

**Bjørn Sverre Lerkerød**

## **Bidrag til en ny tolkning av kvanteteorien<sup>1</sup>**

Sammendrag:

Bakgrunnen for dette arbeidet er ønsket om å kunne knytte kvanteteori til lett observerbare fenomen som refleksjon og interferens. Til nå har bølge- partikkel- dualisme, komplementaritet, Einstein-Bohr debatten, avhengigheten av en observatør sammen med en vanskelig tilgjengelig formalisme gitt kvanteteorien et gåtefullt skjær.

Den rådende tolkningen har ikke plass for realisme etter Plancks syn: "Det eksisterer en verden utenfor oss, uavhengig av om vi observerer den eller ikke." Vi vil drøfte hvordan et slikt virkelighetsbilde kan tilpasses det vi nå vet om kvantefenomener.

Kan det være slik at fotonet og andre elementærpartikler bare er lokalisert under vekselvirkning med andre partikler? Vi vil teste om en slik modell for fotonet fungerer sammen med refleksjonslovene og med observasjonene etter at noen få fotoner har passert en dobbeltspalt. Dette gir en innsikt som vi bruker kort å se på eksperimenter fra de første tiårene på 1900-tallet, tolkningen av Schrödingers bølgefunksjon og Einstein-Bohr diskusjonen om hvordan passering av et foton gjennom en dobbeltspalt kan forstås. Ut fra dette forkaster vi komplementaritet som forklaring, men holde fast på uskarphetsrelasjonen som et grunnleggende trekk ved naturen.

Eksperimenter med polarisering av ett foton og etterfølgende depolarisering har overrasket og står fortsatt uforklart. Det sammen gjelder eksperimenter der ett foton ser ut til å stå overfor et valg mellom to veier og premisene for valget blir bestemt etter av valget er gjort. Vi vil gjennomgå begge eksperimentene og vise at de har en enkel forklaring.

Dette fører oss over til EPR-eksperimentene, spørsmålet om lokalitet og til slutt "sammenfiltrering". Også her kan vi finne enkle forklaringer.

Dette arbeidet startet med et ønske om å bruke kvanteteorien til å kunne forklare enkle fenomener som omgir oss hver dag. "Er det mulig å gi elevene en innføring i kvanteverdenen uten å bruke en vanskelig tilgjengelig formalisme?" Jeg tenkte mest på å forstå refleksjonslovene for lys og å kunne forklare interferens av lys. Til nå har refleksjonslovene vært behandlet som geometrisk optikk og forklaringen av Youngs forsøk med dobbeltspalt har skjedd med bølgeteorien for lys. Det vi sier, kunne også vært sagt for snart 200 år siden. Samtidig vet vi at lyset er fotoner.<sup>2</sup> Kunne vi ikke bruke refleksjon og interferens av lys til å gi elevene et enkelt, første møte med kvanteverdenen?

---

<sup>1</sup> Skrevet i forbindelse med Lansdskonferansen om fysikkundervisning, NFL, Gol 2008.

<sup>2</sup> Vi vil bruke ordet *foton* selv dette navnet først kom i 1928.

## Premisser

Arbeidet viste snart

1. at bølge-partikkeldualismen var en nøkkel
2. at metafysiske/filosofiske føringer lå sammen med fysikken i den tolkning av kvanteteorien som ble utviklet i 1920-30 årene.

Det er lett å overse at metafysiske og filosofiske standpunkt ligger i bunnen når vi skal tolke naturen. Det er gjerne tanker som ligger i tiden og virker så opplagte at det ikke er nødvendig å nevne dem. Ser vi derimot på hvordan man har godtatt eller avvist eksistensen av atomer fra oldtiden og fram til i dag, vil vi se at prinsipper som ligger utenfor fysikken har vært medvirkende.<sup>3</sup> Kan noen av de paradokser og bruddene med klassisk fysikk som preger kvantefysikken, skrive seg fra den filosofi som styrte mange av pionerene?

I denne sammenhengen vil jeg peke på to av Niels Bohrs formuleringer:

1. Det er ingen kvanteverden. Det er bare en abstrakt kvantefysisk beskrivelse. Det er galt å mene at fysikkens oppgave er å finne ut hvordan naturen er. Fysikk dreier seg om hva vi kan si om naturen.<sup>4</sup>
2. Som en mer passende uttrykksmåte har jeg argumentert for at bruken av ordet *fenomen* utelukkende skal vise til observasjoner oppnådd under nærmere angitte forhold, hele forsøksoppstillingen medregnet.<sup>5</sup>

Her ser vi tydelig et slektskap med tysk idealisme, Ernst Machs filosofi og logisk empirisme (også kalt ny-positivisme). Opplegget dreier seg om å få orden på observasjonene. Muligheten for en realitet bakenfor observasjonene er avvist. Dette gjør fysikken antroposentrisk, helt avhengig av en observatør. Max Planck var en sterk og tydelig motstander av Machs filosofi.<sup>6</sup> Planck argumenterte for at det eksisterte en reell sammenheng uavhengig av at vi observerer den. Planck argumenterte for et "naturlig enhetssystem" som bare bygde på universelle fysiske konstanter. Grunnenhetene for lengde og tid, gjerne kalt Planck-lengde og Planck-tid, blir i dag ofte brukt i kosmologi. Plancks realisme fikk liten oppslutning. Fram til 1950-årene var det nærmest likhetstegn mellom vitenskap og logisk empirisme.<sup>7</sup> Større åpenhet for flere vitenskapssyn kom med Karl Popper. Erkjennelsesteoretisk var Popper realist og mer interessert i hvordan verden er, enn i analyse av de begrep vi bruker for å beskrive verden.<sup>8</sup>

*Ut fra dette vil vi frigjøre oss fra Bohrs syn og undersøke om realisme vil fungere på atomnivå.*

---

<sup>3</sup> Se f.eks. mitt foredrag fra Grimstad-konferansen: Atomer - hvor virkelige er de?

<sup>4</sup> Pais 1991:426

<sup>5</sup> Schilpp 1959:237

<sup>6</sup> Leyden forelesningen i 1908. *Physikalische Zeitschrift* 10. Jahrgang, No. 2 side 62 ff.

<sup>7</sup> Mario Bunge: *The Turn of the Tide in Quantum Theory and Reality*, Springer 1967 gir en oversikt.

<sup>8</sup> Bryan Magee: *Popper, Fontana Modern Masters* 1973 gir en innføring i Poppers tanker.

## Realisme? Hva må til for at noe skal være virkelig?

I et dykk ned i materien møter vi først atomer. Atomer som løser seg opp til en kjerne omgitt av elektroner. Kjernene er igjen bygget med protoner og nøytroner, som igjen er bygget opp av kvarker. Kanskje er det enda flere lag dypere ned. Må ikke det gi en følelse av at alt løser seg opp?

Vi slipper ikke unna spørsmålet: Hva må til for at noe skal være virkelig?

La oss først se litt på energi. Vi regner alle med energi og bevaring av energi. Ut fra målte størrelser kan vi tilskrive et legeme eller en partikkel bevegelsesenergi. Ut fra posisjon lar vi et legeme eller en partikkel som er påvirket av et felt ha en potensiell energi. Vi har også en vekslingskurs mellom massesvinn og energioverføring.  $\Delta E = \Delta mc^2$

På alle trinn blir prinsippet om energibevaring blir brukt og stolt på. Vi ser ikke energien, men vi ser hvordan den påvirker størrelser vi kan observere. Derfor stoler vi på at energi er en realitet, ikke bare et bilde vi har dannet oss.<sup>9</sup>

Allerede Demokrit, da han hevdet at verden besto av atomer og tomt rom, brukte prinsippet om å begrunne det vi ser med noe bakenfor det vi ser. Atomismen til Demokrit ble godtatt av noen og forkastet av andre. Svakheten var at Demokrit ikke kunne formulere målbare konsekvenser av hypotesen sin.

Å innføre Avogadros konstant og å finne en god verdi for den var viktig i arbeidet for å få atomhypotesen godtatt. I 1905-avhandlingene om å bestemme molekylære dimensjoner og om Brownske bevegelser sammenlignet Einstein de verdier hans avhandlinger ga for Avogadros tall med verdiene funnet ved måling.<sup>10</sup> I avhandlingen der Planck formulerte kvantehypotesen, innførte han konstantene  $h$  og  $k$ . Med målte verdier for konstanter i strålingslovene kunne  $h$  og  $k$  beregnes.<sup>11</sup> Sammenhengen  $R = Nk$  der  $R$  er den universelle gasskonstanten fra tilstandsligningen ga en god verdi for Avogadros tall.

Altså: *Skal vi i fysikk regne med noe vi ikke kan se, må det ikke-synlige ha observerbare konsekvenser.*

### Hva gjør en teori til en god teori?

Selvfølgelig må en teori kunne sette alle kjente observasjoner innen det område som teorien dekker inn i en sammenheng. Mange vil også føye til: En god teori skal også peke på nye konsekvenser som kan føre til nye eksperimenter og videre utvikling av teorien. Utviklingen av kvantefysikken i 1920-årene er et godt eksempel på dette.<sup>12</sup>

---

<sup>9</sup> To teorier som prøvde å vrake loven om energibevaring er begge forkastet. (1) BKS-teorien og Bohr 1923: Se Pais s. 233f. (2) Steady State kosmologien. Se Helge Kragh: *Cosmology and Controversy*, Princeton UP 1996.

<sup>10</sup> Einsteins Miraculus Year, Princeton UP 1998

<sup>11</sup> *Theorie der Wärmestrahlung*, utg. 2, kap. 155-163.

<sup>12</sup> Dette er hentet fra Lindsay & Margenau: *foundations of physics*, Dover 1957.

Paul Dirac var en av de som mente og praktiserte dette. Ut fra tolkningen av den relativistiske kvanteligningen postulerte han eksistensen av positronet. Eksperimentelt ble det påvist noen år senere. Dette viser at de gode ligningene beskriver sammenhenger i naturen. De er mer enn et abstrakt regneskjema.

Andre eksempler på at ligninger beskriver sammenhenger før de er påvist er Maxwells elektrodynamiske ligninger og Einsteins generelle relativitetsteori. Maxwell føyet til et ledd uten dekning fra eksperimenter for å få et ledd symmetrisk til leddet for induksjon. Dermed åpnet ligningene for elektromagnetiske bølger, som senere ble oppdaget og til fulle utnyttet. Einstein forutsa at lyset måtte bli påvirket av gravitasjonsfeltet rundt store himmellegemer. Observasjoner under en total solformørkelse bekreftet dette.

Alså: Vi kan stole på at det finnes sammenhenger i naturen bakenfor det vi kan se. Det inspirerer til å lete etter sammenhenger og målbare konsekvenser.

## **Bølge eller partikkel ? Eller bølge og partikkel ?**

Lyset viser både bølgeegenskaper og partikkelegenskaper. Eksempel på bølgenatur kan være interferens i dobbeltspalt. Et godt eksempel på partikkelegenskaper er fotoelektrisk effekt der ett foton river løs ett elektron. Inspirert av Louis deBroglie hypotese om materiebølger påviste man snart at også elektroner ga interferensmønster. Interessant, men vanskelig å forstå.

Niels Bohr kom fram til at bølge og partikkel var komplementære sider ved foton og elektron. Begge sider måtte med i et samlet bilde, men de kunne ikke blandes.<sup>13</sup>

Bohrs løsning stopper altså ved observasjonene. Med realisme som tolkningsgrunnlag må vi prøve å komme ett trinn bakenfor observasjonene. Siden eksperimenter med fotoner er best kjent og lettest å få til, vil vi begrense oss til fotoner. Eksperimenter viser at fotoner blir registrert enkeltvis, ikke som en gruppe samvirkende fotoner.<sup>14</sup>

Funn

- Planck: Energiutveksling mellom stråling og materie skjer i hele multipla av en minste energimengde.  $e = nh\nu$  der  $n = 1, 2, 3, \dots$
- Einstein: Fotoelektrisk effekt. Ett foton (partikkel) løsriver ett elektron.
- Compton: Elastisk støt mellom foton og elektron forklares med bevaring av energi og bevegelsesmengde. (Foton og elektron tenkt som partikler)
- Lys gjennom dobbeltspalt: Observert mønster forklares som resultat av interferens mellom elementærbølger.

---

<sup>13</sup> Schilpp s.209-210

<sup>14</sup> Zeilinger 2003 s.40

Vi vil anta

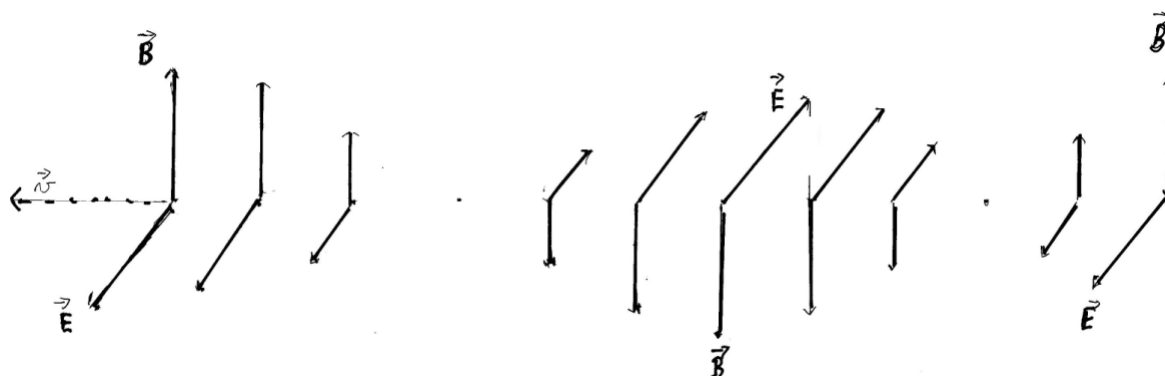
1. Når et foton beveger seg, pulserer  $\vec{E}$  og  $\vec{B}$  som i en bølge.
2. Fotonets  $\vec{E}$  kan påvirke elektroner i retning vinkelrett på fotonets bevegelsesretningen. Når fotonet beveger seg fremover, kan bildet av en bølgefront beskrive en mulig kraft på elektroner
3. Når fotonet vekselvirker med et elektron, samles fotonet/feltene i et lite område. Bølgeegenskapene kollapser. Fotonet opptrer som en partikkel.
4. Fotonet bærer med seg energi og bevegelsesmengde som blir overført når fotonet vekselvirker med et elektron.

En motforestilling mot kollaps av bølgen.

"Når fotonet som er til stede i et større område, kollapser og samles i et lite område, må det skje med en hastighet som overstiger lyshastigheten. Dette er ikke tillatt i relativitetsteorien og kan derfor ikke forekomme."

Vi vil hevde at dette er en misforståelse.

1. Brytningsindeks  $n < 1$  er påvist. Dette må tolkes som en forplantningshastighet  $v > c$ .<sup>15</sup>
2. Relativitetsteorien begrenser muligheten for informasjons-overføring. Overføringen kan bare skje ved at fotonet vekselvirker med et elektron. At feltene kollapser skjer i retning vinkelrett på fotonets observerte bevegelsesretning og går forut for vekselvirkningen. Derfor kan kollaps av feltet skje uavhengig av den spesielle relativitetsteorien.



Figur 1 Foton i bevegelse

## Test av modellen

Vi vil først teste hvordan denne modellen virker når et foton blir reflektert fra en plan flate. Dernest vil vi la ett eller flere fotoner passere en dobbelt-

<sup>15</sup> Se Jankins and White: Fundamentals of Optics, McGraw-Hill, 1957 § 23.7

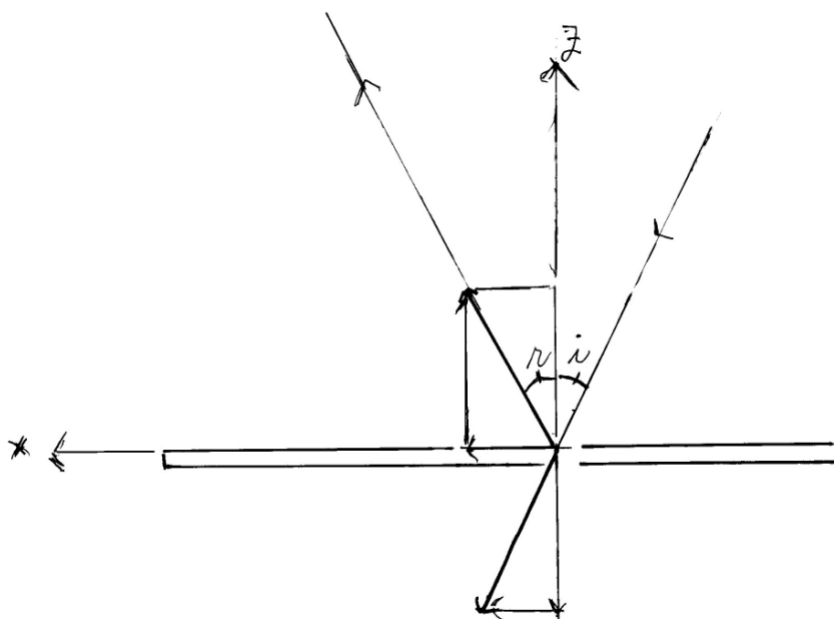
spalt. I begge tilfelle er utfallet kjent og akseptert. Vi vil se hvordan prosessen må være for å gi det godt etablerte resultatet i disse to forsøkene.

### Refleksjon fra plan flate

Refleksjonslovene er vanligvis formulert for stråle eller, kan vi si, en strøm av fotoner. Tilpasset ett foton kan vi si:

1. Refleksjonsvinkel er lik innfallsvinkel når vi ser på fotonets bane.
2. Banen til innfallende og reflektert foton ligger i samme plan.

Vi vet også at fotonets bølgelengde ikke blir forandret ved refleksjon fra et speil som ligger i ro i laboratoriet. Jfr. Wiens forskyvningslov.



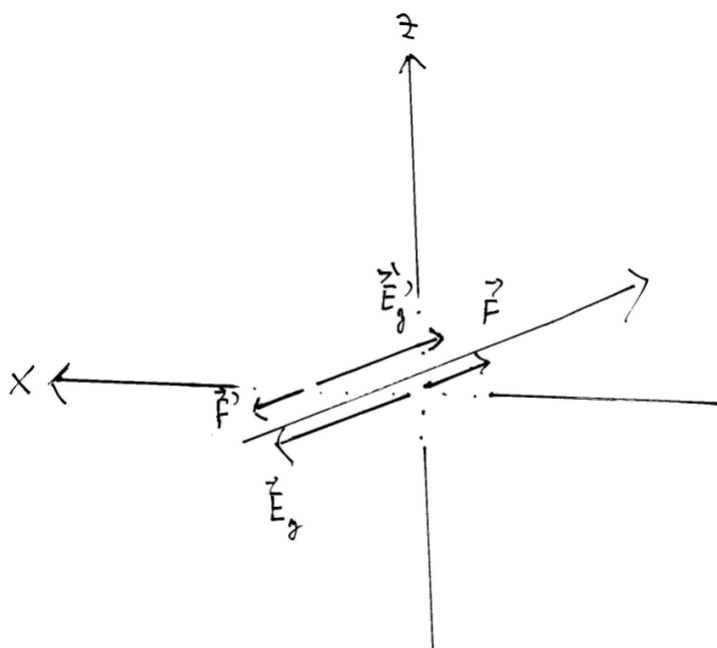
Figur 2 Refleksjon, elastisk støt:

Figuren viser en z-akse normalt på det reflekterende planet. Origo ligger i det punktet fotonbanen blir endret. x-aksen har samme retning som fotonbanen projisert på speilet. y-aksen har den retning som gir et rettvisklet, høyreorientert koordinatsystem.

Fotonet beveger seg i (x,z)-planet før og etter refleksjonen. Med uforandret bølgelengde har fotonet den samme bevegelsesmengde,  $p = \frac{h}{\lambda}$ , før og etter refleksjonen,  $p_x \text{ etter} = p_x \text{ før}$ . Når  $\angle r = \angle i$ , må vi ha

$$\vec{p}_{x \text{ etter}} = \vec{p}_{x \text{ før}}, \vec{p}_{z \text{ etter}} = -\vec{p}_{z \text{ før}}$$

Dette betyr at fotonet har fått et elastisk støt i z-retningen.



Figur 3 Refleksjon, fasesprang.

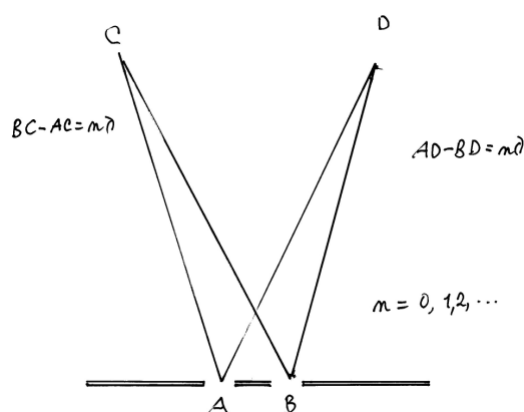
Figuren minner oss om at fotonet har en  $\vec{E}$  vinkelrett på forplantningsretningen. La oss anta at  $\vec{E}$  har komponenten  $\vec{E}_y$  i speilplanet når refleksjonen begynner. Det gir en kraft og dermed en akselerasjon i negativ y-retning av elektronet fotonet vekselvirker med. For fotonet får vi motsatt rettet kraft og akselerasjon etter Newtons lover. Nå vet vi at fotonet skal holde seg i x,z-planet. Det kan bare skje ved at  $\vec{E}_y \rightarrow -\vec{E}_y$ , slik at  $\int e\vec{E}_y dt = 0$  ved integrasjon over den tid støtet tar. Ved refleksjonen får fotonet et fasesprang på  $\mathbf{p}$ .

Vi ser at modellen av fotonet som en bølge som kollapser til partikkel-egenskaper ved vekselvirkning med et elektron passer med refleksjonslovene. Dessuten forklarer modellen fasespranget ved refleksjon.

### Fotoner gjennom en dobbeltspalt

Vi legger inn et koordinatsystem slik at x-aksen står vinkelrett på dobbeltspalten, y-aksen vinkelrett på x-aksen og spalteåpningene og z-aksen parallell med spalteåpningene.

Vi bygger på de observasjoner av interferensbildet fra dobbeltspalt som er grundig bekreftet og aldri utfordret. Stripene ligger slik at gangforskjellen fra spalteåpningene til et punkt i en stripe er  $n\lambda$ , der  $n = 0, 1, 2, \dots$



Figur 4 Dobbeltspalt

Dette betyr

-ett foton går gjennom begge spalteåpningene og deles i to like deler, "elementærbølger".

-elementærbølgene brer seg videre med en stor åpningsvinkel.<sup>16</sup>

Den kjente Youngs formel følger lett.

### Test

Det er avgjørende viktig for denne tolkningen at fotonet ikke velger én åpning, men fyller alle åpningene fotonet møter. Uskarphetsrelasjonen gir et hint. Bohr forklarte bredden av skjermbildet fra en enkeltspalt med uskarphetsrelasjonen. En dobbeltspalt gir smalere og mer presis 0. orden. Kan det være fordi  $\Delta x$ , åpningen fotonet passerer, er bredere? Med et gitter får vi enda smalere og skarpere bilder.

Med et gitter belyst med en laser kan vi med blender variere den brukte bredden av gitteret. Er det sammenheng mellom blenderåpning og bredden på interferensstripene?

### 0. orden

Først vil vi se på ett foton. De to elementærbølgene fra det ene fotonet må møte hverandre i fase for samlet å kunne vekselvirke med et elektron. Det kan bare skje ved 0. orden.

### Test

En detektor ved med posisjon ved 0. orden vil kunne registrere et elektron som tegn på at et foton har vært der. I andre posisjoner skal deteksjon ikke kunne finne sted.

---

<sup>16</sup> Åpningsvinkelen for denne bølgeutbredelsen er langt større enn det som kunne følge av  $\Delta y \cdot \Delta p_y \cong h/2\pi$ . En forklaring kan være at uskarphetsrelasjonen er knyttet sammen posisjon og bevegelsesmengde. En elementærbølge alene kan ikke gi impulsoverføring.

### Høyere orden

Skal et foton kunne vekselvirke med et elektron ved  $n$ . orden, må to fotoner nå dobbeltspalten med innbyrdes avstand  $n\lambda$ . Da blir det vekselvirkning med ett elektron på hver side av 0. orden.

Fotonene på vei mot dobbeltspalten hadde bevegelsesmengde i  $x$ -retningen. Symmetrien tilsier at sum av bevegelsesmengde etter vekselvirkningen også er rettet i  $x$ -retningen. Det betyr at vektorsummen av bevegelsesmengde for et visst antall fotoner bort fra dobbeltspalten er like stor som vektorsummen av bevegelsesmengden av det samme antall fotoner inn mot dobbeltspalten.

### Test

Det kan være tvil om en "elementærbølge" fra hver av spalteåpningene fyller hele det område som en halvsirkel med sentrum i spalteåpningen danner. Dersom det ikke er tilfelle, er det vanskelig å skjønne hvordan bølger med utgang fra de to spalte-åpningene kan treffe hverandre på steder som gir den rette gangforskjellen.

Bruk en fotonstrøm med konstant lav intensitet. Tell antall fotoner mot spalteåpningene i en viss tid. Plasser følsom film ved de steder interferens-stripene kommer. La fotonstrømmen gå like lenge som ved tidligere måling. Vil opptelling av spor på filmen gi et tall som svarer til antall inngående fotoner?

Vil bruk av teller i ett av stedene der det er interferensstripe, gjøre at flere fotoner vekselvirker her?

La tellingen gå med samme intensitet og varighet som ovenfor og sammenlign antall tellinger med tidligere funn.

**-Det som er klart ut fra dobbeltspaltforsøkene, er at fotonet kan dele seg.  
-For at fotonet skal vekselvirke med et elektron, må delene som kan bygge opp fotonet som en lokalisert partikkel med rett energi og bevegelsesmengde være tilgjengelig.**

Dette kan være overraskende ut fra Plancks funn om energiutveksling mellom stråling og materie. (Se side 4 ovenfor.) Denne formulering er gjerne forstått slik at ett foton er en udelelig enhet. Strengt tatt sier ikke Planck mer enn at et foton som vekselvirker med et elektron har en bestemt energi.<sup>17</sup>

Superponering av fotoner er vel kjent. Det innebærer også at en energirik, koherent strøm av fotoner kan splittes i flere koherente fotonstrømmer. Nå ser vi at oppsplittingen kan fortsette til enda mindre enheter enn den minste observerte fotonenergien. Kravet er bare at delene igjen samles til rett samlet energi for å vekselvirke med et elektron.

---

<sup>17</sup> Planck var kritisk til antagelsen om at stråling besto av udelelige lyskvanter. Å innføre momenter som det ikke var sikker dekning for, kunne ødelegge (kvante)teorien, mente han. Se forordet i Max Plancks *Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung*, utg. 2, 1913

## Gjensyn med gammel strid

I 1925 offentliggjorde Werner Heisenberg et arbeid som startet utvikling av matrisemekanikken. Han bygde på målbare, atomære energinivåer kjent fra spektralanalyse og Bohrs atommodell. Uavhengig av Heisenberg laget Erwin Schrödinger i 1926 en bølgemekanikk. Han var inspirert av Louis de Broglie og Einstein. Det viste seg at matrisemekanikk og bølgemekanikk på tross av grunnleggende forskjeller førte til de samme resultatene.

## Tolkning av Schrödingers bølgefunksjon

Schrödinger mente at hans bølgefunksjoner beskrev virkelige bølger. Det kunne verken Heisenberg eller Bohr godta. "Jo mer jeg tenker over den fysiske delen av Schrödingers teori desto mer avskyelig finner jeg den," sa Heisenberg.<sup>18</sup>

En løsning kom da Max Born fratok Schrödingerfunksjonen,  $\psi$ , enhver fysisk mening og tolket den som en sannsynlighetsfunksjon. Sannsynligheten for å finne et elektron i en volumcelle er da  $\psi^* \psi$ .

Dette ble snart godtatt av Bohr og kretsen rundt ham. I et artikkel i et festskrift til Planck skrev Bohr:<sup>19</sup>

"Den symbolske karakter som Schrödingers metode har, fremgår ikke bare ved dens enkelhet,..., vesentlig beror den på bruken av imaginære aritmetiske størrelser."

Til dette vil vi si: Schrödinger satte opp en bølgeligning etter mønster fra klassisk fysikk. Svingningene må beskrives med både sinus-ledd og cosinus-ledd. Det er en kjent lettelse i regnearbeidet å utnytte sammenhengen  $\cos x + i \sin x = e^{ix}$ . Det skjer i klassisk fysikk uten at bølgene dermed blir symbolske.

Det viktige er ikke utslaget av bølgefunksjonen  $\psi$ , men intensiteten,  $\psi^* \psi$ . Det er en reell størrelse. Der intensiteten er stor, vil også muligheten for en vekselvirkning være stor. Vi må bare ikke glemme at stor intensitet for fotonet hjelper lite dersom det ikke er noe elektron tilgjengelig.

Born og Schrödinger får samme svar, men de tolker forskjellig.<sup>20</sup>

En innvending som ofte går igjen, og som kanskje vil ramme dette arbeidet også, er at vi ikke må vende tilbake til klassisk tenkning. Til det kan vi rolig svare: Det avgjørende for en tolkning er ikke avstanden til klassisk tenkning, men hvor godt den kan forklare eksperimentene.

---

<sup>18</sup> Pais s. 298

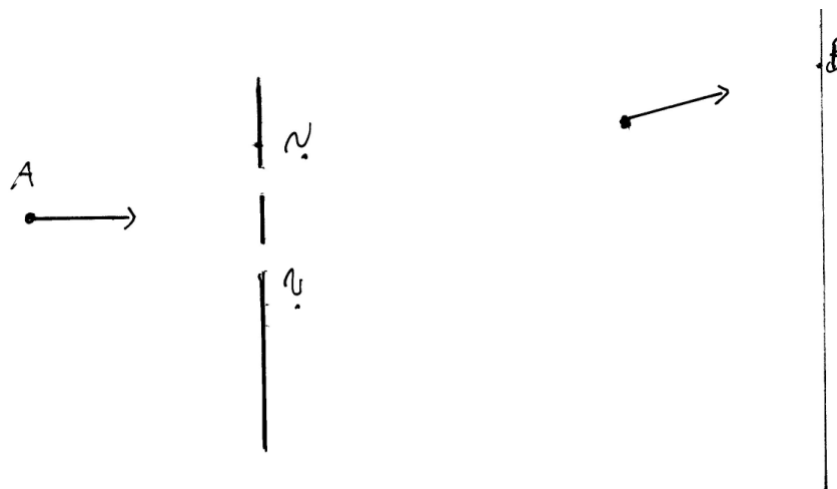
<sup>19</sup> Niels Bohr: Atomteori og naturbeskrivelse, Fakkeltok F148, s. 69.

<sup>20</sup> Pais s. 268.

## Nærmere analyse av tolkningen av 3 eksperimenter

### Fotoner gjennom dobbeltspalt i følge Einstein eller Bohr

Problemene med tolkning begynte allerede med striden mellom Einstein og Bohr på Solvaykonferansen i 1927. Debatten er blitt en klassiker.<sup>21</sup>



Figur 5 Problem med dobbeltspalt

Einstein og Bohr tok som gitt at fotoner var udelelige partikler. Med to spalter ble spørsmålene:

- (1) Hvilken av spaltene har fotonet brukt?  
-Å blende for den ene spalten ødela interferensbildet. Hvorfor må en av spalteåpningene være ubrukt for å gi interferens? Spørsmålet har ikke fått noe svar.
- (2) Hvordan finner fotonet fram til rett plass i interferensmønteret?  
Einstein knyttet bevaring av bevegelsesmengden til kunnskap om hvilken av de to spalteåpningene som ble brukt.  
-Sett at et foton i posisjon A før dobbeltspalten treffer skjermen i posisjon B. Da har bevegelsesmengden klart skiftet retning.
- (3) Er bevegelsesmengden bevart?<sup>22</sup>

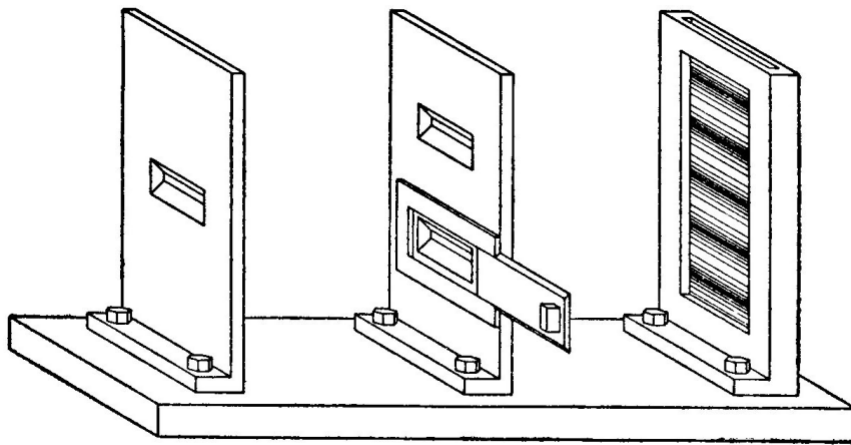
To svar som etter hvert dukket opp:

- Man må se på hele apparatoppstillingen. Fotonet støter mot spalteåpningene på en slik måte at den samlede bevegelsesmengden blir bevart.
- Uskarphetsrelasjonen forklarer at passering av spalteåpningen førte til en usikkerhet i bevegelsesmengden og som dermed ga retningsforandringen.

<sup>21</sup>Til festskriftet til Einsteins 70-års dag har Bohr en fyldig artikkel viet diskusjonene med Einstein Schilpp s. 201-241, Dansk tekst: Bohr 1959 s. 45-82 Fra senere tid har vi Zeilinger 2003 som flere steder forklarer momenter fra debatten.

<sup>22</sup>I flere arbeider om strålingsteori hadde Einstein med godt resultat bygget på at emisjon og absorpsjon var prosesser med en retning. Det betyr at bevegelsesmengde ble overført.

Zeilinger har en grundig gjennomgang og ser Bohrs tolkninger som løsningen, men innrømmer at noen av argumentene går i sirkel.<sup>23 24</sup>



Figur 6, Einstein - Bohr

### Kritikk

Ved å anta at det er en kvanteverden vi kan studere og å se på et foton som en bølge som kan splittes i elementærbølger, men samles igjen ved vekselvirkning med et elektron, har vi kunnet forklare prosessene ved en dobbeltspalt.

- (1) Hvert foton bruker begge spaltene.
- (2) Bildet kan dannes der gangforskjellen fra spalteåpningene er  $n\lambda$ .
- (3) Analyse av symmetrien viser at bevegelsesmengden er bevart.

Interferens krever bølger eller felt. Antagelsen om at en partikkel passerer dobbeltspalten umuliggjør en rasjonell forklaring. Da ser vi at diskusjonen mellom Einstein og Bohr ga to feil som har blitt stående.

- (1) Einstein insisterte på å følge en partikkel hele veien. Slik er naturen ikke. Den følger regler som gir et avgrenset antall muligheter. Når Einstein avviste kvantemekanikken slik den forelå, stilte han krav som naturen ikke oppfyller.

Bohr forteller at Einstein allerede i 1927 stilte spørsmålet " *..ob der liebe Gott würfelt.*"<sup>25</sup>

- (2) Ved å påføre naturen komplementaritet, et begrep som ikke forklarte noe som helst og som sperret for videre forklaring, tilslo Bohr fenomenene.

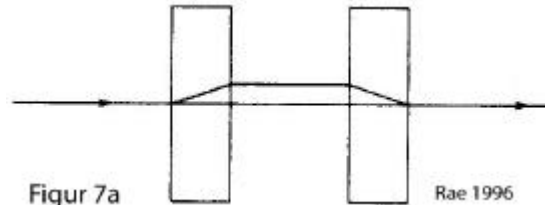
<sup>23</sup> Zeilinger 2003 s. 180

<sup>24</sup> I QUANTUM THEORY WITHOUT REUCTION, Adam Hilger forlag 1990, s. 21f viser Zeilinger at saken er langt fra enkel eller avsluttet.

<sup>25</sup> Bohr 1959 s. 61

### Polarisasjonseksperiment med ett foton<sup>26</sup>

Ved hjelp av kalsitt kan en strøm av fotoner med tilfeldig polarisering splittes i to fotonstråler. Den ene med horisontal  $\vec{E}$  og den andre med vertikal  $\vec{E}$ . Rett bruk av en annen kalsittkrystall kan igjen samle de to strålene til én stråle.



Figur 7a

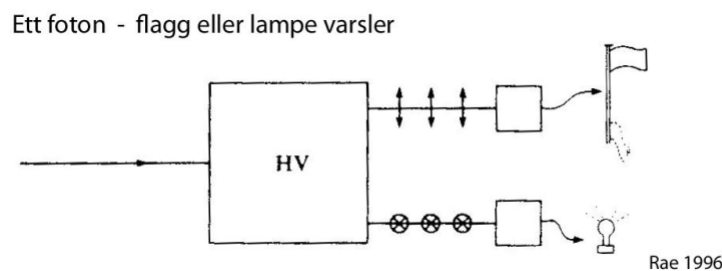
Rae 1996

Fig 7 Polarisering, depolarisering

Strålen med horisontal komponent får litt lenger vei. Det er kompensert med større hastighet, slik at begge strålene kommer ut av krystallen i samme fase.

### Hva skjer dersom vi gjør polarisasjonseksperimenter med bare ett foton?

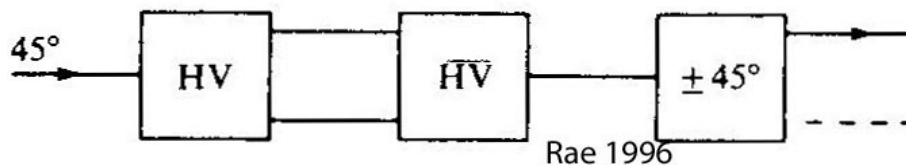
La fotonet er polarisert slik at  $\vec{E}$  danner  $45^\circ$  med vertikalen. Da er det tilfeldig om fotonet blir registrert ved den horisontale kanalen (H) eller ved den vertikale kanalen (V).



Rae 1996

Fig 8 Polarisering, Ett foton

Hva så om vi bruker en oppstilling som samler banene med horisontal eller vertikal polarisering? Resultatet er at fotonet kommer ut med polarisasjon  $45^\circ$  med vertikalen.<sup>27</sup>



Rae 1996

Fig 9 Polarisering, depolarisering, Ett foton

<sup>26</sup> Fremstillingen bygger på Rae 1996, kapitlene 2 og 4.

<sup>27</sup> Rae 1996 s. 90

Dette overrasker og har gitt mye hodebry.<sup>28</sup> Det er nærliggende å si som så: Ett foton må gå gjennom enten H- eller V-kanalen. Burde det da ikke komme ut med polarisasjon H eller V ?

Problemet oppstår bare for fysikere som ubevisst er realister. For Bohr derimot vil dette ikke være noe problem. Han kan ikke si noe om bane eller polarisasjon uten at det foreligger en måling, men ved måling på ett foton er hele eksperimentet ødelagt.

I tilknytning til figur 11 sier Rae at dette lett kunne forklares om fotonet var en bølge som tok begge veier, men at eksperimenter med foton tellere viser at fotonet ikke kan deles.

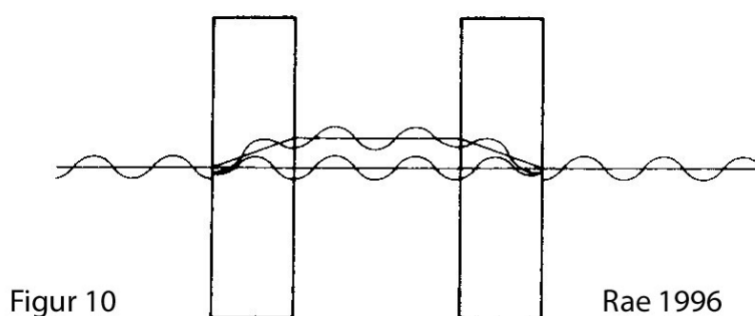
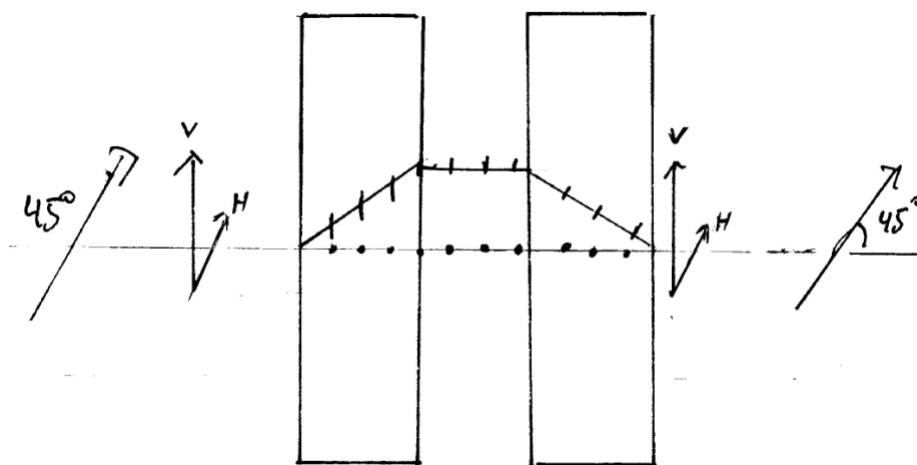


Fig 10 Var det bare bølger!

### Vår forklaring

Rae har rett i at fotonet som bølge forklarer. Han er bare ikke klar over at fotonet brer seg som bølge og kan være delt fram til det vekselvirker med et elektron. Fotonet med  $45^\circ$  polarisering deler seg i en H-bølge og en V-bølge ved den første krystallen. Ved den neste krystallen samles de igjen til en bølge med  $45^\circ$  polarisering.



Figur 11 Vår løsning

---

<sup>28</sup> Rae 1996 s. 96f

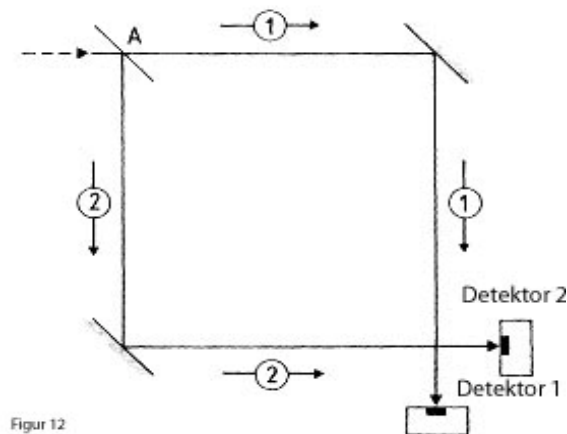
### Ekspirement med forsinket valg<sup>29</sup>

Først litt om halvt-reflekterende speil og Mach-Zender interferensmåler.

-Et halvt reflekterende speil slipper gjennom halve antall fotoner og reflekterer det halve antall fotoner. På figuren vises det med 1 stråle inn og 2 stråler ut.

-En Mach-Zender interferensmåler lager to baner for strålingen. Ved inngangen splitter et halvt-reflekterende speil strålen. Hver stråledel blir reflektert slik at strålene senere passerer hjørnet diagonalt til A i det kvadratet strålene danner. Et nytt halvt reflekterende speil kan settes inn ved dette punktet, kalt B.

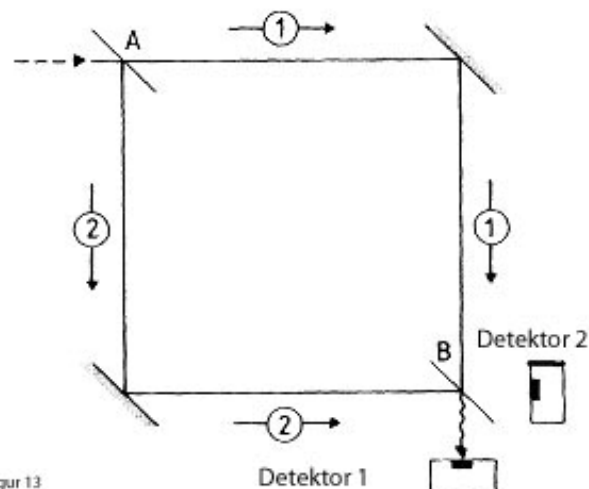
Først lar vi en stråle komme inn ved A uten å sette inn speilet ved B. Banene løper da fram til hver sin fotonteller. Tellerne vil bekrefte at like mange fotoner har tatt bane 1 som de som har tatt bane 2.



Figur 12

Figur 12 Oppstilling uten speil B

Så setter vi inn det halvt reflekterende speilet. Det kan justeres slik at bare Detektor 1 registrer fotoner. Vi kaller dette Stilling 1. En annen justering gir fotoner bare til Detektor 2. Vi kaller posisjonen for Stilling 2.



Figur 13

Figur 13 Oppstilling med speil B

<sup>29</sup> fremstillingen bygger på Zeilinger 2003 IV,8.

Nå er tiden inne til å sende bare ett foton mot A. Med speilet ved B i Stilling 1 blir fotonet registrert av Detektor 1. Med speilet ved B i Stilling 2 blir fotonet registrert av Detektor 2.

Problem:

Hvordan kunne fotonet klare å velge den bane speil B var innstilt for?

### Skjerping av betingelsene.

På et tidspunkt etter at et foton har passert A, men før det har nådd B, blir noen ganger Stilling 1 valgt. Andre ganger blir stilling 2 valgt. Hver gang blir fotonet registrert av den detektor som svarer til innstillingen av speil B. (Herav navnet 'Forsinket valg'.)

### Kommentar fra spesialister

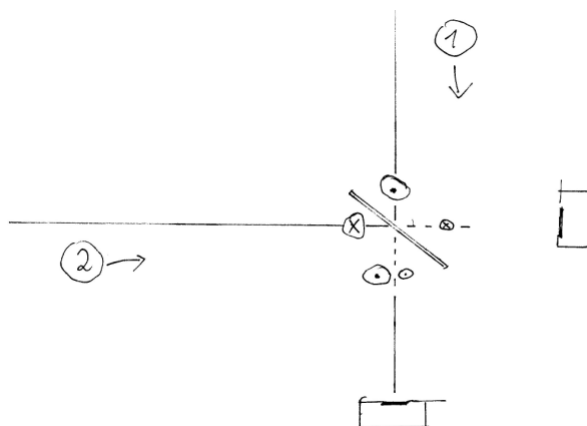
*John A. Wheeler.* "...fotonet ... tar bare en vei, men det tar begge veier. Det tar begge veier, men det tar bare en vei. For en galskap! Så tydelig er det at kvanteteorien er motsetningsfull."

*Anton Zeilinger* om hva Bohr ville ha sagt: Det er ingen motsetning. Vi må ta hele forsøksoppstillingen med i betraktning. .. Når et halvt reflekterende speil er satt inn, kan vi ikke si noe om veien fotonet har tatt. ... Det interessante med kvanteteorien er at begge muligheter er åpne inntil vi har observert.

### Vår tolkning

Fotonet er en reell bølge som kommer til A. Fotonet splittes i to bølger. Den ene følger bane 1 og den andre bølgen følger bane 2.

Sett at speil B står i stilling 1. Nå kommer den ene fotondelen langs bane 1 og den andre langs bane 2. Vi antar at det halvt reflekterende speilet delvis reflekterer på en ene siden og slipper fotoner som treffer "baksiden" rett gjennom. I stilling 1 er speilet stilt slik at den virksomme delen vil gi delvis refleksjon av fotondelen fra bane 2. I tillegg står speilet slik at fotondelene fra bane 1 og bane 2 møter hverandre i motfase. Da vil fotondelene på vei mot teller 1 forsterke hverandre til 3/4 av et foton. Vekselvirkning med et elektron i telleren oppstår og hele fotonet samles og blir registrert i teller 1.



Figur 14 Fra speil B til Teller 1

Til figuren: For enkelhets skyld lar vi  $\vec{E}$  stå vinkelrett på planet banene er tegnet i. Radien i sirkelen rundt  $x$  eller  $\cdot$  antyde forskjell i amplituder. Tilsvarende vil speil B i stilling 2 splitte fotondelen fra bane 1 og bølgedelen møte hverandre i motfase. Det gir registrering i teller 2.

### Komplementaritet mellom kunnskap om banen og registrering?

Vi setter inn en detektor i en av banene. La oss si bane 1. Den registrerer et foton, men verken Detektor 1 eller Detektor 2 registrer noe foton. Anton Zeilinger bruker komplementaritet mellom informasjon og interferens som forklaring.

Svar:

Vi vil heller si at en teller satt inn i bane 1 tvinger fram en vekselvirkning mellom fotonet og et elektron. Da kollapser begge bølgedelene og lokaliseres der vekselvirkningen foregår. Et helt foton er da registrert i bane 1. Det er ikke noe foton igjen som kan nå fram til en av detektorene 1 eller 2.

### **Ny innsikt**

Det er ikke underveis i bane 1 eller 2 fram til speil B valg av Teller 1 eller Teller 2 blir bestemt. Det avgjørende er fasene de to bølgedelene er i når de møtes ved speilet B. Fotonet kommer fram til rett detektor på grunn av den posisjon speil B har. Sagt med andre ord: Proessen skjer lokalt ved det halvt reflekterende speilet.

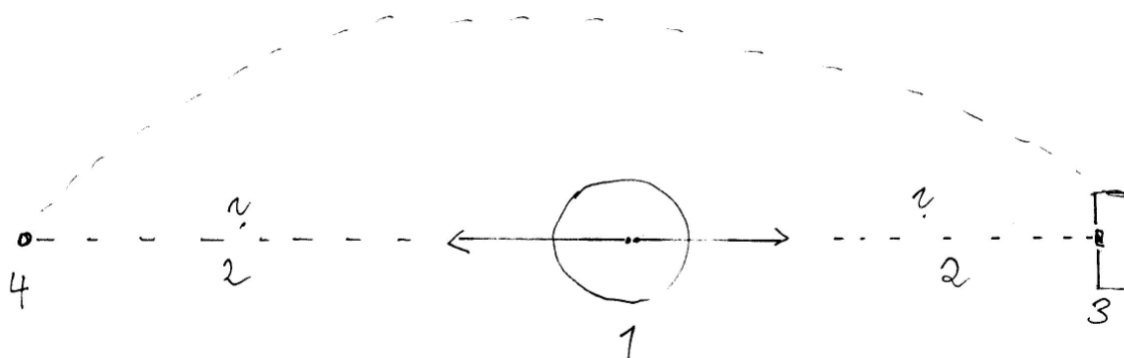
Det er ikke noe spøkelse i atomet som kan gi oss en fjernvirkning. Denne innsikten vil vi ta med oss og se på EPR-eksperimentene.

## **EPR-eksperimentene, EPR-binding, sammenfiltrering**

Einstein var kritisk til kvanteteorien og lette etter svakheter. Siste bidrag kom i 1935 i en avhandling skrevet sammen med to assistenter. Einstein, Podolsky og Rosen brukte et tankeeksperiment: En kjerne sender ut to partikler. Etter den aksepterte tolkningen av kvanteteorien er partiklene i en mellomtilstand som er superposisjonen av alle mulige tilstander. Først når en av partiklene er observert, kjenner vi denne partikkelens tilstand. Ikke nok med det. Når den ene partikkelens tilstand er kjent, vil denne kunnskap sammen med de kjente bevaringslovene, fortelle om tilstanden til den andre partikkelen. Partiklenes tilstander er bundet sammen. Schrödinger rettet oppmerksomheten mot denne bindingen og brukte ordet *Verschränkung* til å beskrive koplingen. På norsk sier vi *sammenfiltrering*.

Tankeeksperimentet er senere utviklet til gruppe eksperimenter, gjerne kalt EPR-eksperimenter. Det er gjennomført mange slike målinger, noen ganger med elektroner, andre ganger med fotoner. Koincidensmålinger av to eller

flere partikler fra samme kilde til samme tid har bekreftet den antatte bevaring av bevegelseslover.



Figur 15 Sammenfiltring

- Trinn 1: Reaksjon i kjernen gir emisjon av 2 partikler.
- Trinn 2: Partiklene i bevegelse. Alle mulige tilstander er latent til stede.
- Trinn 3: Observasjon av den ene partikkelen gjør at tilstanden blir bestemt.
- Trinn 4: På et eller annet vis blir tilstanden til den andre partikkelen låst. Kjennskap til tilstanden til den observerte partikkelen og kunnskap om bevaringslovene forteller oss hvilken tilstand den andre partikkelen må ha.

### Kritikk

Slik sammenfiltring er forstått, bryter kvanteteorien med relativitetsterioden og gir et nytt paradoks. Paradokset er at sammenfiltring krever overføring av informasjon, men lyshastigheten setter en grense som synes å gjøre nødvendig informasjonsoverføring umulig.

Litt spøkefullt (?) blir det snakket et spøkelse eller en ånd som sørger for å oppfylle sammenfiltringen. Man kan spørre: "Er naturen slik?" eller "Er det modellen av naturen som ikke er god nok?"

Tankeeksperimentet "Heisenbergs mikroskop" ble flittig i den tidlige kvanteteorien til å begrunne at en observasjon påvirker det observerte objekt. Generalisering av dette til alle observasjoner er med god grunn trukket i tvil.<sup>30</sup> Vi har også sett at "forsinket valg"-eksperimentet forklares enkelt gjennom en lokal prosess forut for observasjonen.

Vi vil derfor igjen sette Bohrs syn til side og legge realisme til grunn ved tolkning av EPR-eksperimentene.

---

<sup>30</sup> Se fotnote 24.

### Vår tolkning

Når kilden sender ut to partikler <sup>31</sup>, er alle bevaringslover allerede oppfylt før partiklene slipper fri. Senere observasjon av én partikkel kan ikke forandre noe ved tilstanden til den andre partikkelen fra samme emisjon. Observasjonen sammen med bevaringslovene gir opplysninger om hvordan den andre partikkelen har vært helt fra den ble dannet.



Figur 16 Sammenfiltring?, Ny tolkning

- Trinn 1: Reaksjon i kjernen gir emisjon av 2 partikler. Hele prosessen er lokal. Tilstanden for partiklene er allerede bestemt.
- Trinn 2: Observasjon. Partikkelens tilstand blir kjent, men ikke endret.
- Trinn 3: Ut fra trinn 2 og bevaringslovene er tilstanden til også den andre partikkelen kjent.

Med denne tolkningen blir bruken av ordet "sammenfiltring" misvisende. Vi ville treffe bedre ved å gå over til å kalle partiklene fra samme emisjon for *tvillinger*. De er dannet i samme prosess og viser indre slektskap gjennom at de samlet oppfyller bevaringslovene.

Den nye tolkningen rører ikke observasjonene. Alle de observasjoner som foreligger vil fortsatt stemme. Vi har bare funnet en enklere forklaring. En forklaring som viser at lokalitetskravet er oppfylt i prosessen.

---

<sup>31</sup> Av mangel på bedre ord har vi skrevet 'partikkel' selv om det utsendte objekt kan være en bølge.

## Konklusjon

### 1

Med en modell som forklarer bølge-partikkel dualismen sammen med bruk av fysisk realisme, har vi vist at grunnleggende prosesser som interferens og refleksjon av lys er forenlig med denne modellen. Videre bruk av denne modellen sammen med kjente prinsipper fra klassisk fysikk har løst flere paradokser der den tradisjonelle tolkning står fast.

Dette har gitt mulighet for en kvalitativ behandling av kvantefenomener. Det åpner for meningsfull innføring i kvanteverdenen uten bruk av en vanskelig tilgjengelig formalisme.

En tolkning som bygger på fysisk realisme åpner for nye eksperimenter og stimulerer til videreutvikling av teorien.

Når vi kan anta at kvantemekanikkens bølgefunksjoner beskriver reelle bølger, trenger det ikke være noen motsetning mellom kvalitativ og kvantitativ behandling av kvantefenomener.

### 2

Med filosofisk idealisme kombinert med positivisme som plattform, har kvanteteorien fått en tolkning som gir uforklarte paradokser. Komplementaritet har ikke forklart noe, bare tilslørt problemene. Det viser at tiden er moden for å gå over til en ny tolkning.

### 3

Filosofi og naturforskning har gjennom tidene påvirket hverandre gjensidig. Naturforskningen må hente verdensbilde, metoder og begreper fra filosofien, mens filosofien kan finne arbeidsoppgaver fra naturforskningen. Noen ganger kan naturforskning gi ny innsikt som gjør at gamle filosofiske oppfatninger må vike.

Arbeidet med en ny tolkning av kvantemekanikken har vist at positivisme ikke strekker til når man går fra overfladisk beskrivelse til fundamentale problemstillinger.

Selv om vi ikke kan sette likhetstegn mellom "Das Ding für mich" og "Das Ding an sich", kan fysikk sette sammen observerte brokker til et samlet bilde av en verden på et nivå bakenfor den synlige verden.<sup>32</sup>

*Når utgangspunktet er galest,  
blir resultatet titt originalest.*

Sa Henrik Ibsen gjennom Per Gynt.

---

<sup>32</sup> Jfr. note 6.

## Litteratur som drøfter tolkning av kvanteteorien med liten bruk av formalismen

- Camejo, Silvia Arroyo: Skurrile Quantenwelt  
Fischer Taschenbuch Verlag 2007  
Skrevet for ungdom, faglig fremragende og oppdatert.
- Davies, P.C.W. & J.R. Brown (red): THE GHOST IN THE ATOM  
Cambridge UP 1986  
Utskrift fra programserie i BBC der de fremste talsmenn fra ulike syn deltok.
- Rae, Alastair: Quantenphysik: Illusion oder Realität? Reclam 1986  
Oversatt fra engelsk, Cambridge UP 1986  
Grundig og til dels kritisk gjennomgang av de problemer kvanteteorien har gitt.
- Zeilinger, Anton: Einsteins Schleier C.H. Beck 2003  
Klar innføring og hjelp til å forstå kvanteteorien. Påviser problemene og støtter Bohrs løsning.
- "-- --"-- Einsteins Spuk Goldman 2007  
Grundig om EPR-binding og teleportasjon.

### Andre kilder

- Bohr, Niels: Atomfysik og menneskelig erkendelse J.H. Schultz Forlag 1959
- "-- --"-- Atomteori og natutbeskrivelse Fakkeltok 1969
- Magee, Bryan: Popper Fontana 1973
- Pais, Abraham: Niels Bohr's Times Clarenddon Press 1991
- Schilpp, P.A.(red): Albert Einstein Philosopher - Scientist  
Harper Torchbook 1959