



Resume

Denne opgave gennemgår dobbeltspalteeksperimentet og de kvantefysiske egenskaber der hører til dette eksperiment, samt en analyse af eksperimentet, og de filosofiske overvejelser Niels Bohr gjorde sig omkring eksperimentet, og dens betydning for fysikkens forhold til virkeligheden. Desuden vil opgaven gennemgå nogle af de teorier og metoder, der bliver brugt til at beskrive den kvantefysiske verden. Opgaven vil benytte sig af informationssøgning, empiri, og analyse af relevante filosofiske skrifter, til at undersøge og beskrive kvantefysikken og dobbeltspalteeksperimentet. Dobbeltspalteeksperimentet bruges til at vise hvordan hele universet har egenskaber der svarer til både bølger og partikler, da forsøget har vist, at alt kan have bølgeegenskaber, men alligevel opfører sig som en partikel hvis forsøget ændres lidt eller observeres på. Selvom lys kan opføre sig som en bølge, fandt Einstein ud af at lys også kan udvise partikelegenskaber, som små samlinger af energi kaldet fotoner. Ligeså fandt fysikeren De Broglie ud af at alt i universet har en bølgelængde, og at denne afhænger af objektets momentum. Schrödinger fandt frem til en ligning, der kunne bruges til at beskrive sandsynligheden for at et objekt ville vise sig bestemte steder når de blev observeret, ved brug af sandsynlighedsamplituder. Disse sandsynlighedsamplituder og Heisenbergs usikkerhedsprincip, betyder dog også at det i den kvantefysiske verden er umuligt at observere at objekts momentum og position samtidig. Niels Bohr prøvede at komme med en komplet forklaring på de nye uvante kvantefysiske fænomener, denne blev kaldt Københavnerfortolkningen. Her pointerede Bohr hvordan partikel/bølge-dualiteten var komplementære, egenskab udelukker altså den anden, men begge er lige vigtige for beskrivelsen af fænomenet. Ligeledes lagde han vægt på at det fælles sprog har sine begrænsninger i beskrivelsen af den kvantefysiske virkelighed, og måleinstrumenters indflydelse på fænomenerne i undersøgelsen af kvantefysikken.



Indholdsfortegnelse

Resume.....	1
Indledning	3
Hovedafsnit	4
Partikler og bølger	4
Dobbelt-spalte-eksperimentet.....	7
Schrödingers ligning.....	12
Københavnertolkningen.....	14
Det fælles sprog.....	16
Måleinstrumenternes indflydelse	18
Konklusion.....	22
Litteraturliste.....	24
Bilag.....	25



Indledning

*”Enhver løsning på et problem rejser nye og uløste problemer. Og jo dybere det oprindelige problem var, og jo dristigere dets løsning, jo flere problemer rejser det. Jo mere vi lærer om verden, og jo dybere vor erkendelse bliver, desto mere bevidst, specifik og klar vil vor viden blive om det, vi ikke véd, vor viden om vor uvidenhed. **Thi dette er faktisk hovedkilden til vor uvidenhed – den kendsgerning, at vor viden kun kan være endelig, men vor uvidenhed nødvendig må være uendelig.**”¹*

Op gennem starten og midten af det 20. århundrede foregik der en stor diskussion om hvordan den atomare verden skulle opfattes, og hvilken betydning opdagelsen af denne havde for fysikken og den menneskelige virkelighedsopfattelse. Thomas Youngs dobbeltspalte eksperiment fra 1801 havde vist at lys kunne opføre sig som bølger, men med Einsteins relativitetsteori blev det bevist at lys også kunne udvise partikelegenskaber, og på samme måde blev det senere opdaget at alt i universet udviste denne partikel/bølge-dualitet. Det blev også klart at observationen af de kvantefysiske fænomener havde en stor betydning, da dette ændrede resultatet af forsøgene. Disse nye opdagelser brød med alle etablerede regler der allerede var i den klassiske fysik, og krævede en helt ny beskrivelse af både fysikken og virkeligheden. Denne beskrivelse kom i form af Niels Bohrs Københavnerfortolkning, der gav en ny beskrivelse af fysikken, og som i dag bliver brugt som en generel beskrivelse af kvantefysik. Bohr satte fokus på problemer i den klassiske fysik, der indtil da ikke havde været relevante, som måleudstyrets indflydelse på forsøgene og sprogets begrænsninger til at beskrive virkeligheden.

Denne opgave beskæftiger sig med dobbeltspalteeksperimentet, og dennes betydning for den videnskabelige udvikling i fysik. Dette gøres ved først at gennemgå relevante fysiske egenskaber der optræder i dobbeltspalte og derefter udfører eksperimentet med vandbølger og lys, og analysere på disse resultater. Herefter gives en beskrivelse af dobbeltspalteeksperimentets betydning for fysikken, og hvilke paradokser og modsætninger dette frembringer. Ydermere analyseres relevante filosofiske tekster af Niels Bohr, der beskriver dobbeltspalteeksperimentet og menneskets begrænsede evne til at opfatte dette, både på grund af begrænsningerne i sproget og måleudstyrets indflydelse på eksperimentet.

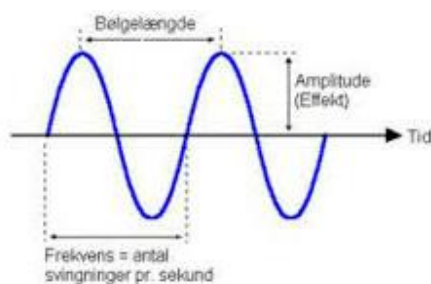
¹ Jessen, Keld B. og Peter Laurs Sørensen. *Erkendelse og virkeligheden*. s. 67

Hovedafsnit

Partikler og bølger

I dobbeltspalteeksperimentet er der to fysiske begreber der er vigtige, ”partikler” og ”bølger”. En partikel beskrives med en masse og et rumfang, og dens position bliver beskrevet i tid og rum, og ofte bruges kugler som beskrivelse for deres fysiske egenskaber. Det er også vigtigt at understrege at partikler ikke kan være samme sted, ligesom to kugler der støder sammen, ville give hinanden kræfter der ville ændre på deres bane, men de ville ikke være samme sted.

Bilag 1 Ifølge FysikABbogen1 er en bølge ”svingninger, der forplanter sig i rummet eller i et stof”².



Altså er bølger en form for gentagende bevægelse, der kan blive stærkere eller svagere. Bølger beskrives matematisk med sinuskurver, hvor der tales om *amplitude* (A), *frekvens* (f), og *bølglængde* (λ) til at beskrive bølgen. *Amplituden* er bølgens højde, altså hvor meget den maksimalt ændrer sig fra sin hvileposition, punktet hvor dette sker kaldes en bølgetop eller bølgedal. For eksempel er amplituden for en bølge i vandet, der hvor bølgetoppene, eller bølgedalene er henholdsvis højest eller dybest i forhold til den stationære vandoverflade, altså hvordan vandet ville være hvis der ikke var nogen påvirkning. En bølges *frekvens* er hvor mange bølgetoppe der er pr. sekund, i eksemplet med vandbølger ville dette svare til at måle ved ét punkt og se hvor mange gange dette punkt ville få en bølgetop i løbet af ét sekund, dette måles i Hertz (Hz). *Bølglængden* beskriver hvor langt der er fra bølgetop til bølgetop. Ved vandbølger ville det svare til at kigge på en bølge, der hvor den er på sit højeste, og så måle hvor langt der er, til den er på sit højeste igen.

En af de vigtigste egenskaber ved bølger, med hensyn til Youngs dobbeltspalte eksperiment og partikel/bølge-dualismen, er *interferens*. Interferens er et udtryk for det der sker, når to bølger mødes og reagere med hinanden, eller interferere. Interferens kan beskrives som at de to bølgers amplitude adderes altså vil bølgetoppe der mødes blive forstærket og ligeledes vil bølgedale der mødes blive forstærket, dette kaldes *konstruktiv interferens*. Hvis en bølgetop og bølgedal med samme amplitude i hver sin retning mødes, vil disse udligne hinanden og bølgen vil her gå tilbage til sin hvileposition,

² Elvekjær, Finn og Torben Benoni. *FysikABbogen1*. s. 202



dette kaldes *destruktiv interferens*. Når to bølger interfererer, ændre det dog ikke på dem individuelt, og efter endt interferens vil de fortsætte videre som før interferensen.

Bilag 2

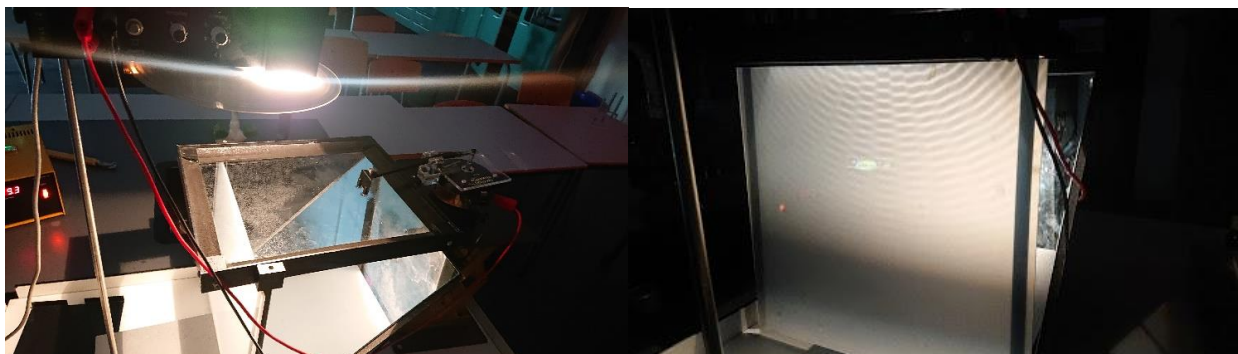


Konstruktiv og destruktiv interferens kan bevises eksperimentelt ved at placere en bølgegenerator med to punkter i et kar med vand, så der bliver genereret to bølger med samme frekvens der kan interferere med hinanden. I karrets sider er der dæmpende skum, så bølgerne ikke bliver skubbet tilbage og forstyrre forsøget med yderligere interferens. Samtidig i forsøget belyses bølgerne med lys, der kører på den samme frekvens som bølgegeneratoren, dette lys sendes ned på et blankt spejl der står i en vinkel, så det blive projekteret op på et stykke mat glas. Dette gør det muligt at se bølgerne som stationære uden deres bevægelse, da de kun bliver lyst op når bølgen har bevæget sig én bølgelængde.

Bilag 3

Bølgegeneratoren der skaber bølger mens der lyses ned på disse og lyset sendes over på et mat stykke glas

Billede af bølgerne der bliver projekteret op på den matte glasplade.





Her er det tydeligt at se hvordan bølger interfererer, ved at de steder hvor to bølgetoppe eller bølgedale mødes opstår der konstruktiv interferens, og der hvor en bølgetop og bølgedal mødes opstår der destruktiv interferens. De bølger der opstår ved et forsøg som dette, hvor bølgerne har udspring fra ét punkt i vandet, og derefter fortsætter ud i en cirkulær bevægelse kaldes for *ringbølger*. Når ringbølger interfererer, og der opstår flere af disse steder hvor der er konstruktiv interferens der bliver adskilt af destruktiv interferens, kaldes de forskellige steder hvor der er konstruktiv interferens for ordener, *ordener*. En orden er en måde at beskrive hvilken en af de konstruktive interferenser der er tale om. 0. orden er den der kommer lige ud fra de originale bølger, 1. orden er de to på hver side der er tættest på, 2. orden er ved siden af 1. orden og så fremdeles. Disse ordener har også en vinkel på 0. orden, denne kaldes θ_n , hvor n beskriver hvilken orden den er vinkel til.

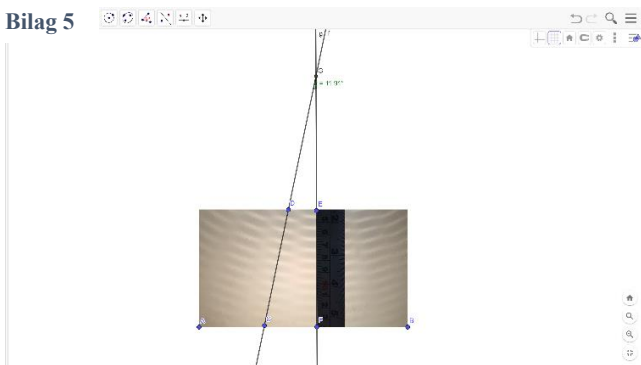
Ud fra dette kan bølgeformlen bestemmes, hvor enten bølgelængden (λ), længden mellem de to ringbølgers centrum (d), hvilken orden af bølger der er tale om (n), eller vinklen mellem ordenerne (θ_n), kan findes ud fra formlen: $n * \lambda = d * \sin(\theta_n)$. Længden mellem de to bølgers centrum er på ca. 3,6

Bilag 4 cm. Bølgelængden kan bestemmes ved at måle hvor langt der er mellem bølgetoppene



Ud fra billedet bestemmes bølgelængden ved at måle længden af et bestemt antal bølgetoppe, og derefter beregne en enkel bølgelængde. 7 bølgetoppe har en længde på 5,2 cm, derfor må λ være på ca. 0,74 cm. Vinklen kan bestemmes ved brug af GeoGebra

Bilag 5

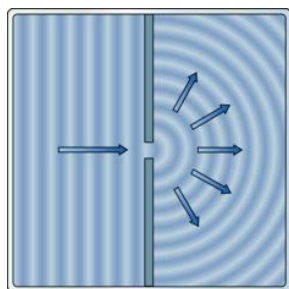


Altså må vinklen til 1. orden (θ_1) være på ca. $11,9^\circ$. Ud fra dette kan det nu bestemmes om formlen passer til dette forsøg: $1 * 0,74\text{cm} = 3,6\text{cm} * \sin(11,9) \leftrightarrow 0,74\text{cm} = 3,6\text{cm} * 0,206 \leftrightarrow 0,74\text{cm} = 0,74\text{cm}$ da begge sider af lighedstegnet er det samme, passer formlen altså.

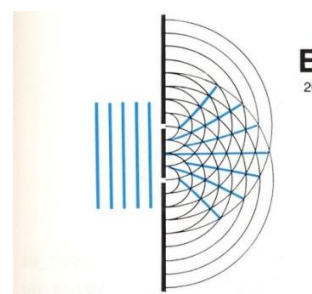
Den sidste vigtige egenskab ved bølger i forhold til dobbeltspalteeksperimentet er afbøjning. Afbøjning er hvis en bølge bevæger sig over til en overflade, med en spalte. Hvis spaltens bredde er lille i forhold til bølgelængden (λ), vil der blive lavet en ringbølge, hvor spalten vil agere som ringenes centrum. Dette betyder at hvis der sættes to eller flere spalter op efter hinanden, vil der blive lavet flere ringbølger, som vil kunne interferere med hinanden, altså kan en bølge interferere med sig selv, da den ”deles op” i flere ringbølger, hvorefter disse interferere med hinanden. I dette tilfælde kan formlen $n * \lambda = d * \sin(\theta_n)$ også bruges, da forsøget med bølgegeneratoren, giver de samme betingelser som en bølge der bliver afbøjet i to spalter.

Bilag 6

Afbøjning af en bølge gennem en enkelt spalte



Afbøjning af en bølge gennem to spalter, hvorefter den interfererer med sig selv, de blå linjer viser den konstruktive interferens



Dobbelt-spalte-eksperimentet

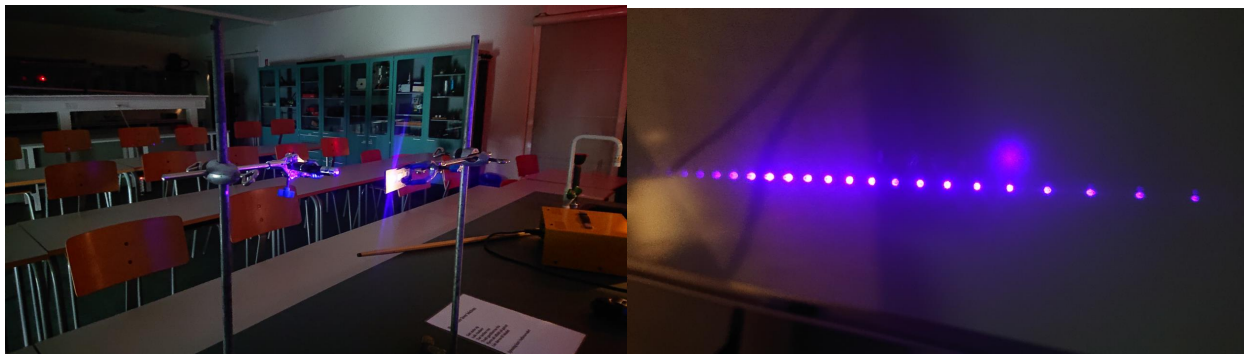
Dobbeltspalteeksperimentet er et af de vigtigste eksperimenter inden for kvantemekanik, og det er et af de mest omtalte eksperimenter i kvantefysik og for teorien om partikel/bølge-dualitet. Eksperimentet blev første gang udført af Thomas Young i 1801, for at demonstrere at lys var en bølge. Indtil da var man ikke sikker på hvad lys var, men mange mente at det var en strøm af partikler, lidt ligesom kugler fra en pistol, dette ændrede dobbeltspalteeksperimentet dog på. Eksperimentet foregår sådan at der er en lyskilde, dengang var det solen, som rammer ind på en plade med to smalle spalter. Hvis så lys opfører sig som partikler, ville der bare blive vist to streger på den anden side af pladen. Hvis lyset derimod har bølgeegenskaber, vil disse bølger blive afbøjet, og der vil blive dannet to ringbølger med spalterne som centrum, hvorefter disse ville kunne interferere med hinanden. Da Young så

observerede et interferensmønster, var det altså oplagt at betragte lys som en bølge da det udviste tydelige bølgeegenskaber.

Bilag 7

Opstilling af dobbeltspalteeksperimentet med en laser

Interferensmønstret der opstår ved dobbeltspalteeksperimentet

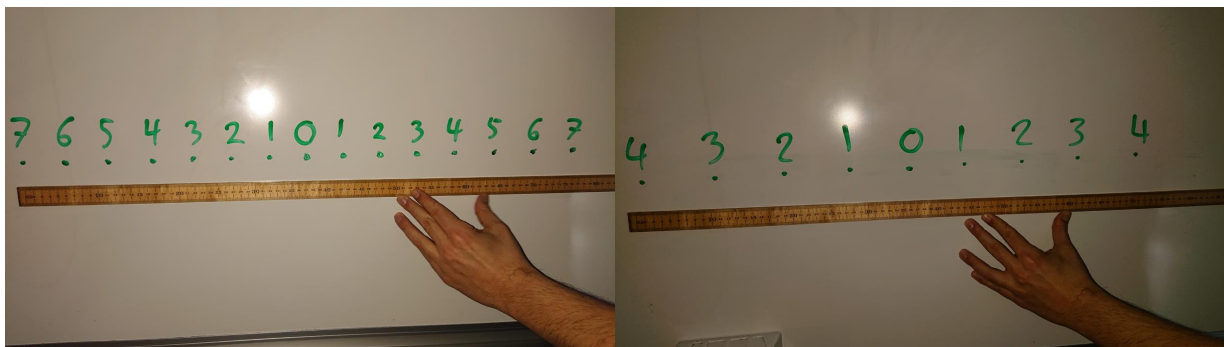


I det ovenstående eksperiment er forsøget opstillet med en laser. Her ses det også tydeligt at selvom der kun er én lyskilde, laseren, opstår der mange forskellige punkter på tavlen, hvilket tyder på at der sker interferens efter at lyset bliver sendt gennem spalterne. Ved at bruge udregning for interferens med ringbølger kan det også ses at det passer overens med at der bliver dannet to ringbølger. Der var ca. 1.26 m mellem gitteret og tavlen, og afstanden mellem rillerne var på 0.01 mm, og afstanden mellem ordenerne for en lilla og rød laser blev målt med lineal:

Bilag 8

Lilla

Rød



Vinklen θ kan nu udregnes ved brug af tangens, hvorefter formelen denne kan indsættes i ligningen,

$$\lambda * n = d * \text{Sin}(\theta_n)$$



$$\tan(\theta_n) = \frac{\text{Modstående katete}}{\text{Hosliggende katete}}$$

$$\tan(\theta_{1\text{lilla}}) = \frac{5\text{cm}}{1.26\text{m}} \leftrightarrow \theta_{1\text{lilla}} = 2,27$$

$$\lambda_{\text{lilla}} * 1 = 0,01\text{mm} * \sin(2,27) \leftrightarrow \lambda_{\text{lilla}} = 396.09\text{nm}$$

$$\tan(\theta_{2\text{lilla}}) = \frac{10.5\text{cm}}{1.26\text{m}} \leftrightarrow \theta_{2\text{lilla}} = 4.76$$

$$\lambda_{\text{lilla}} * 2 = 0,01\text{mm} * \sin(4.76) \leftrightarrow \lambda_{\text{lilla}} = 414.91\text{nm}$$

$$\tan(\theta_{1\text{rød}}) = \frac{8\text{cm}}{1.26\text{m}} \leftrightarrow \theta_{1\text{rød}} = 3.63$$

$$\lambda_{\text{rød}} * 1 = 0,01\text{mm} * \sin(3.63) \leftrightarrow \lambda_{\text{rød}} = 633.13\text{nm}$$

$$\tan(\theta_{2\text{rød}}) = \frac{17\text{cm}}{1.26\text{m}} \leftrightarrow \theta_{2\text{rød}} = 7.68$$

$$\lambda_{\text{rød}} * 2 = 0,01\text{mm} * \sin(7.68) \leftrightarrow \lambda_{\text{rød}} = 668.20\text{nm}$$

Som det kan ses, passer bølgelængderne med tabelværdierne for de pågældende farver, som er på 405 nm for en lilla laser, og 650 nm for en rød laser. De forskelle der er i resultaterne for bølgelængderne, kommer højst sandsynligt fra måleusikkerhed. Både længden mellem gitteret og tavlen, og længden mellem ordenerne kan være målt forkert.

Dobbeltspalteeksperimentet, og lysets interferens, gjorde at der i en lang periode var en generel opfattelse af lys som kun værende en bølge, det eneste spørgsmål dette fremsatte var, at en bølge skal have noget at svinge i, og der skal være noget der svinger, for at en bølge opstår. Disse svar kom senere med Einsteins fotoelektriske effekt og relativitetsteorien, hvor lys blev beskrevet med partikelegenskaber som små energipakker, der senere hen er blevet kaldt fotoner. Denne teori kom ud fra at ultraviolet lys, når skudt ind på en negativt ladet metalplade, forårsagede at den mister pladen sin ladning, mens almindeligt lys intet gjorde. En bølge ville jo ikke kunne gøre dette ved elektronerne, så der måtte være noget der "skubbede" elektronerne væk, hvilket blev forklaret som disse små energipakker af lys. Fotonernes energi var altså højere i ultraviolet lys end i almindeligt lys, hvilket gjorde at de kunne "skubbe" til elektronerne. Einsteins formel $E = mc^2$, viser ligeledes at der er en



sammenhæng mellem energi og masse, hvilket fremmer teorien om at lys som partikler af små energipakker.

Dobbeltspalteeksperimentet viste altså lys som en bølge, mens Einsteins teorier beskrev det med partikelegenskaber. Senere er dobbeltspalteeksperimentet dog blevet udført, hvor en af spalterne lukkes, og så forsvinder bølgenaturen. I dette tilfælde begynder lyset igen at opføre sig som en partikel. I stedet for et interferensmønster eller bølgemønster, vil der bare komme en streg af lys ud fra den åbne spalte, ligesom hvis det var partikler eller kugler der blev skudt igennem. Hvis begge spalter nu åbnes, men der sørges for kun at sendes enkelte fotoner igennem ændres resultatet endnu en gang. De første par gange vil mønstret se tilfældigt ud, men hvis forsøget får lov til at køre i lidt tid, begynder der at danne sig et interferensmønster. Det må altså enten betyde at fotonen deler sig op og går gennem hver sin spalte så den kan interferere med sig selv, hvilket ville bryde med den klassiske fysik, da der per definition ikke kan være to partikler det samme sted, det der kaldes superposition hvilket er det der sker når bølger interferere. Det kan også være et tegn på at fotonen "ved" at der er to spalter åbne og den så skal følge en bestemt retning. Det kunne også være noget helt tredje, et fænomen der ikke er muligt for mennesker at observere eller beskrive.

Disse partikel/bølge-egenskaber gælder ikke kun for fotoner, faktisk har alt i verden disse egenskaber, og dobbeltspalteforsøget er blevet udført med molekyler opbygget af mere end 100 atomer.

Forsøget bliver dog sværere at udføre jo større objekterne er, da spalterne skal være mindre end deres naturlige bølgelængde, og denne afhænger af objekternes momentum, som afhænger af farten og størrelsen på et objekt. Dette kan også udledes af De Broglie's ligning der siger at en genstands bølgelængde (λ) er lig Plancks konstant (h) delt med genstandens momentum $\lambda = \frac{h}{p}$. Da momentum afhænger af både fart og masse, $p = v * m$, skal spalterne altså gøres mindre, jo større objekter der skal sendes igennem. Et eksperiment hvor dette blev eftervist var Davisson-Germer eksperimentet, som i sin essens lignede dobbeltspalteeksperimentet. I stedet for lys blev der brugt elektroner med en bestemt energi, og i stedet for et gitter blev der brugt en krystal. Her blev elektronerne sendt forskellige energier, hvilket gav forskellig fart, og ved at bruge formlerne for kinetisk energi, momentum, og De Broglie's ligning, var det muligt at finde disse elektroners bølgelængde. Følgende eksempel er for en elektron, der har en kinetisk energi på 54 eV.



$$E_{kin} = \frac{1}{2} * m * v^2$$

$$54eV = \frac{1}{2} * 5.489 * 10^{-4}u * v^2 \leftrightarrow v = 4.3571 * 10^6 \frac{m}{s}$$

$$p = v * m$$

$$p = 4.3571 * 10^6 \frac{m}{s} * 5.489 * 10^{-4}u = 3.9714 * 10^{-24} \frac{kg * m}{s}$$

$$\lambda = \frac{6.6261 * 10^{-34}J * s}{3.9714 * 10^{-24} \frac{kg * m}{s}} = 0.167nm$$

Dette betyder altså at spalten skal være 0.167nm bred eller smallere, for at der kan observeres bølgeegenskaber hos denne elektron, da dette vil være den bølgelængde. Hvis bølgelængden for en person på 80 kg der bevæger sig med en hastighed på 0,1 km/t udregnes, bliver spalten selvfølgelig mindre

$$p = 80kg * 0,1 \frac{km}{t} = 0,8 \frac{kg * km}{t}$$

$$\lambda = \frac{6.6261 * 10^{-34}J * s}{0,8 \frac{kg * km}{t}} = 2.9817 * 10^{-25}nm$$

Altså selvom denne person bevæger sig rimelig langsomt, er det en ufattelig lille spalte den skal igennem, da dens momentum er så stort. Hvis dette skal kunne lade sig gøre skal personen op på meget højere hastigheder, men dette vil så igen øge dens momentum, hvilket vil lede til at spalten skal være endnu mindre. Dette er grunden til at der normalt ikke observeres bølgenatur på alt i verden.

Så partiklernes egenskaber ændres altså alt efter om der er én eller to spalter åbne, og partikel/bølgedualiteten gælder for alle objekter i verden. Hvis nu et nyt forsøg opstilles med en elektronpistol der skyder elektroner ind på en plade med to spalter der har en bredde mindre eller lig med elektronernes bølgelængde, som står foran en fotoelektrisk plade der vil kunne måle hvor elektronerne rammer, vil man som sagt se et interferensmønster. Hvis så der sættes et måleapparat på forsøget, der kan observere hvilken af spalterne elektronen passere gennem, inden den rammer skærmen sker noget langt mere usædvanligt. Der kommer ingen resultater der tyder på at elektronen bliver delt op i to og passere gennem hver spalte og interferer med sig selv. Det kan tydeligt måles hvilken spalte elektronen



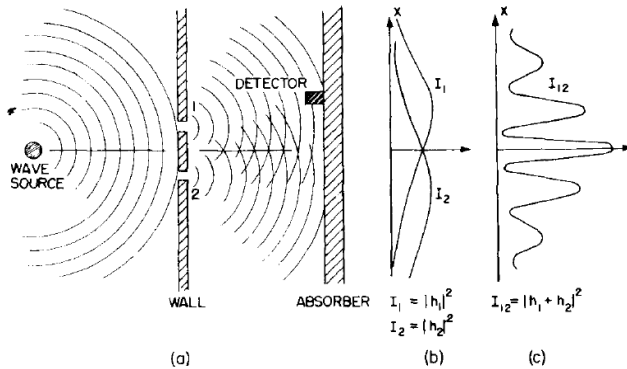
passere gennem, interferensmønstret forsvinder, og i stedet for opstår der et tilfældigt partikellignende mønster på den fotoelektriske plade. Det har altså haft en indflydelse på forsøget at det er blevet observeret, og da interferensmønstret viser sig igen hvis måleapparatet frakobles, må det være selve det at elektronen bliver observeret der gør at den viser sig i rummet og ændre sin opførsel, så der ikke længere udvises bølgeegenskaber. Dette giver dog også mening, da målingen af elektronens position sker ved at lyse på den. I klassisk fysik fungerer det fint at bruge lys til at observere objekter, men som det blev beskrevet kan lys opføre sig som fotoner, og fotonerne kan skubbe til elektroner, så i dette eksperiment har lysets indvirkning en stor indflydelse.

Schrödingers ligning

Erwin Schrödinger var fysiker samtidig som Einstein og Bohr, og er nok mest kendt for at komme frem til en ligning der kan beskrive interferensmønstret for dobbeltspalteeksperimentet. Ligningen beskriver hvordan intensiteten af interferensmønstret bliver fordelt på den fotoelektriske plade. Inden da havde man en matematisk måde at tænke det på, men ikke en decideret ligning til at udregne det. Den matematiske måde var at se intensiteten elektronerne afgiver i den fotoelektriske plade, hvis skiftevis 1. og 2. spalte kun er åben, disse kaldes for sandsynlighedsamplituder og betegnes Ψ_1 og Ψ_2 . Hvis disse bliver opløftet i anden, findes en bølgefunktion der beskriver sandsynligheden for hvor en elektron ville ramme, altså $|\Psi_1|^2$ og $|\Psi_2|^2$. For så at beskrive hvordan intensiteten vil være fordelt med begge spalter åbne, skal begge amplituder adderes for derefter at opløfte dem i anden $\Psi_{12} = |\Psi_1 + \Psi_2|^2$. Grunden til at begge intensiteter og ikke sandsynligheder adderes, er at det skal ses som to bølger der interfererer med sig selv, hvilken svarer til at addere. Dette princip kan ses illustreret på bilag 9. Her vises først hvordan sandsynligheden udregnes for at enten 1. eller 2. spalte er åben, og derefter hvordan det vil se ud hvis begge er åbne. På tegningen længst til højre beskriver bølgedalene de steder hvor den destruktive interferens nedsætter sandsynligheden for at elektronen vil vise sig på pladen.



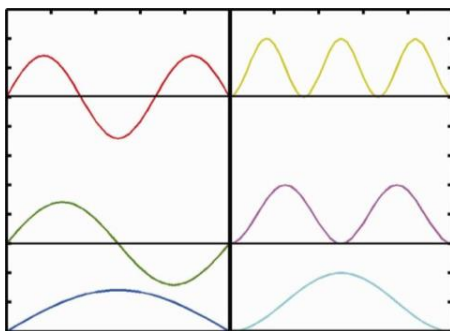
Bilag 9



Som sagt ændrede Schrödingers ligning dette. Ligning er beskrevet ved $E\Psi = -\frac{\hbar^2}{2m} * \frac{d^2\Psi}{dx^2} + V\Psi$

E er partiklens totale energi, x er den dimension den bevæger sig i, m er partiklen masse, \hbar er Plancks konstant delt med to pi, V står for partiklen potentielle energi, og Ψ er sandsynlighedsamplituden. I klassisk fysik er den potentielle energi en betegnelse for den potentielle gravitationsenergi, der findes mellem to objekter. Dette kunne for eksempel være en kasse der bliver løftet over jorden, i det kassen bliver løftet, ”får” den noget potentiel energi, som kan laves om til kinetisk energi hvis den slippes igen. Når der snakkes om potentiel energi for en partikel, er det den elektriske energi en partikel har, både dens egen ladning, og i forhold til andre elektrisk ladede objekter. Sandsynlighedsamplituden er som nævnt en amplitude der beskriver hvor stor chance der er for at en partikel viser sig et bestemt sted på metalpladen, og det er også denne der udregnes ved $\Psi_{12} = |\Psi_1 + \Psi_2|^2$.

Bilag 10. Billede af bølgefunktioner for partikler (venstre) og deres korresponderende sandsynlighedsamplitude (højre), her kan det ses at sandsynlighedsamplituden altid er positiv, da negative tal i anden bliver posi-

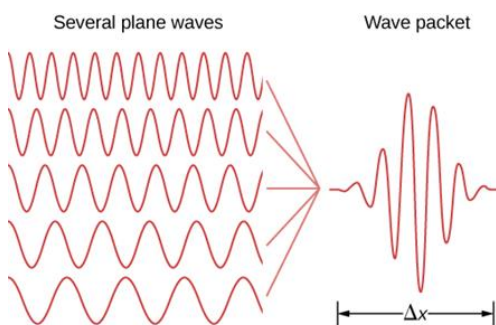


Sandsynlighedsamplituden skaber et problem i fysikken. Fysikeren De Broglie, var den første til at fremsætte ideen om at al masse burde vise bølgeegenskaber. Dette betød altså at alt i vores univers ville kunne beskrive med amplitude, bølgelængde og frekvens. Hvis så en elektron beskrives ved dens bølgeegenskab, vil denne bølges amplitude opløftet i anden være dens sandsynlighedsamplitude, og altså beskrive hvor stor chance der er for at partiklen viser sig lige netop dét sted i rummet.

Dette kommer dog ikke uden sine problemer, da det betyder at det ikke kan lade sig gøre at beskrive en elektrons præcise momentum og position samtidig. For at

måle elektronens momentum præcist skal bølgen beskrives ved en kontinuert sinuskurve, hvor der ikke er udfald, men som har samme amplitude, og omvendt skal kurven have ét sted hvor amplituden svinger meget for at beskrive elektronens position præcist. Disse usikkerheder blev samlet i Heisenbergs usikkerhedsprincip $\Delta x * \Delta p \approx h$, som siger at usikkerheden for et objekts position, ganget med usikkerheden for et objekts momentum, skal være lig Plancks konstant. Dette betyder, at objektets position og momentum enten begge kan måles med en forholdsvis stor usikkerhed, eller også må den ene ofres for den anden, det er altså ikke muligt at observere hele objektets tilstand præcist. Dette kan også ses, hvis disse tilstande beskrives ud fra en bølgestruktur. For at lave en bølge der viser positionen skal mange bestemte sinuskurver adderes, men dette fjerner som sagt muligheden for at måle elektronens momentum. Dette princip illustreres på bilag 11

Bilag 11. Additionen af mange sinusbølger kan give en beskrivelse af positionen, men ikke momentet



Københavnertolkningen

Schrödingers ligning kan altså bruges til at beskrive, hvor der er størst sandsynlighed for at et atomart objekt vil ramme i dobbeltspalteeksperimentet. Det var dog ikke sådan Niels Bohr tolkede ligningen, Bohr tolkede Schrödingers ligning som en beskrivelse af hvor det atomare objekt var i rummet. Så i stedet for at se det som en beskrivelse af hvor det atomare objekt ramte pladen, blev det en beskrivelse af hvor stor sandsynlighed, der var for at det atomare objekt ville være et sted i rummet, på det tidspunkt det blev observeret. Denne teori kom altså ud fra, at et atomart objekt udviser partikelegenskaber når den bliver observeret. På samme måde kom Bohr, med det der er blevet kendt som *Københavnertolkningen*. Denne forstod partikel/bølge-dualitet som på en anden måde end det hidtil var



fremSAT. Ifølge Bohrs københavnerfortolkning kunne et atomart objekt hverken tilskrives det "at være" en partikel eller en bølge, men derimod det at det kunne have egenskaber fra begge dele, alt efter hvordan eksperimentet blev udført. Ifølge Bohr har det atomare objekt ikke en bestemt bane, som føre til at den dannede et interferensmønster, men i stedet for er elektronen flere steder i rummet på samme tid, altså beskrevet ved sandsynlighederne i Schrödingers ligning, og det er først når det atomare objekt bliver observeret at der bliver et definitivt svar på dens position. Dette stemmer i overensstemmelse med de forsøgsresultater der viser at bølgeegenskaberne for et atomart objekt forsvinder så snart det bliver observeret, det findes altså ikke i rummet, før der er brug for at den er et bestemt sted. Det er dog ikke alle der bryder sig om den fortolkning, da den bryder med principper omkring fysik og partikler, da det ligger i definitionen på en partikel at den ikke kan være flere steder på en gang.

Noget af det Bohr var meget optaget af i sin københavnerfortolkning, var hvordan vi opfatter virkeligheden som mennesker. Bohr mente, at vores opfattelse af virkeligheden var afhængig af os, og at kvantefysik var udtryk for dette. Bohr skriver i en af hans afhandlinger

*"Med erfaringens forøgelse må vi derfor stadig være forberedt på, at de for deres ordning bedst egnede synspunkter vil undergå ændringer. I denne sammenhæng må vi ikke mindst betænke, at alle nye erfaringer efter sagens natur fremtræder indordnet i den ramme, som vor tilvante synspunkter og anskuelsesformer afgiver."*³

Vores opfattelse af den kvantefysiske natur og virkelighed bliver altså nødt til at indordne sig efter os mennesker og vores opfattelse af virkeligheden. Det er altså ikke muligt for os at se naturen som den er i sig selv, men kun som vi opfatter og kan beskrive den ud fra vores egne erfaringer og forestillinger. Bohr er ikke den første til at komme op med disse principper, og de har været diskuteret mange gange før. Emanuel Kant er en af de filosoffer der ofte bliver diskuteret i denne henseende, og især hans begreber, "Das ding für mich" og "Das ding an sich" er relevante når der snakkes om Bohr og kvantefysik. Ifølge Kant bliver virkeligheden altid betragtet med bestemte briller, vi ligger altså som mennesker et bestemt filter over virkeligheden som den er "Das ding für mich", men det vil aldrig være muligt for os at se virkeligheden som den rent faktisk er, "Das ding an sich", da den eneste måde

³ Bohr, Niels. *Niels Bohr - Filosofiske skrifter bind I s. 9*



vi kan få indsigt i virkeligheden, er ved at betragte den, og i selve betragtningen af virkeligheden, lægges der et ”filter” over den som den er i sig selv.

Det fælles sprog

Bohrs beskrivelse af virkeligheden er meget på linje med Kants, i det at vi ikke kan opfatte virkeligheden uden at tillægge den et filter, og at hele vores beskrivelse af verden bliver nødt til at foregå i et sprog som vi kender. Ifølge Bohr er sproget ikke tilstrækkeligt til at kunne beskrive den kvantefysiske verden, og det vil derfor aldrig være muligt at give denne verden en komplet beskrivelse, da vores sprog ikke indbefatter den, og de fænomener der sker i den.

”Uanset de forfinelser i terminologien, som indhøstningen af eksperimentelle oplysninger og udviklingen af teoretiske forestillinger har givet anledning til, hviler enhver redegørelse for fysiske erfaringer naturligvis til syvende og sidst på det fælles sprog, som det er tilpasset til orienteringen i vore omgivelser og efterforskningen af sammenhænge mellem årsag og virkning.”⁴

Det vil altså sige, at det ikke betyder noget hvor mange forsøg og eksperimenter, der bliver foretaget for at forfine og præcisere fænomenerne, der sker i den kvantefysiske verden, da denne verden ikke indordner sig vores fælles sprog, og derfor altid vil være underlagt et filter ”Das ding für mich” som Kant beskriver det.

Vores fælles sprog eller dagligsproget som Bohr kalder det, er de beskrivelser vi har af virkeligheden og som befinder sig i alle sprog. I dagligsproget er der ikke tale om udtryk som følelser og meninger, da betydningen af disse kan ændre sig fra sprog til sprog, men nærmere hvordan sproget bruges til at beskrive virkeligheden, hvilken er universel i alle sprog. I dagligsproget ligger der en generel opfattelse af tid og rum, og det er denne der bruges til at beskrive de fysiske begreber, hvor disse så videre kan beskrive andre fænomener. Bohrs model af sproget kan beskrives som en pyramide. De nederste lag af pyramiden vil være det der kaldes for dagligsproget, ovenpå vil det mere snævre område der hedder klassisk fysik så komme, og dette indeholder begreber der videre kan bruges til at beskrive kvantefysikken. Dagligsproget er altså fundament for de klassiske fysiske begreber og de

⁴ Bohr, Niels. *Niels Bohr - Filosofiske skrifter bind III* s. 11



kvantefysiske begreber, hvilket gør at uanset hvad skal fænomener beskrives ved dagligsproget. Det kan også siges på den måde at dagligsproget kan bruges til at beskrive det fysiske sprog, mens det fysiske sprog ikke kan bruges til at beskrive dagligsproget, da det er dagligsproget der er fundamentet og definitionen for det fysiske sprog.

Denne beskrivelse af, at vores tanker og forestillinger kun kan beskrives ved hjælp af dagligsproget, er ikke enestående for Bohr, en anden filosof der tidligere har beskrevet denne sammenhæng, er David Hume, der skriver

*”Men selv om vor tanke synes at besejde denne ubegrænsede frihed, finder vi ved nærmere undersøgelse, at den i virkeligheden befinder sig inden for meget snævre grænser, og at **al bevidsthedens skaberkraft ikke er andet end evnen til at sammensætte, omflytte, forøge og formindske det stof, som vore sanser og erfaringer har forsynet os med**”⁵*

Hume beskriver altså på samme måde Bohrs tankegang, med at uanset hvor meget vi prøver at forestille os andre ting og fænomener end dem der findes i vores egen verden, skal disse altid beskrives ud fra dagligsproget, og de erfaringer der findes i den menneskelige virkelighed. Det er altså ikke muligt at tilskrive partikel/bølge-dualiteten på andre måder end ved partikler og bølger, da dette er de eneste begreber vi kender fra den klassiske fysiske verden, og de eneste begreber der kan beskrives, ved det Bohr kalder for det ”fælles sprog”.

Det stod altså klart for Bohr, at beskrivelsen af den kvantefysiske verden er underlagt det fælles sprogs grænser, hvilket især kommer til udtryk når der er tale om dobbeltspalteeksperimentet. I eksperimentet antager alting egenskaber, som kan associeres til de egenskaber partikler og bølger har. Partikler og bølger er klassiske fysiske begreber, og deres egenskaber er beskrevet enten ved den klassiske fysik eller ved det fælles sprog, hvilket også er den eneste mulighed for at forklare disse fænomener. Problemet med dette er dog, at det der sker i dobbeltspalteeksperimentet og i kvantefysikken, ikke nødvendigvis minder, om noget der findes i det fælles sprog, da det ikke nødvendigvis indordner sig under tid og rum, som er det der er beskrevet ved klassisk fysik.

⁵ Jessen, Keld B. og Peter Laurs Sørensen. *Erkendelse og virkeligheden*. s. 37



”Den i denne henseende større vanskelighed ved atomproblemerne, sammenlignet med rene strålingseffekter, skyldes fraværet i klassisk mekanik af et superpositions princip som det, der er i feltteori.”⁶

Der er altså igen en mangel i sproget til at beskrive den kvantemekaniske natur. Det er heller ikke muligt for os mennesker at opleve eller observere den kvantefysiks verden, hvilket gør at de forestillinger og teorier der fremsættes om denne verden, ifølge Hume, kun kan sammensættes ved brug af de oplevelser der er mulige i den klassiske fysiske verden. Dette er dog også grunden til at mange var imod Bohr, og hans teori om at et objekt kunne være flere steder i rummet på samme tid, da denne teori, betød at virkeligheden ikke var mulig at observere, og at det der sker i dobbeltspalteeksperimentet, ligger uden for de menneskelige sanser. Når det skrives at det ikke er muligt at opleve eller observere den kvantefysiske verden, er det fordi det eneste der kan opfattes eller observeres, er denne verdens virkning, på den observerbare verden. Dobbeltspalteeksperimentet er en glimrende demonstration af dette, da det eneste der kan observeres, er virkningen af forsøget, altså et interferensmønster, eller et partikelmønster, det er ikke muligt at se hvad årsagen er, kun virkningen.

Måleinstrumenternes indflydelse

Sproget var ikke Bohrs eneste problem med kvantefysikken. Bohr var også af den opfattelse, at måleinstrumenterne er en del af fænomenet når der er tale om kvantefysik, da deres indflydelse på det kvantemekaniske system er så stor at der ikke kan ses bort fra dette, ligesom der kan i den klassiske fysik. Bohr beskriver det således

”Hvis vi betragter Månen i en kikkert, vil det naturligtvis betyde, at vi modtager sollys, reflekteret fra måneoverfladen; men rekylet fra lysets tilbagekastning er alt for lille til at have nogen indflydelse på positionen og hastigheden af et legeme så tungt som Månen. Når vi har at gøre med atomare systemer, hvis opbygning og reaktioner på ydre indgreb er bestemt af virkningskvantet, er situationen imidlertid ganske anderledes”⁷

⁶ Bohr, Niels. *Niels Bohr - Filosofiske skrifter bind IV*. s. 119

⁷ Bohr, Niels. *Niels Bohr - Filosofiske skrifter bind III*. s. 22



Her menes der at skønt måleinstrumenterne har en indflydelse på de klassiske fysiske eksperimenter, er denne så lille at det ikke har nogen virkning på selve det fænomen der bliver observeret. I kvantefysikken er dette ikke tilfældet, da der skal langt mindre kræfter til for at påvirke den kvantemekaniske verden. Hvis der bruges fotoner til at observere på månen, altså at man ser den, er deres masse så lille i forhold til månen, at den lille smule de ændre på dens base er tæt på ingenting. Hvis der derimod bruges fotoner til at måle på en elektron, er fotonernes indflydelse på elektronen så stor, at der ikke kan ses uden om dette i kvantefysikken. Dette kan ses i forsøget, der blev lavet med lys og en bølgegenerator. Da fotonerne energi er meget lille i forhold til de mange vandmolekyler, ændrer det ikke på forsøget at det bliver observeret ved at blive belyst, da vekselvirkningen mellem fænomen og måleinstrument er meget lille. Hvis det foregik med et atomart objekt som elektroner, ville vekselvirkningen dog være så stor, at dens indflydelse på forsøget ikke kunne overses.

Bohr beskriver også at hvis en fuldstændig opnåelse af kvantemekanikken skal opnås, skal måleinstrumenterne være en del af beskrivelsen af kvantefænomenet

”Det væsentlige nye træk i analysen af kvantefænomener er imidlertid indførelsen af en fundamental skelnen mellem måleinstrumentet og undersøgelsesobjekterne. Dette er en direkte følge af nødvendigheden af at beskrive måleinstrumenternes funktioner med rent klassiske begreber, hvorved enhver hensyntagen til virkningskvantet principielt udelukkes. De kvantefysiske træk ved fænomenerne afslører sig på den anden side i de oplysninger om de atomare objekter, som udledes af iagttagelserne. Medens det inden for den klassiske fysikes gyldighedsområde er muligt at se bort fra eller om nødvendigt kompensere for vekselvirkningen mellem objekt og målemiddel, udgør denne vekselvirkning i kvantefysikken en uadskillelig del af fænomenet. Den utvetydige beskrivelse af egentlige kvantefænomener må derfor i princippet indeholde en redegørelse for alle relevante træk ved forsøgsopstillingen.”⁸

Der er altså i kvantefysikken ikke tale om enkeltstående fænomener men i stedet for skal hele forsøget ses som en helhed i fænomenet, ligesom det er med dobbeltspalteeksperimentet. Når dobbeltspalteeksperimentet udføres, er det som sagt ikke muligt at måle på de atomare objekter, uden at deres bølgeegenskaber forsvinder. Dette er ifølge Bohr fordi måleinstrumenterne har så stor en indflydelse på de kvantefysiske processer, at denne indflydelse ikke kan overses, hvorimod denne indflydelse

⁸ Bohr, Niels. *Niels Bohr - Filosofiske skrifter bind III*. s. 14



stadig påvirker den klassiske fysik, men i en så lille grad at det er ligegyldigt, eller det kan kompenseres for.

I forlængelse af hans syn på måleinstrumenternes påvirkning af et kvantemekanisk eksperiment, mente Bohr, at dette var med til at gøre observation ufuldendte. Deres indflydelse betød altså at det ikke var muligt at se helheden i et fænomen, men kun dele af dette fænomen.

”Dette afgørende punkt, der skulle blive et hovedemne for de diskussioner hvorom der skal berettes i det følgende, medfører umuligheden af en skarp adskillelse mellem atomare objekters opførsel og deres vekselvirkning med de måleinstrumenter som tjener til at definere betingelserne hvorom fænomenerne optræder. De typiske kvanteeffekters individualitet finder netop udtryk i den omstændighed, at enhver opdeling af fænomenet ville kræve en ændring af forsøgsanordningen med nye muligheder for principiel ukontrollerbar vekselvirkning mellem objekter og måleinstrumenter. Erfaringer opnået under forskellige forsøgsbetingelser kan derfor ikke forbindes i et enkelt billede, men må betragtes som komplementære i den forstand, at fænomenerne kun tilsammen udtømmer de mulige oplysninger om objektet”⁹

Det er altså ikke muligt at betragte et atomart objekt som både en bølge og en partikel, der skal foretages et valg. Dette stemmer overens med Heisenbergs usikkerhedsprincip, der siger at momentet og positionen ikke kan måles samtidig $\Delta x * \Delta p \approx h$. Grunden til at disse ting ikke kan måles samtidig, er måleinstrumenternes vekselvirkning med de atomare objekter. Dette betyder dog ikke at det er umuligt at undersøge atomare objekter, det er dog kun muligt inden for det fælles sprog, hvilket som sagt ikke giver hele sandheden i en kvantefysisk forstand, dette kaldte Bohr for komplementaritet.

”Således må man forstå, at de erfaringer, der er vundet under veldefinerede eksperimentelle betingelser – og udtrykt ved elementære fysiske begreber - udtømmer tilsammen al oplysning om de atomare objekter, som kan meddeles i det fælles sprog”¹⁰

Den bedste forklaring der kan gives af de kvantefysiske fænomener, er altså en sammensætning af de forsøg der udføres, og de egenskaber der findes. David Favrholt sammenligner Bohrs beskrivelse af komplementaritet på dette område, med en tegning lavet af Bohrs halvfætter Edgar Rubin. Tegningen

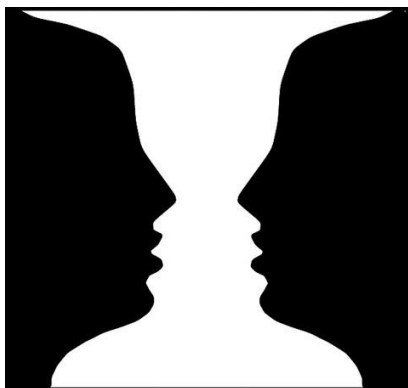
⁹ Bohr, Niels. *Niels Bohr - Filosofiske skrifter bind II*. s. 53-54

¹⁰ Bohr, Niels. *Niels Bohr - Filosofiske skrifter bind. III* s. 23

er af en hvid vase, der har en symmetrisk profil der kan danne to ansigter i profil med baggrunden. Dette betyder altså at det enten kan opfattes som en hvid vase med en sort baggrund, eller to sorte ansigter i profil med en hvid baggrund. Favrholdt beskriver billedet således:

”En nærmere fænomenologisk, det vil sige oplevelsesmæssig, analyse viser, at når man ser vasen, oplever man, at den sorte del af billedet er en baggrund, der skyder sig ind bag vasen, og når man ser profilerne, opleves den hvide del af billedet, som en baggrund, der skyder sig ind bag profilerne. De to ”baggrunde” kan rent fænomenologisk ikke begge skyde sig ind under hinanden. Så her har vi et komplementært forhold”¹¹

Bialg 12. Billede af Edgar Rubins vase, hvis der fokuseres på det hvide, fremkommer vasen og det sorte bliver baggrund, men hvis der fokuseres på det sorte, fremkommer to



Komplementaritet er altså et begreb der beskriver en opdeling af et fænomen i forskellige dele, hver del lige vigtig for hele fænomenet, men observationen af hver del, fjerner muligheden for at observere den anden. Dette er tilfældet i dobbeltspalteeksperimentet og Heisenbergs usikkerhedsprincip, hvor et atomart objekt kan optræde som bølge eller partikel, men ikke begge dele på den gang, hele fænomenet kan altså ikke observeres.

Niels Bohr og Københavnerfortolkning handler altså om at vores opfattelse af virkeligheden ikke er komplet, og at den bygger på nogle snævre rammer som kvantefysikken bliver nødt til at indordne sig under. Herunder ligger han stor vægt på sproget, og som tidligere nævnt mente han, at alt fysik skal kunne udtrykkes i det fælles sprog, som bliver udtrykt i tid og rum, men at der også opstår et problem for dette i den kvantefysiske verden, da den ikke nødvendigvis opererer inden for rammer som tid og rum. På samme tid ligger Bohr også vægt på, at måleudstyret har en langt større betydning i den kvantefysiske verden, end det tidligere var troet og end det har i den klassisk fysiske verden. Niels Bohrs Københavnerfortolkning kan ikke forklare alt hvad der sker i den kvantefysiske verden, men det er den bedste forklaring, der findes på disse fænomener, og er også et godt udtryk for at videnskaben hele tiden udvikler sig. Fysikken er ikke færdigudviklet uanset hvor ofte det ser sådan ud, et citat fra en fysiker i 1894 lyder

¹¹ Favrholdt, David. *Filosoffen Niels Bohr*. s. 126-127



”Det ser ud til, at de fleste af de store tilgrundliggende principper er sikkert etablerede, og at videre fremskridt hovedsageligt består i at anvende disse principper på alle fænomener, vi bliver opmærksomme på”¹²

Allerede i 1894 var der en ide om at fysikken var færdigudviklet med den klassiske fysik, hvilket senere blev modbevist da kvantefysikken kom til. Selvom det virker sådan i dag, er kvantefysikken nok heller ikke fysikkens endelige form, og som det er blevet beskrevet af Bohr er der nogle helt grundlæggende barrierer i vores sprog og evne til at måle på virkeligheden, at fysikken nok aldrig bliver færdigudviklet, men altid vil være i udvikling og forsøge at komme så tæt på virkeligheden som muligt.

Konklusion

Dobbeltspalteeksperimentet har været en skelsættende del af, ikke bare den moderne fysik, men hele den menneskelige opfattelse af virkeligheden. Forsøgets resultater og De Broglie's bølge-teori, der viser at alt i vores univers kan have partikel og bølgeegenskaber, ændrede måden at tænke fysik på, da disse to ting ikke stemte overens med hinanden. Heisenbergs ligning viser samtidig, at den kvantefysiske verden aldrig kan beskrives lige så præcist som den fysiske verden, da et atomart objekts præcise momentum og position ifølge ligningen ikke kan bestemmes samtidig. På samme måde viste Schrödingers ligning, der kan bruges til at bestemme en sandsynlighed for et atomart objekts position, når det udviser bølgeegenskaber, viser på samme måde, at fænomenerne i den kvantefysiske verden ikke kan forudsiges på samme måde, som de kan i den klassiske fysik. Forsøgets skiftende resultater afhængig af opstilling, og om det bliver observeret, giver også et tegn til hvor forsigtig fysikken skal være når den drager konklusioner om et fænomen, da måleudstyret kan have en indflydelse, hvilket det tydeligvis har i dobbeltspalteeksperimentet, da fotoner ofte bruges i observationer, men på atomart niveau er deres indflydelse for stor til at den kan overses.

Den bedste forklaring der findes på de fænomener der sker i den kvantefysiske verden, er københavnerfortolkningen. Denne fortolkning af kvantefysikken er det nærmeste svar, der er givet til en fuldkommen beskrivelse af den kvantefysiske verden. Københavnerfortolkningen som den er kendt, er

¹² Thomsen, Poul V. *Den moderne fysiks gennembrud: Kvanteteorien*. s. 8



Niels Bohrs fortolkning af kvantemekanik, og beskæftiger sig med de problemer der opstår når objekter har modstående egenskaber, sprogets begrænsninger, og hvilken indflydelse måleinstrumenterne har på et forsøg i den kvantefysiske verden. Niels Bohr bruger udtrykket ”komplementaritet” om partikel/bølge-dualiteten, og mener at skønt den ene udelukker den anden, og de kun kan observeres hver for sig, er begge lige vigtige i forståelsen af fænomenet. Bohr diskuterer også sprogets rolle meget, og mener at alle iagttagelser der gøres, bliver nødt til at blive beskrevet i det fælles sprog, hvilket gør det umuligt at forklare kvantefysikken fuldstændig, da det fælles sprog ikke indeholder nogen forklaring for de fænomener der optræder i kvantefysikken. Måleinstrumenterne tillægger Bohr også stor betydning i kvantefysikken, da den her menes at have en indflydelse på selve fænomenet, og det derfor er umuligt ikke at tage dennes virkning med i beregningerne. Skønt kvantefysikken er kommet tættere på at beskrive virkeligheden end den klassiske fysik, er der stadig mange huller og megen uvidenhed, som skyldes det at den kvantefysiske verden nok er for abstrakt for mennesker at forstå, og ofte efterlader forskerne med flere spørgsmål end svar.

*”Enhver løsning på et problem rejser nye og uløste problemer. Og jo dybere det oprindelige problem var, og jo dristigere dets løsning, jo flere problemer rejser det. Jo mere vi lærer om verden, og jo dybere vor erkendelse bliver, desto mere bevidst, specifik og klar vil vor viden blive om det, vi ikke véd, vor viden om vor uvidenhed. **Thi dette er faktisk hovedkilden til vor uvidenhed – den kendsgerning, at vor viden kun kan være endelig, men vor uvidenhed nødvendig må være uendelig.**”¹³*

¹³ Jessen, Keld B. og Peter Laurs Sørensen. *Erkendelse og virkeligheden*. s. 67



Litteraturliste

Smith, Anders. *Partikel*. Gyldendal, Den Store Danske. Besøgt 29/03/20. Link: http://denstoredanske.dk/It_teknik_og_naturvidenskab/Fysik/Klassisk_mekanik_og_kvantefysik/partikel

Becker-Larsen, Lars. *Københavnertolkningen*. Arentoft Film Aps, 2004.

Bohr, Niels. "Indledende oversigt". In: *Niels Bohr – Filosofiske Skrifter Bind I*. Philosophia, 2013.

Bohr, Niels. "Diskussion med Einstein om erkendelsesteoretiske problemer i atomfysikken". In: *Niels Bohr – Filosofiske Skrifter Bind II*. Philosophia, 2013.

Bohr, Niels. "Kvantefysik og filosofi". In: *Niels Bohr – Filosofiske Skrifter Bind III*. Philosophia, 2013.

Bohr, Niels. "Den menneskelige erkendelses enhed". In: *Niels Bohr – Filosofiske Skrifter Bind III*. Philosophia, 2013.

Bohr, Niels. "Kausalitetsproblemet i atomfysik". In: *Niels Bohr – Filosofiske Skrifter Bind IV*. Philosophia, 2017.

Davisson, C og L. H. Germer. *Diffraction of electrons by a crystal of nickel*. THE PHYSICAL REVIEW, 1927. http://hermes.ffn.ub.es/luisnavarro/nuevo_maletin/Davisson_Germer_1927.pdf

Elvekjær, Finn og Torben Benoni. *FysikABbogen I*. Systime, 2008.

Favrholdt, David. *Filosoffen Niels Bohr*. Informations Forlag, 2009.

Hey, Tony og Patrick Walters. *The New Quantum universe*. Cambridge University Press, 2003.

Jessen, Keld B. *Filosofi – Fra antikken til vor tid*. Systime, 1999.

Mølmer, Klaus. *Kvantefysik – Atomernes vilde verden*. Aarhus Universitetsforlag, 2010

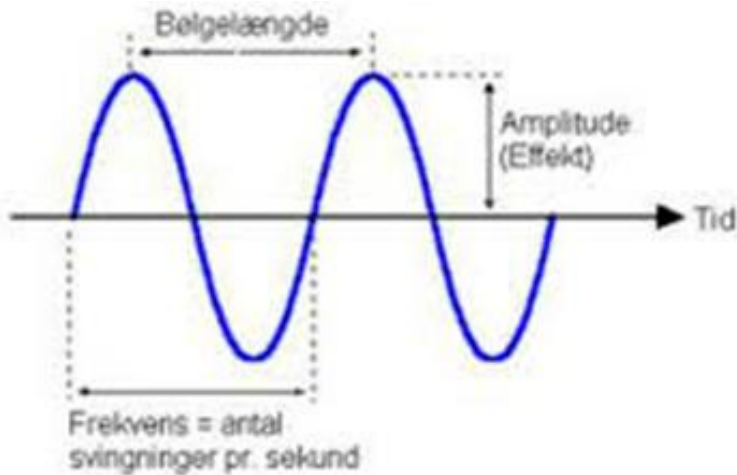
Popper, Karl R. "Om kilderne til erkendelse og til uvidenhed". In: Jessen, Keld B og Peter Laurs Sørensen. *Erkendelse og virkeligheden*. Systime, 1993.

Thomsen, Poul V. *Den moderne fysiks gennembrud: Kvanteteorien*. HOW, 1987.

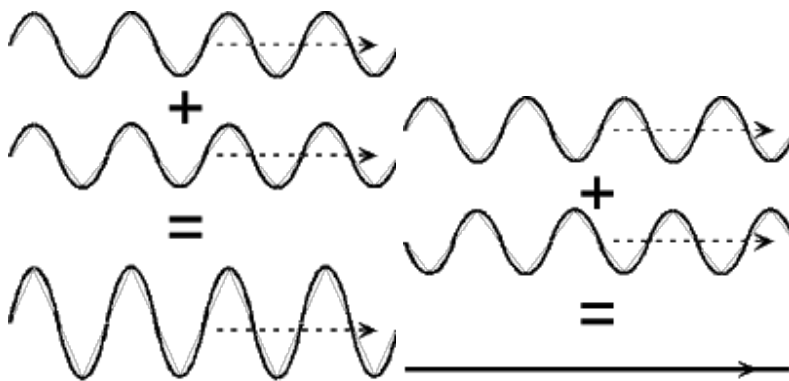


Bilag

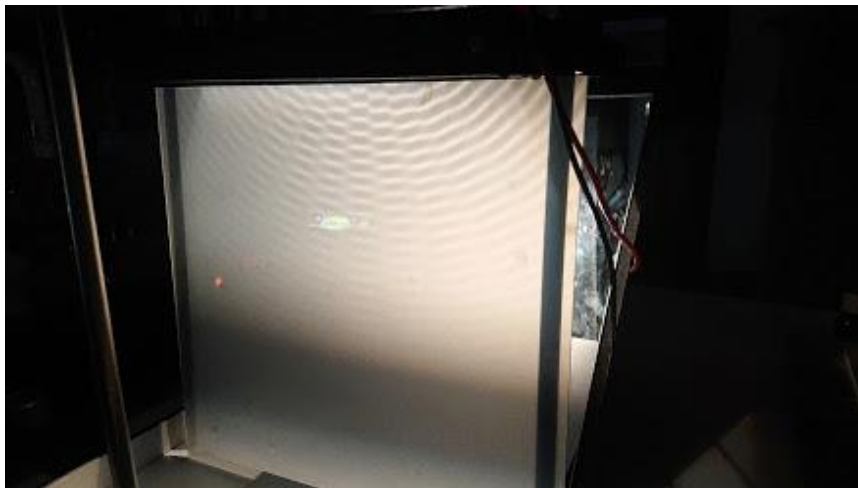
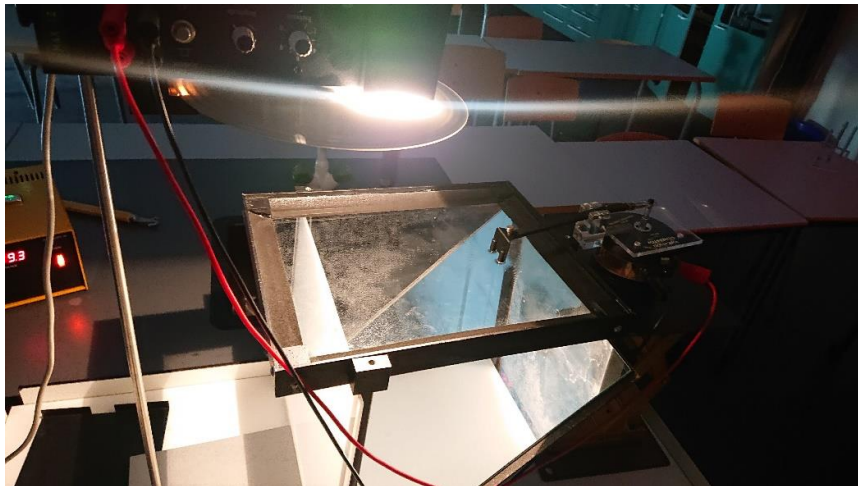
Bilag 1. Fysik/Kemi. Side besøgt 02/04/20. Link: <https://fysikkemijulieand-niko.weebly.com/boslashlger.html>



Bilag 2. Predict. Side sidst opdateret 04/07/20. Side besøgt 02/04/20. Link: <https://medium.com/predict/the-double-slit-experiment-demystified-disproving-the-quantum-consciousness-connection-ee8384a50e2f>

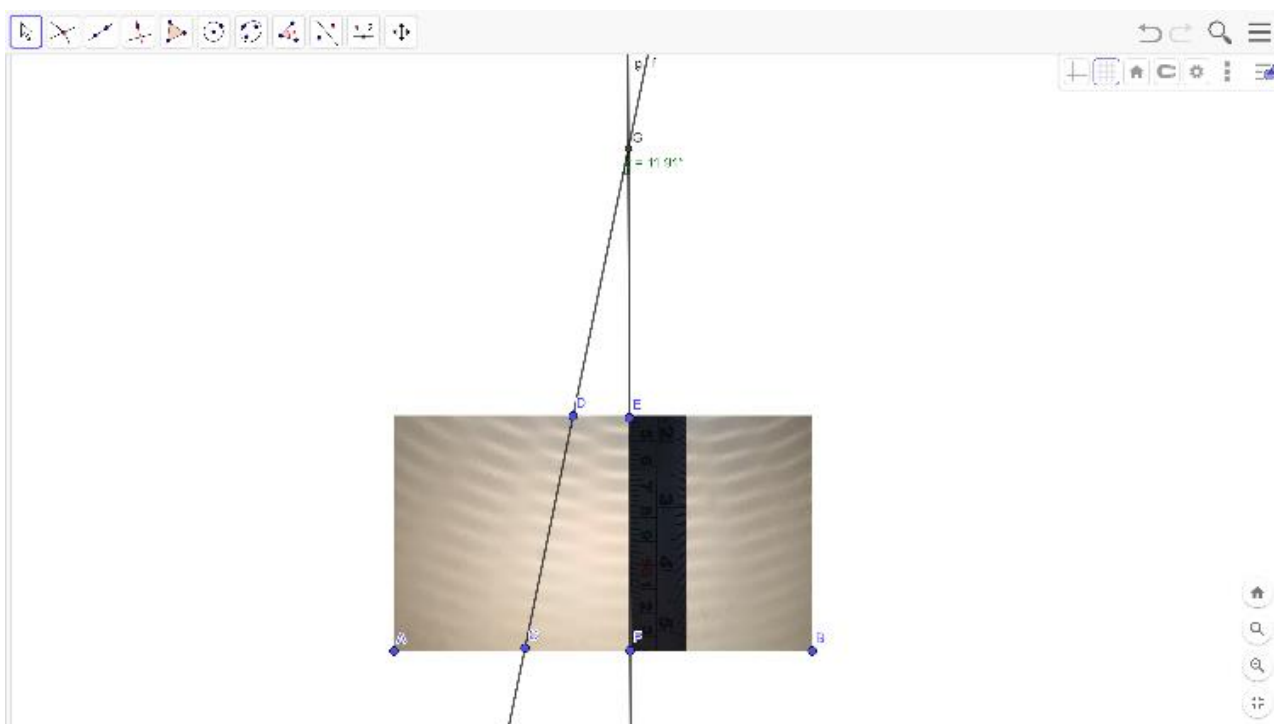


Bilag 3

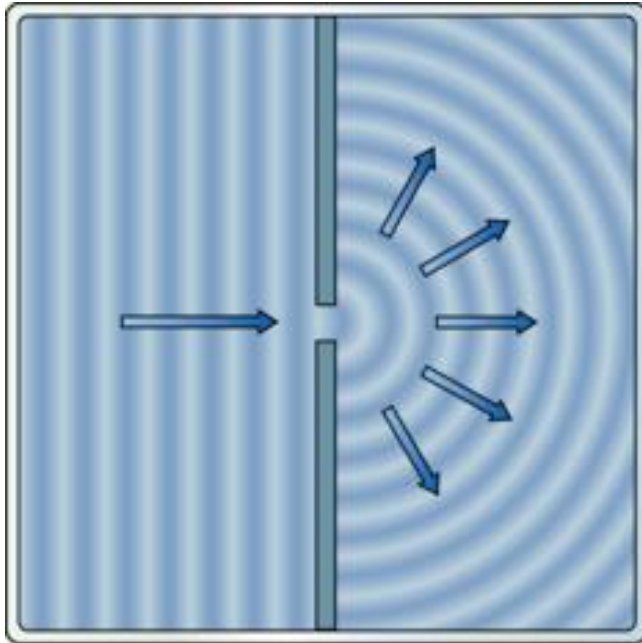




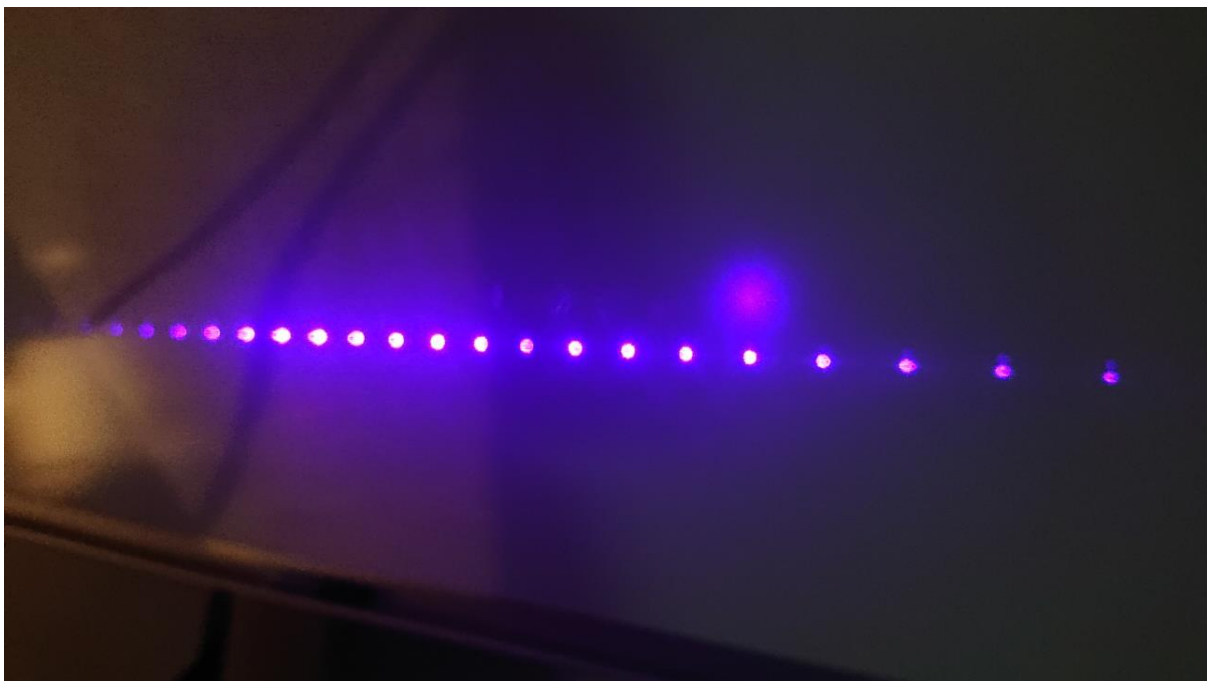
Bilag 5

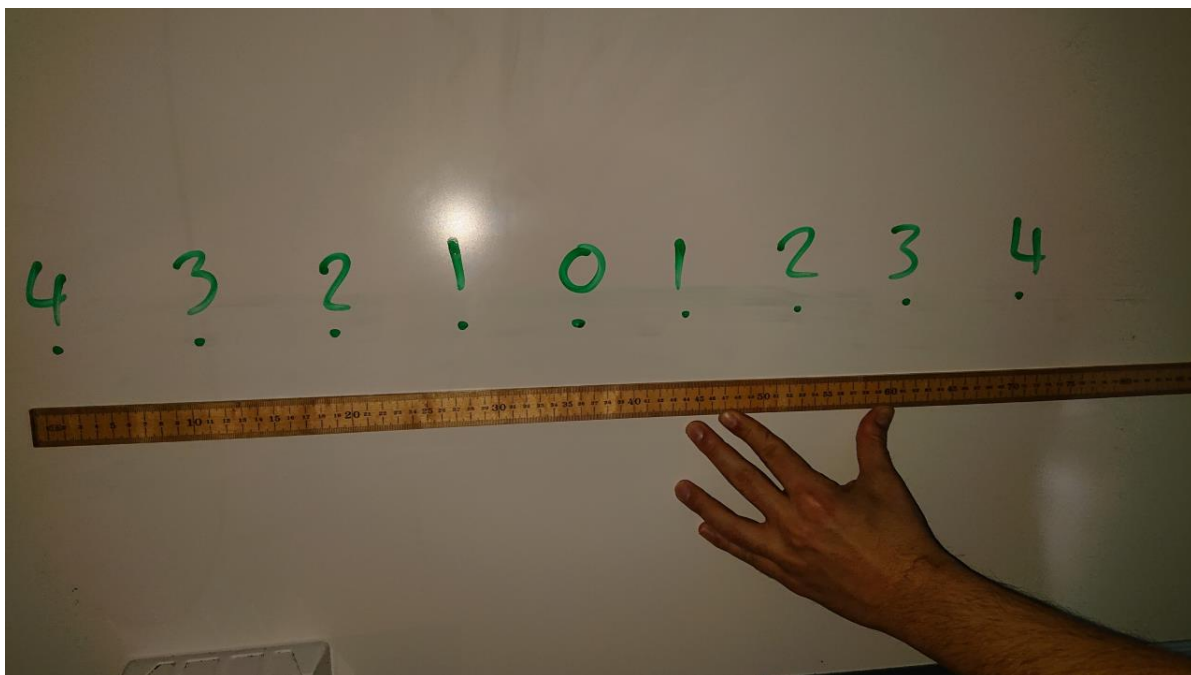
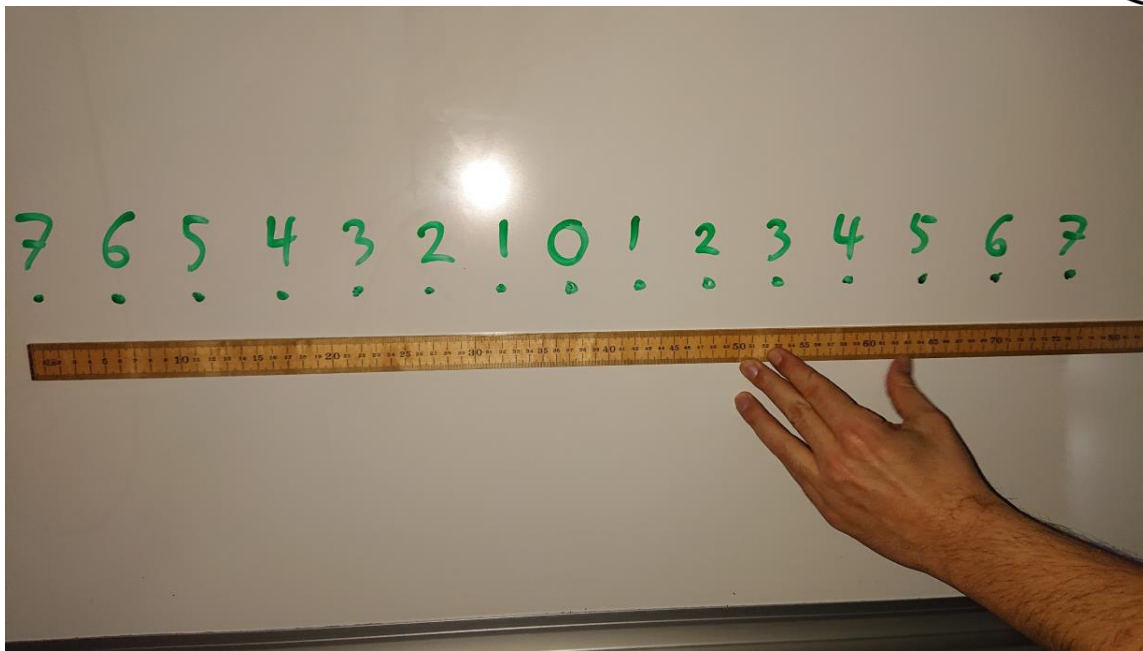


Bilag 6. Elvekjær, Finn og Torben Benoni. *FysikABbogen1*. Systime, 2008.

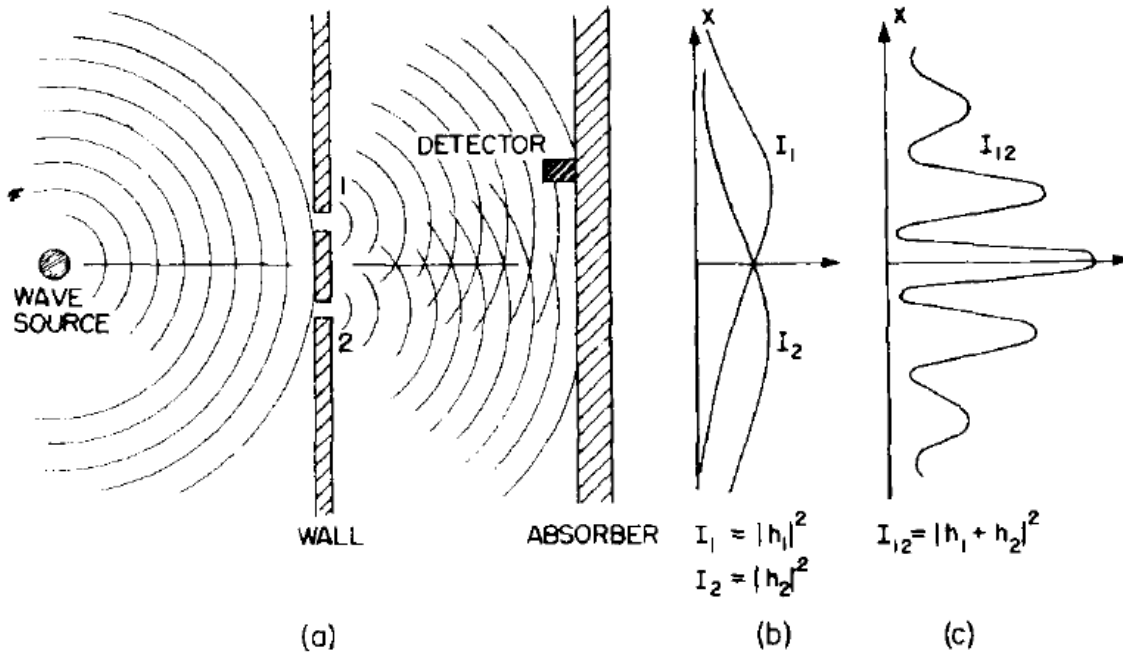


E
26



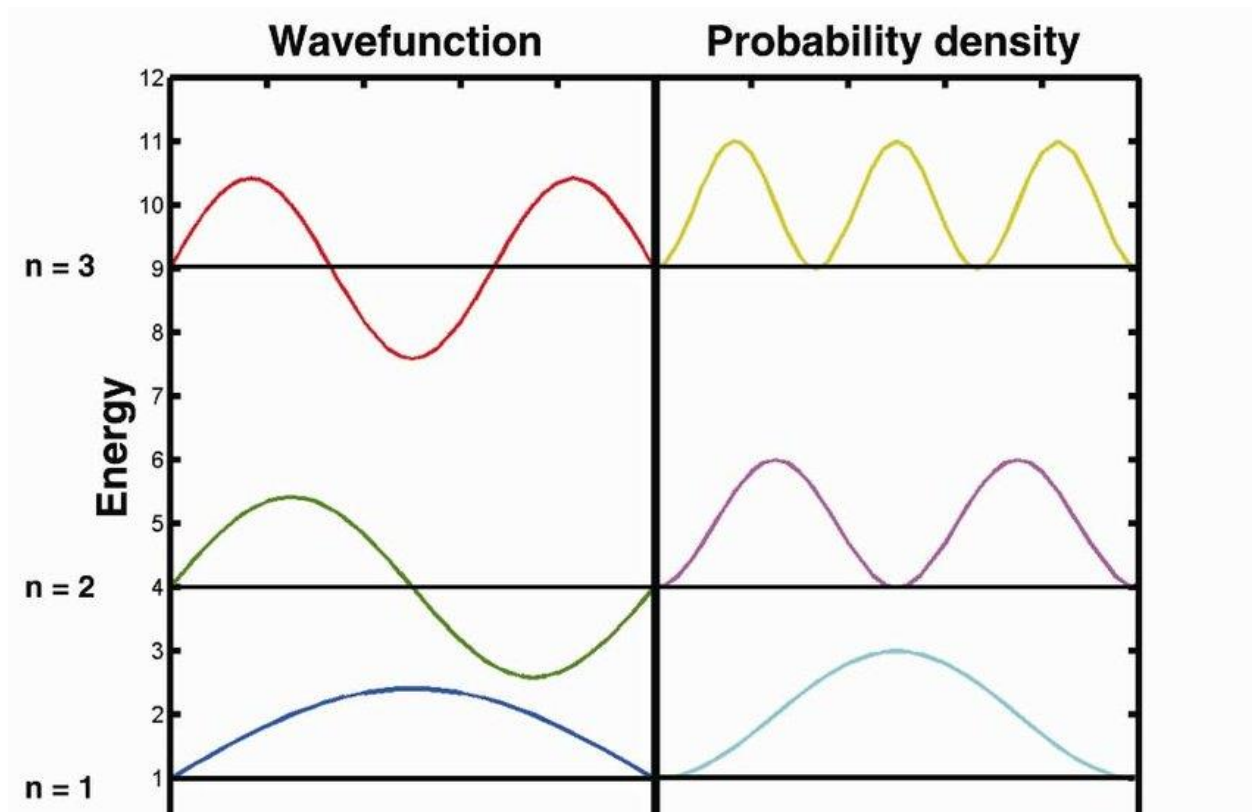


Bilag 9. StackExchange. Side sidst opdateret november 2017. Side besøgt 02/04/20. Link: <https://physics.stackexchange.com/questions/360755/is-there-a-clear-probability-density-function-of-the-place-of-the-photon-on-scre>



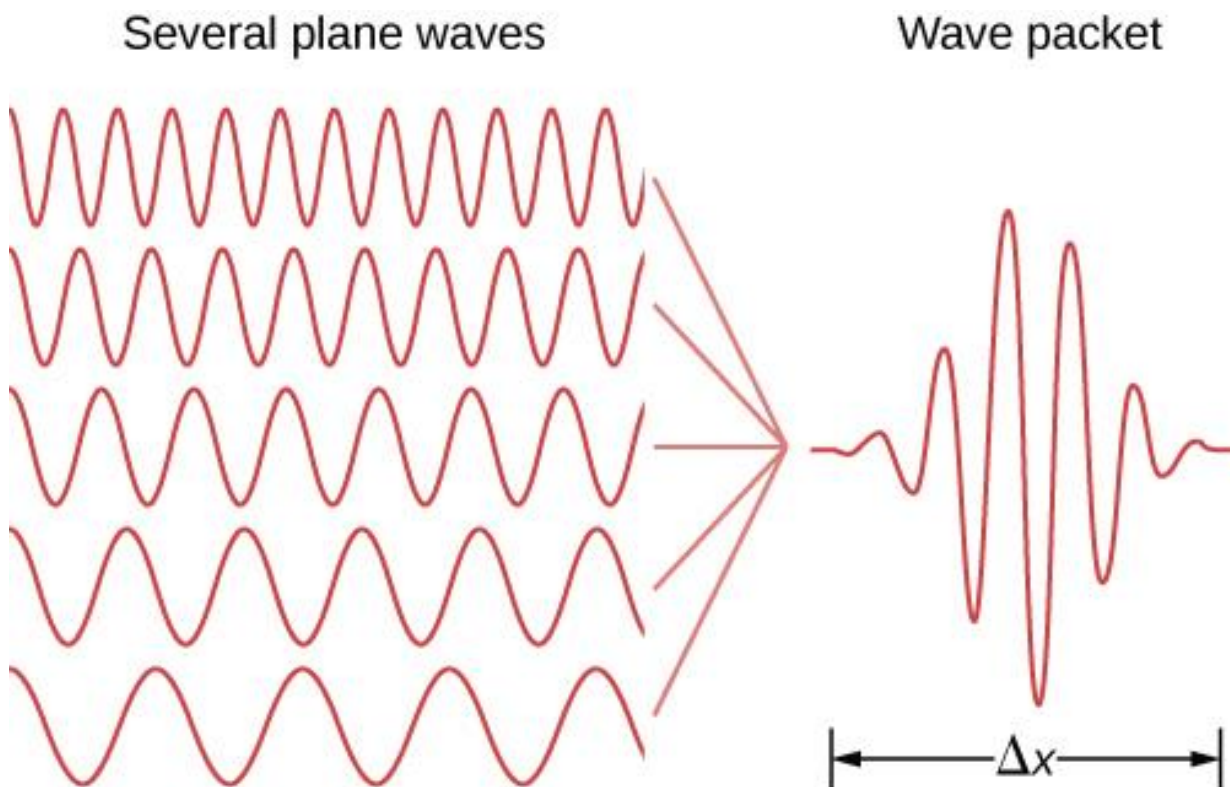


Bilag 10. ResearchGate. Side sidst opdateret Februar 2009. Side besøgt 02/04/20. Link: https://www.researchgate.net/figure/The-first-three-solutions-to-the-Schroedinger-equation-for-the-one-dimensional_fig2_226484923





Bilag 11. LibreTexts, Physics. Side sidst opdateret 20/01/20. Side besøgt 02/04/20. Link: [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Book%3A_University_Physics_\(OpenStax\)/Map%3A_University_Physics_III_-_Optics_and_Modern_Physics_\(OpenStax\)/07%3A_Quantum_Mechanics/7.03%3A_The_Heisenberg_Uncertainty_Principle](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Book%3A_University_Physics_(OpenStax)/Map%3A_University_Physics_III_-_Optics_and_Modern_Physics_(OpenStax)/07%3A_Quantum_Mechanics/7.03%3A_The_Heisenberg_Uncertainty_Principle)





Bilag 12. Thinklink. Side besøgt 02/04/20. Link: <https://www.thinking.com/scene/453912510618140673>

