blev stillet over for sådanne besynderligheder.

Den ene skole, hvis hovedrepræsentant var Albert Einstein, mente, at denne mangel på årsager i atomernes verden måtte være udtryk for, at vi mennesker mangler viden. Der må være love, der afgør, hvilke atomer i et radioaktivt stof, der spaltes på et givet tidspunkt – men vi kender blot ikke disse love. På et tidspunkt vil disse love blive erkendt, og så vil det vise sig, at atomernes verden slet ikke er så underlig endda. Einstein var særdeles utilfreds med kvantefysikken, fordi den gav et billede af naturen, præget af tilfældighed, uforudsigelighed og årsagsløshed.

Den anden skole, der blev den dominerende, havde Niels Bohr som hovedrepræsentant. Denne skole mente, at det ikke var et spørgsmål om midlertidig uvidenhed, der gjorde, at atomernes radioaktive spaltning ikke kunne forklares med årsagslove. Der *var* ingen årsager på spil, mente denne skole, der pegede på, at selve eksistensen af kvantet er forklaringen på, at man ikke kan tale om årsager i atomernes verden.

Den dramatik, der prægede denne diskussion, fremgår af filmen »Atomfysik og virkelighed«. Mange af de følelser, der gjorde sig gældende, handlede akkurat om, at man med kvantefysikken måtte forlade hele den ver-

dens beskrivelse, den vestlige videnskab havde bygget op.

For Einstein blev det nye verdensbillede helt uspiseligt, og han håbede hele sit liv, at det ville vise sig blot at være et mellemstadium i de fysiske videnskabers udvikling. For Bohr forekom det at være en »belæring«, der nok satte videnskaben i en ny situation, men på den anden side måtte accepteres.

De dramatiske diskussioner mellem de to fysikere ebbede ud i løbet af 1930'erne, hvorefter et flertal af fysikerne accepterede Bohrs synspunkt, at kvantefysikken markerede et afgørende skifte i videnskabens udvikling – og efterlod en række filosofiske forandringer i sit kølvand.

Diskussionen døde ud, bortset fra små hjørner af det internationale fysikersamfund, der fortsat var bekymrede over sagen.

I 1951 lykkedes det den amerikansk-engelske fysiker David Bohm at vise, at man faktisk kunne lave en teori af den type, Einstein-skolen havde talt om. En teori, der beskrev de årsagslove, der lå »neden under« det niveau kvantefysikken beskrev. Det var i sig selv overraskende, at man kunne lave en sådan teori, men det vakte ikke så stor opsigt blandt fysikerne, bl.a. fordi Bohms teori led af en besynderlighed: den var *ikke-lokal*. Prisen for at lave en teori, der opretholdt normale forestillinger om årsagsloven i atomernes verden, var at hævde, at verden ikke er adskilt i dele, men hænger sammen på en forunderlig måde. Bohms teori gav således ikke akkurat et pænere



Einstein og Bohr, 1930, fotograferet af Paul Ehrenfest. (American Institute of Physics).

billede end kvantefysikkens normaludgave, den flyttede blot problemet.

Senere viste Bohm, at man gennem et eksperiment kunne afgøre, om man definitivt var tvunget til at acceptere, at atomernes verden er underlig. Dette eksperiment ville kunne påvise, at forestillingen om en årsagslov og en lokal beskrivelse af verden ikke kunne opretholdes.

John Bell påviste i 1964, at det rent faktisk også var praktisk muligt at udføre et sådant eksperiment, der på helt definitiv måde ville kunne skelne mellem »pæne« teorier for atomerne (lokalt virkende årsager) og »underlige« teorier (årsager mangler, tingene er ikke adskilt i lokale enheder).

Bell's arbejder blev videreført af en amerikansk gruppe fysikere – med John Clauser og Abner Shimony som de førende – der i 1970'erne gennemførte sådanne foreløbige forsøg. Det blev franskmændene Alain Aspect, der i 1982 i Orsay gennemførte det forsøg, der endeligt synes at afklare sagen. Til Bohrs fordel.

Der findes fortsat fysikere, der betvivler at Aspects eksperiment endeligt har afgjort sagen, fordi der er visse tekniske indvendinger, der kan rettes mod forsøget. Men som John Bell, der holder med Einstein-holdet og er ked af udfaldet af Aspects eksperiment, har sagt det: disse indvendinger er så spidsfindige, at de ikke forekommer troværdige.

Med udfaldet af Aspects eksperiment står fysikken i den situation, at den endeligt må erkende, at det »pæne« verdensbillede, de fleste af os lærer i skolen, ikke kan holde. Verden kan ikke beskrives som en samling adskilte dele, der virker sammen gennem reversible og klart beskrivelige årsager. Det er mere underligt, end som så.

Men hvor underligt det er, vides endnu ikke. Det klassiske verdensbillede må forlades. Det nye er endnu knap udformet.

I de seneste år er dette filosofiske vilkår atter kommet på den internationale fysikverdens dagsorden.

Som verdens førende videnskabelige tidsskrift, det engelske »Nature« skrev i en kommentar til Niels Bohrs 100-årsdag i 1985:

»Det er farligt at tro, at kvantemekanikken udgør en revolution, der er afsluttet. Det er en revolution, der fortsat er ved at arbejde sig gennem fysikken«.

Tor Nørretranders er videnskabsjournalist og har bl.a. udgivet »Det udelelige. Niels Bohrs aktualitet i fysik, mystik og politik« (Gyldendal, 1985).



Aspect's eksperimenter

hvad er det, som er så svært at forstå?

Af Peder Voetmann Christiansen

Niels Bohr citeres ofte for at have sagt, at hvis man hører om kvantefysikken (komplementaritets-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

*Bohr og Einstein, 1930, fotograferet af Paul Ehrenfest.
(American Institute of Physics).*

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 sund fornuft. I stedet for at lade os nøje med, at naturen er uforståelig (hvad den jo ikke altid er, herom vidner fysikkens succes), så kan vi bruge Bell's indsigt til at præcisere, hvad det er, vi har svært ved at forstå. Deref-

ter 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 ulighed* 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 registrere noget, hvis en foton er passeret fra kilden og igennem polarisatoren foran detektoren. De to detektorer er med led-

ninger 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

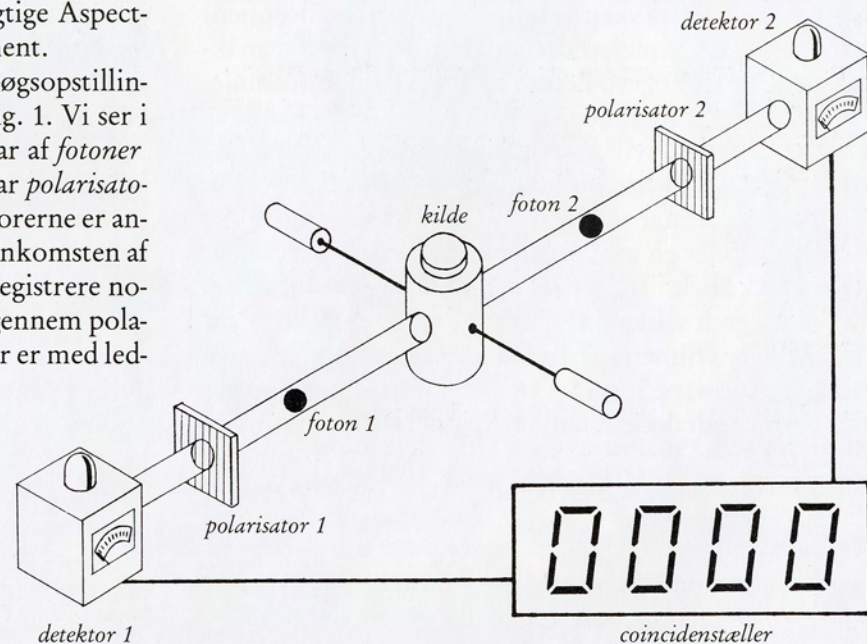


Fig. 1. Forsøgsopstillingen i det første Aspect-eksperiment. Model: Jakob Koch.

ca 0.02 mikrosekunder. Hvis tidsmellemrummet 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.

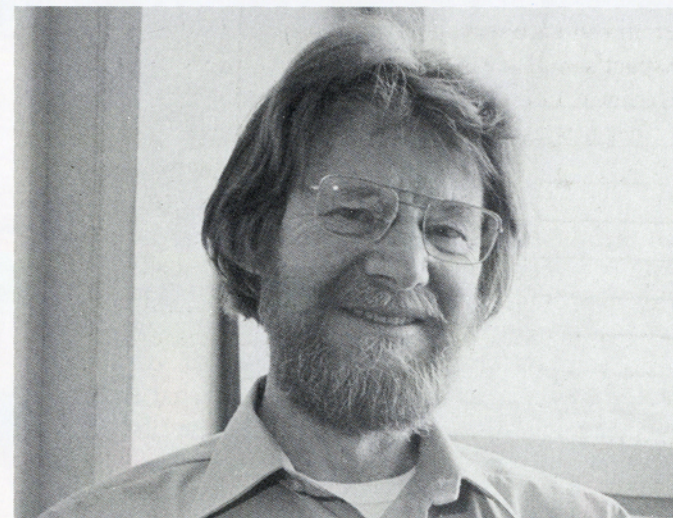
Forsøgsgangen kan nu skildres som bestående af tre faser:

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 coincidentstal altid er halvt så stort som det, der målt i fase 1:

$$N_2 = \frac{N_1}{2} \quad (1)$$

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 coincidentstallet i tælleperioden T , men nu sørger vi for, at de to polarisatorer



Den irske fysiker John Bell, hvis teoretiske arbejde muliggjorde Aspects eksperiment. (Lars Becker-Larsen, 1985).

hver gang er indstillet forskelligt. Lad os kalde de tre indstillinger for 1, 2 og 3. Vi gennemprøver alle kombinationerne af ikke-parallele, faste indstillinger: 12, 13, 21, 23, 31 og 32. Det viser sig, at det målte coincidentstal altid er en ottendedel af det tal, der målt i fase 1:

$$N_3 = \frac{N_1}{8} \quad (2)$$

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*. D.v.s. 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.

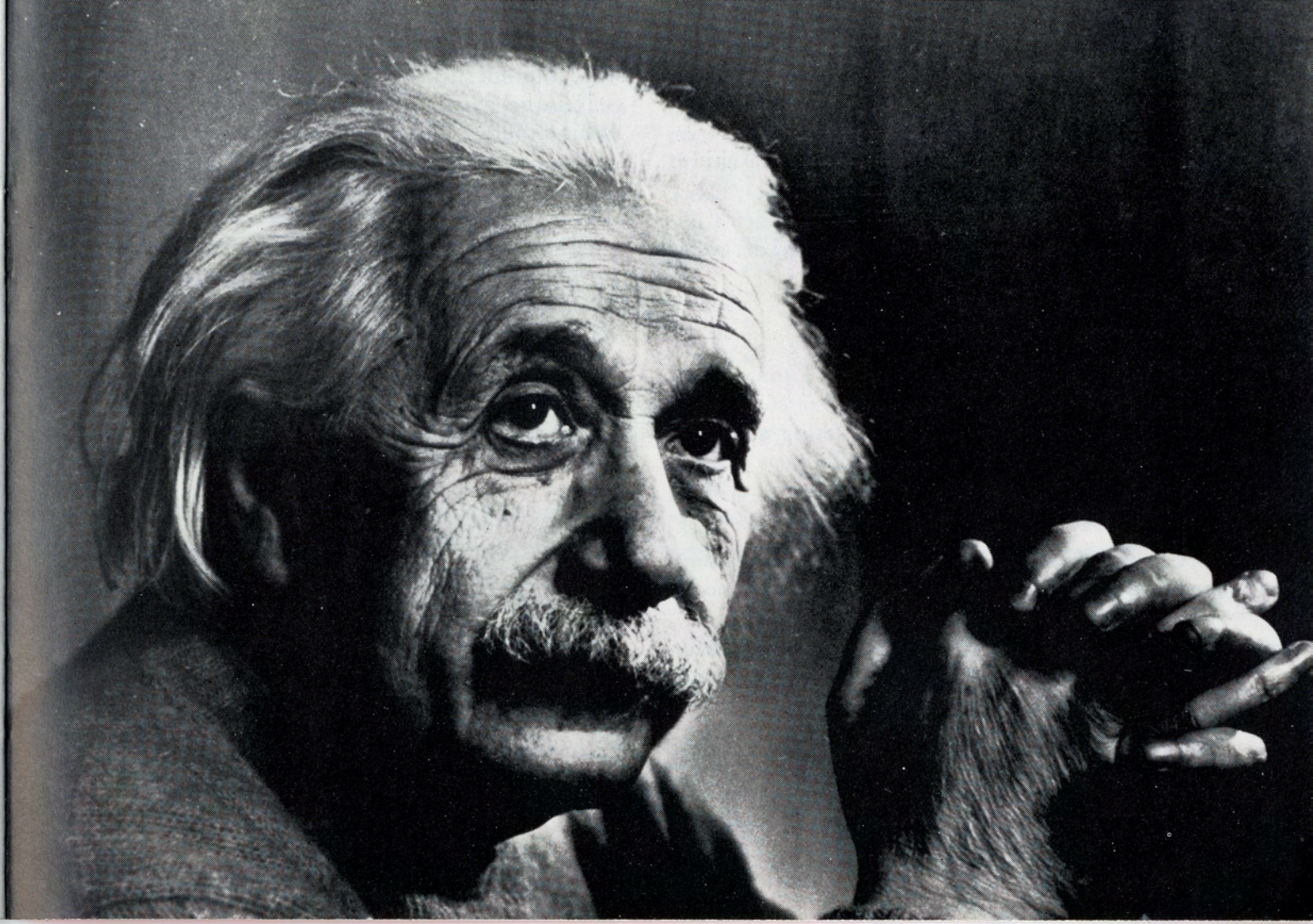
Hvis vi holder os til de faste indstillinger 1, 2 og 3, kan vi give en ad hoc tilstandsbeskrivelse af en foton, som kun refererer til disse indstillinger: Vi kan f.eks. betegne en tilstand med cifrene 010, og det betyder så, at fotonen vil blive stoppet af polarisatoren, hvis denne har indstilling 1, 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 coincidentstallet 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 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.

Einstein fotograferet af Yousuf Karsh (American Institute of Physics).



Tilstandene falder derfor i fire klasser, idet antallet af nul-ler 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 brøkdde 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). Chansen 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:

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

For at indse, at vi herved får forklaret ligning (1), betrag-

ter 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 coincidensbrøkdelen 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 på næste side.

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 $\frac{N_2}{N_1}$ ifølge eksperimentet har den faste værdi $\frac{1}{2}$ (ligning (1)), må det ifølge vores skema gælde, at

$$q + 2r + s = \frac{1}{2} \quad (4)$$

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

$$r + s = \frac{1}{8} \quad (5)$$

	000 (p)	001 (q)	010 (q)	011 (r)	100 (q)	101 (r)	110 (r)	111 (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	$q + 2r + s$

Skemaet viser lodret de 9 mulige dobbeltindstillinger af polarisatorerne, og vandret de 8 fotontilstande.

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):

$$r + s = \frac{1}{2} - (q + r) \quad (4a)$$

og af ligning (3) fås:

$$q + r = \frac{(1-p-s)}{3} \quad (3a)$$

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

$$q + r \leq \frac{1}{3} \quad (3b)$$

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

$$r + s \geq \frac{1}{2} - \frac{1}{3} = \frac{1}{6} \quad (6)$$

Størrelsen $r + s$ er jo netop brøkdelen af coincidenser for fase 3 af forsøget. Ifølge ligning (5) skal den have værdien $\frac{1}{8}$, 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 $\frac{1}{6}$. Dette er *Bell's ulighed* for den betragtede situation.

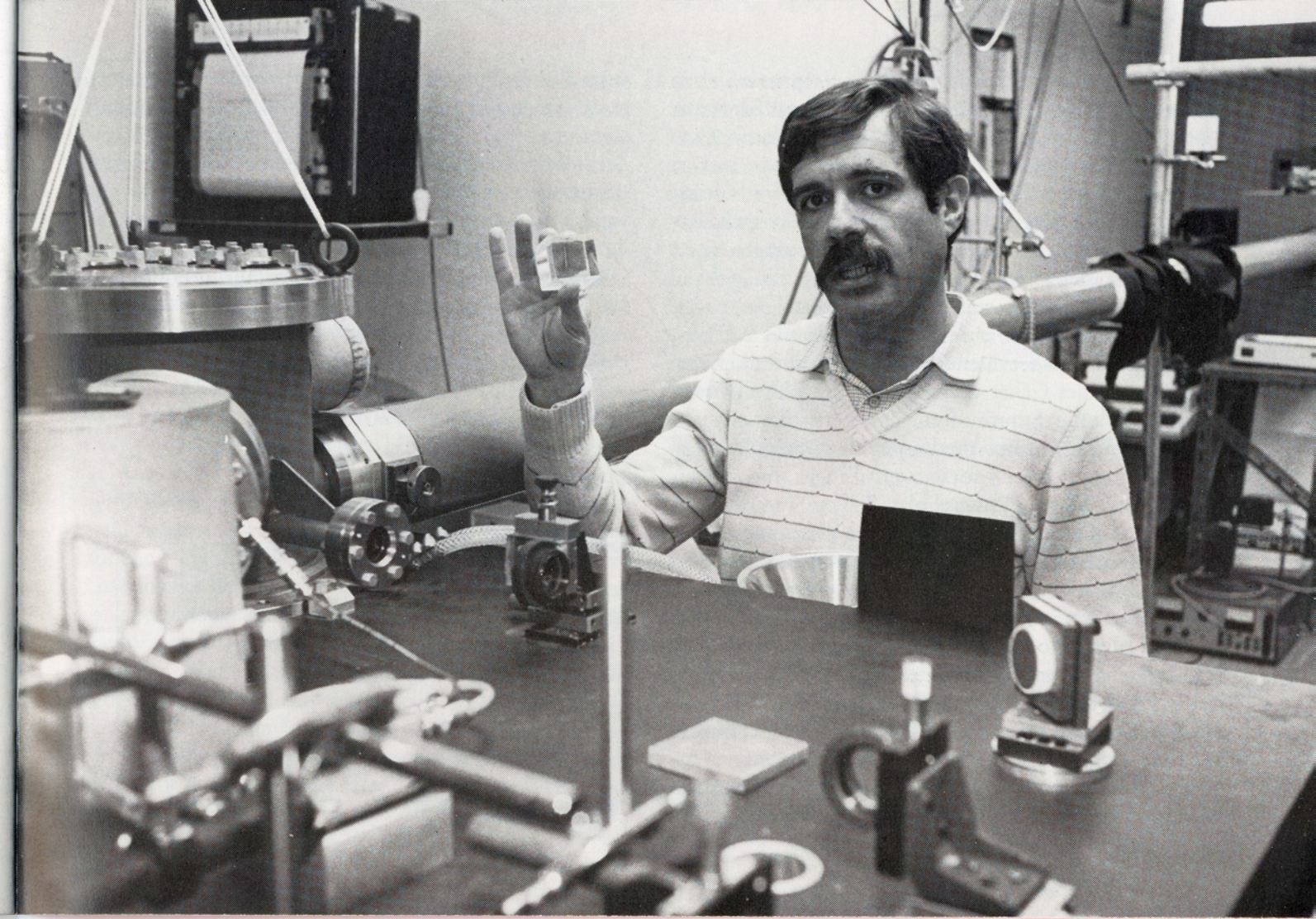
Nu står vi så med problemet i en nøddeskal, for vi ser, at vores sunde fornuft, d.v.s. vores lokalrealistiske teori umuligt kan forklare både fase 2 og fase 3 af eksperimentet. Det er let nok at forklare fase 2, men så fanger Bell's argument, og vi ser, at det observerede resultat $\frac{N_3}{N_1} = \frac{1}{8}$ er mindre end den minimale værdi, det kan have ($\frac{1}{6}$) 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 $\frac{1}{8}$. 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

Alain Aspect i sit laboratorium i Paris, hvor han i 1982 udførte Einstein, Podolsky og Rosen's tankeeksperiment. I hånden holder Aspect et polarisationsfilter, t.v. ses Calciumkilden, hvorfra fotonerne udsendes, og t.h. for enden af røret er den optiske omskifter placeret. (Lars Becker-Larsen, 1985.)



flere kombinationer af indstillinger kan afprøves i samme tælleperiode. F.eks. 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 13 samtidigt. Arrangementet kræver 4 coincidentstøttere (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 udviklede 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 »tænketanke« 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.

Aspect's 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

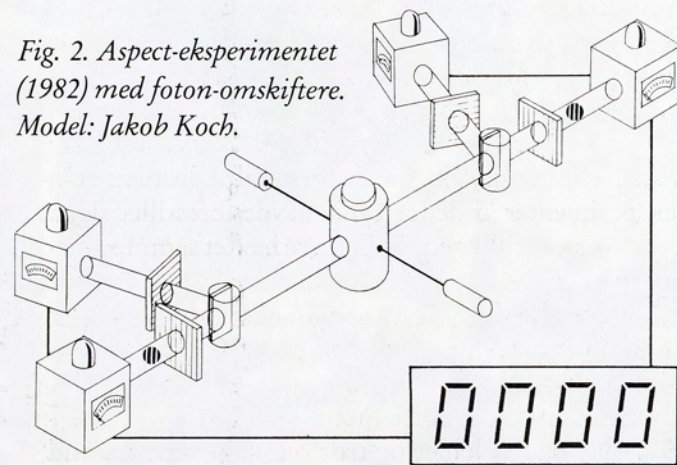


Fig. 2. Aspect-eksperimentet (1982) med foton-omskiftere. Model: Jakob Koch.

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 coincidentstøttere (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 Aspect's, 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 Aspect's første, men uden forbindelse 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 Aspect's 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 gøres til genstand for eksperimentelle undersøgelser, og det er et væsentligt gennembrud i fysikken.

Peder Voetmann Christiansen, lektor i fysik, RUC.

Litteratur

1. Tor Nørretranders, »Det udelelige«, Gyldendal 1985.
2. N.D. Mermin, 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.

Bagside: Model af Jakob Koch.

