

Komplementaritet

1.1. Lys, bølge/partikel?

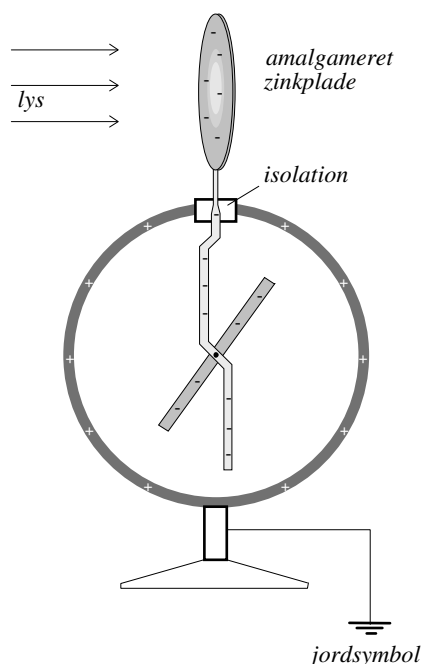
Fotoelektrisk effekt

Partikelaspektet af lys kan påvises ved at belyse en amalgameret (kviksølvbehandlet) zinkplade med forskellige lyskilder.

Hvis pladen fig. 1 oplades negativt, dvs. gives et overskud af elektroner, vil lys fra en *kviksøvlampe* aflade den. Men hvis lyset sendes igennem en glasplade eller der bruges lys fra en *glødelampe* (evt. en OHP), så aflades pladen ikke.

Kviksølvlys uden glas kan altså overføre tilstrækkeligt energi til at elektronerne kan frigøres. Når pladen er negativ, frastødes de og forsvinder. Pladen aflades.

På tegningen viser små minusser hvorledes overskuddet af elektroner fordeles sig rundt i de metaldele som er i ledende forbindelse med hinanden. Det forklarer hvorfor elektroskopet giver udslag. Faktisk vil overskuddet af elektroner skubbe elektroner i den ydre ring ned i jorden således at den bliver positiv.



Hvis pladen selv oplades *positivt*, vil lys ikke kunne aflade den. Elektroner der måtte blive frigjort vil trækkes tilbage til den positive plade.

Glaspladen lader al det synlige lys passere, så det må være en usynlig bestanddel af Hg-lampens lys der gør forskellen.

En spektralanalyse af kviksøvlampen med et prisme viser at den udsender ultraviolet lys i modsætning til glødelampen. Ultraviolet lys vil blive absorberet af glaspladen. Ultraviolet lys har en mindre bølgelængde og altså højere frekvens end synligt lys. I overensstemmelse med Einsteins hypotese vedrørende den *fotoelektriske effekt* ($E_{\text{foton}} = h\nu$) fra 1905 afleverer kviksøvlampen sin energi i større (men evt. meget færre) portioner end glødelampen.

Elektronerne er bundet til metaller, løst til Hg, fastere til andre metaller. Løsrivelsesarbejdet A_L er den energimængde der behøves for at fjerne en elektron fra metallet. For den ultraviolette del gælder at $h\nu$ er større end løsrivelsesarbejdet for amalgameret zink. De yderste elektroner der rammes af lyset kan altså løsrives. De kommer så ud med den energi der er tilbage efter løsrivelsen, dvs.

$$E_{\text{kin}} = h\nu - A_L \quad (1)$$

for de frie elektroner.

Denne sammenhæng kan vi faktisk måle i en laboratorieøvelse her på skolen). Det kræver lidt forståelse af elektriske felter, men jeg har fundet nogle gamle tal. Resultatet var

E_{kin} er målt for tre forskellige frekvenser. Grafen bekræfter (1). Det ses at hældningskoefficienten er tæt på h og at løsrivelsesarbejdet er $1,73 \cdot 10^{-19} \text{J}$.

OHP-lys kan ikke aflade en negativ plade selvom en hånd i lysstrålen måske kan mærke at energistrømmen fra OHP-lampen er større end fra kviksøvlampen. De enkelte kvanter $h\nu$ er ikke store nok. Og så nytter det ikke der er mange af dem. Det er arten ikke mængden af energi.

Med en Hg-lampe vil E_{kin} ikke vokse hvis lampen rykkes tættere på. Der vil så blot løsrives flere elektroner pr tid. Og ef-

fekten hører ikke op selvom Hg-lampen flyttes langt væk. Der vil blot frigøres færre pr. tid. Denne energikoncentration er en oplagt partikelegenskab. Energien afleveres på den enkelte elektron. Det kan bølger slet ikke. Bølger kan ikke aflevere energi til genstande som er meget mindre end bølgelængden. Bundgarnspæle bliver fint stående i høj sø. Bølgelængden af UV lys er ca. 200-400 nm. Atomers størrelse er ca. 0,1 nm - og så elektroner!

På den anden side besidder lys oplagt **bølgeegenskaber** idet der dannes interferensstriber bag en dobbeltspalte, jf. Bølgelære 3.2 hvor vi målte bølgelængden til at være ca. 500 nm. Se også fig. 2.

Interferensstriber er et bølgefænomen.

Hvis den ene spalte dækkes, forsvinder striberne. Det kan ikke betyde noget for partikler om den spalte partiklen ikke passerer igennem er åben eller lukket.

Dobbeltspalteeksperimentet - nu på film!

Det følgende eksperiment er også udført på skolen. Det er det dobbeltspalteeksperiment I har set, hvor striberne blot er fotograferet på et sort/hvidt-negativ. Derefter er negativet fremkaldt. Lys giver derfor sort reaktion på negativet (deraf navnet, ikke sandt?). Endelig er negativet fotograferet gennem et mikroskop på røntgenafdelingen på Sønderborg Sygehus.

Afstanden mellem dobbeltspalten og filmen var 5,5 m, dobbeltspalten var den vi også brugte, $d=0,5$ mm. Filmen sad i et fotoapparat hvor objektivet var fjernet. Negativet, 24×36 mm, blev således direkte belyst. Eksponeringstiden var 1 minut.

På fig.2 er størrelsesforholdene som sædvanligt er helt forkerte. I virkeligheden er afstanden mellem spalterne ca. 1000 gange så stor som bølgelængden. Og striberne ligger derfor meget tæt.

Negativet blev anbragt der hvor striberne ses og resulterede i fig.3.

Striberne på negativet viser interferens, altså at lyset har passeret dobbeltspalten som **bølger**. Men forstørrelsen viser at det selv samme lys har afleveret energien på filmen som **partikler**.

Lidt detaljer om gammeldags fotografiering - Christophers favorit:

En fotografisk film indeholder AgBr,

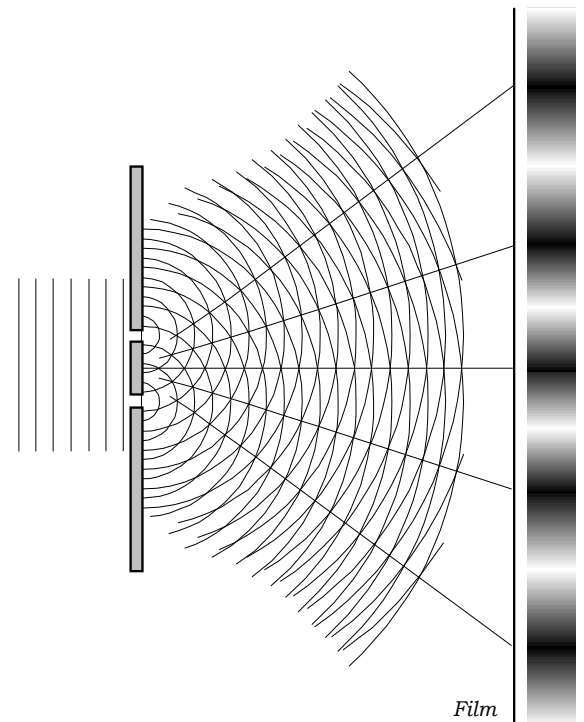


Fig.2. Dobbeltspalteeksperiment.
Interferensen der fører frem til billedet fig. 3.

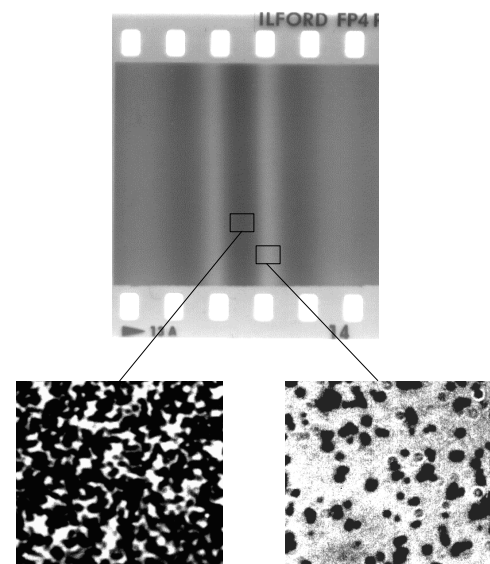


Fig. 3. Negativet øverst.
To mikroskopforstørrede udsnit for neden.

d.v.s. en mængde Ag^+ -ioner. Lys vil kunne reducere disse ioner til frit sølv. De sorte prikker på en film (korningen) opstår ved fremkaldelsen hvor der dannes en lille klump frit sølv omkring et enkelt sølvatom. Det vil sige at det der har sat gang i den lille klump er noget der har ramt et enkelt sølvatom. Det er altså meget, meget, meget mindre end

afstanden mellem spalterne. Det er fotoner, partikler.

Det bliver ekstra provokerende når det er klart at fotonerne i den grad kommer enkeltvis:

Eksponeringstiden var 1 minut. Lad os antage at der i gennemsnit er 1000 fremkaldte korn pr. mm^2 på negativet som er af formatet 24×36 mm. I hvor stor en del af tiden har der været en foton på vej hen mod filmen?

Svaret ($2,64 \cdot 10^{-4}$) viser at de fotoner der sætter prikker på filmen har været helt alene i opstillingen. En ad gangen! Hver foton har registreret at begge spalter var åbne og er derefter slået ned et sted på filmen som først efterhånden som der kommer flere fotoner, fremviser interferensmønstret.

Forsøget viser derfor også den nye lovmæssighed baseret på *sandsynligheder*. Den enkelte prik kan afsættes hvor som helst. Men det sker i overensstemmelse med en sandsynlighed som er særlig stor der hvor interferensmønstret giver konstruktiv interferens. Først efterhånden som der afsættes mange prikker, dukker interferensstriberne op, se sidste billede. (Sådan er det med sandsynligheder: Først når man har kastet terningen mange gange, kan man se at sandsynligheden for at få et bestemt øjental er $1/6$.)

Opstillingen viser både bølgeegenskab og partikelegenskab for hver enkelt foton. Man kan ikke forstå udfaldet uden begge egenskaber. Men hvordan kan hver enkelt foton have begge egenskaber?

Det svarer Heisenberg på i ERKENDELSE OG VIRKELIGHED: Vi kan ikke *Objektivere* den mikroskopiske verden. Og hvad mener han så med det?

Vi præciserer et par ord:

Objektiv (modsat subjektiv)

En *objektiv* iagttagelse er uafhængig af den person som iagttager og meddeles uafhængigt af personen. En objektiv meddelelse modtages ens af forskellige personer.

Man kan i ovennævnte eksperiment godt objektivt fortælle hvad man har gjort, og hvad man har set. Det er ofte understreget af Bohr at kvantemekanikken ikke opgiver kravet om at videnskaben skal være objektiv. Det strider slet ikke mod følgende, nemlig Heisenbergs

anvendelse af et andet (men farligt lignende) ord:

Objektivere (gøre et objekt ud af...)

At *objektivere* et udsagn i forbindelse med en iagttagelse betyder at man formulerer iagttagelsen som gjort om et objekt. Man går i formuleringen ud over selve iagttagelsen (sansningen/erfaringen) og formulerer iagttagelsen som gældende et objekt. Dvs man beskriver mere end man har gjort og set. Et objekt kan ikke afhænge af de omstændigheder hvorunder det iagttages. Men man har ikke set objektet. Og ovennævnte forsøg tvinger os til at afstå fra at objektivere lys. En anden formulering af samme erfaring: Københavertolkningen af kvantemekanikken indførte et billedforbud. (Et sådant opererer flere religioner også med.)

Heisenberg gør det klart at kvantemekanikken er en *objektiv* teori rummende udsagn som ikke kan *objektiveres*.

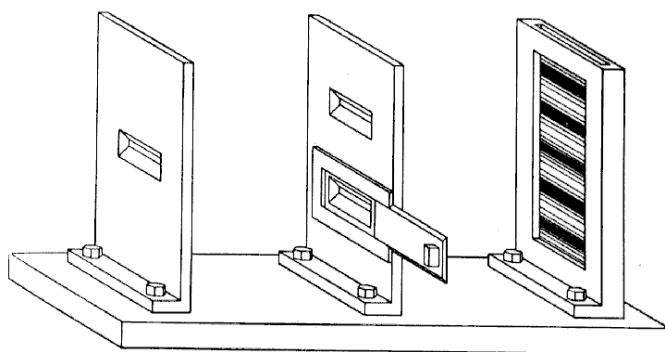
Vi kan eksperimentere med noget vi kalder lys. Det vi ser i sådanne eksperimenter, afhænger imidlertid af måden vi griber eksperimentet an på. Den eksperimentelle opstilling er en uadskillelig del af lys. Kvantemekanikken beskæftiger sig ikke med objekter i den klassiske fysiks forstand, men med eksperimentelle opstillinger hvori indgår både en eksperimentators opstilling og et signal fra kvanteverdenen. For denne *helhed* indførte Bohr betegnelsen et *fænomen*.

Et fænomen består af en uadskillelig helhed. Hvis man forsøger at adskille dobbeltspalteforsøget i en undersøgelse af passagen af dobbeltspalten og afsætning af energi på AgBr-kornene i striber på den fotografiske plade, laver man et andet forsøg som falder anderledes ud. Opstillingen er valgt og skal behandles som en helhed.

Men mange har da haft lyst til at prøve at afsløre hvilken spalte fotonen ”i virkeligheden” passerer igennem. Og det kan man! Men enhver opstilling som kan give det svar, vil fjerne muligheden for at striberne opstår.

En primitiv metode til afsløring af hvilken spalte fotonen passer igennem, er at anbringe den fotografiske film umiddelbart efter spalterne. Man vil så kunne se prikker på filmen og fint se

hvilke fotoner der "som partikler" passerede igennem den øverste og hvilke der passerede igennem den nederste spalte. Men derved er fotonerne jo væk og kan ikke danne interferensmønstret. Og sådan vil det gå for alle eksperimenter der forsøger at afsløre om fotonerne passerer den ene eller den anden spalte, også selvom fotonerne får lov at fortsætte bag efter. Hvis der kommer et svar ud vedrø-



De var dog et seriøst grundlag for overvejelser om målemuligheder under kvantemekanikkens vilkår. I den til venstre er positionen af spalter og fotografisk plade sikret gennem det solide fælles fundament. Hvis man vil sikre sig at fotonen passerer gennem den øverste spalte, kan man lukke den nederste - og interferensmønstret forsvinder.

(Bohr siger impuls hvor vi siger bevægelsesmængde. Jeg vil her bruge Bohrs begreb.) I den til højre overvejer Bohr muligheden for at måle på spalten om den har afbøjet en foton der fortsætter igennem spalten ved at måle en evt. impulsoverførsel til spalten. En sådan måling af overført impuls kræver at spalten må ophænges bevægeligt, i fjedre. Bohr kan så vise at en tilstrækkelig præcision i impulsmålingen ifølge Heisenbergs ubestemthedsrelation, $\Delta x \cdot \Delta p > h$, medfører en sådan ubestemthed i spaltens position at interferensmønstret forsvinder. Der bliver ingen modsigelser inden for kvantemekanikkens rammer.

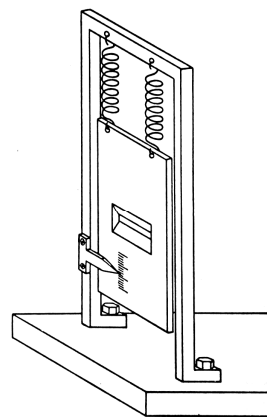
Se yderligere:

<http://users.cybercity.dk/~kam1966/scully.htm>
og/eller

<http://users.cybercity.dk/~kam1966/mysterie.htm>
(begge fremragende!)

rende spalterne, så forsvinder interferensmønstret.

Netop dette spørgsmål var væsentligt i den årelange, berømte diskussion mellem Bohr og Einstein. Den begyndte i Solvay, 1927, og fortsætter endnu med mange vægtige bidrag her længe efter de to herrers død. Bohr lod i forbindelse med denne diskussion instituttets tegnestue fremstille følgende halvhumoristiske (pædagogik for einsteinianere) tegninger:



De to egenskaber bølge/partikel er en slags regnegrundlag. Ved energi- og impulsoverførsel til den fotografiske plade optræder lys som partikler. Ved vekselvirkning med sig selv som bølger. Det skal fastholdes inden for samme opstilling. Og inden for kvantemekanikken giver det ikke anledning til selvmodsigelser. Således kan dobbeltspalteeksperimentet beskrives.

Det var så lys.

1.2. Elektroner, partikel/bølge?

I 1923 foreslog de Broglie at elektroner under visse omstændigheder kunne optræde som bølger. Han foreslog at elektroner med energien E og bevægelsesmængden p skulle tildeles frekvensen $\nu = E/h$ og bølgelængden $\lambda = h/p$. På det grundlag kunne han forklare Bohrs stationære tilstande i brintatomet som de energier hvor elektronen ville lave en konstruktiv interferens hvis den opfattedes som en bølge på banens omkreds. En stationær tilstand blev dermed til en stående elektronbølge omkring brintkernen.

Den forestilling var frugtbar. I kvantemekanikken, 1926, blev det klart at ik-

ke blot elektroner kan opføre sig som bølger, men alle små partikler kan. Hvis blot partiklernes masse m er så lille at ubestemthedsrelationen, $\Delta x \cdot \Delta v > h/m$, spiller en rolle i forbindelse med registrering af partiklen, så er partiklen slet ikke en partikel, men et kvantefænomen med **komplementær dualitet**. Lær den, den kan imponere enhver! Censor inkl.

Bohrs brintatom.

Årsager til bruddet med den klassiske fysik.

Rutherford havde indset at atomets positive ladning er samlet sammen med næsten hele atomets masse i en kerne som er meget lille i forhold til atomet som helhed. Det må betyde at elektronernes placering uden om kernen definerer atomets størrelse.

Forsøger man at forstå dette på basis af klassiske forestilling, må det sammenlignes med f.eks. satellitter omkring Jorden. Disse cirkulerer omkring Jorden holdt på plads af den tiltrækkende tyngdekraft.

Tilsvarende måtte man opfatte de negative elektroner som cirkulende omkring og tiltrukket af den positive kerne.

Det rummer i hvert fald to problemer i forhold til den klassiske fysik.. Se mere i Kerne&Atomfysik.

1, Strålingsinstabiliteten.

En cirkulerende elektron betyder en ladning der bevæger sig frem og tilbage som ladningerne svinger i en antenne. En antenne udsender elektromagnetiske stråling som fjerner energi fra det svingende system. Dette er meget velbekræftede følger af Maxwells ligninger.

Hvis en satellit anbringes i en så lav bane at den ikke er helt uden for atmosfæren, vil den miste energi ved luftmodstanden og tabe højde. Den vil derfor med stadig mindre omløbstid (voksende frekvens) spiralere ind mod jorden og til sidst styrte ned.

Tilsvarende vil en elektron der mister energi, spiralere ind mod kernen med stadig voksende frekvens for til sidst at forene sig med kernen og neutralisere dennes ladning.

Klassisk (ifølge Maxwells ligninger) ville man forvente en udstråling med en frekvens lig med omløbsfrekvensen. Altså kontinuert voksende frekvens.

Man skulle altså se et kontinuert spektrum. Man ser et linespektrum.

Og på grund af strålingen måtte atomet falde sammen til kernens størrelse. Atomer er ca. 30 000 gange større end kerner. Og vedbliver at være det!

2, Den stabilitet

Hvorfor falder atomet ikke sammen til kernens størrelse? Og hvorfor er alle atomer af samme grundstof lige store? En planet kan jo dog befinde sig i en hvilken som helst afstand fra solen.

Konsekvenser af bruddet med den klassiske fysik.

Kausaliteten er væk.

I Bohrs oprindelige model lå der at et brintatom i tilstanden f.eks. $n=4$ kan henfalde til enhver af tilstandene $n=3$, $n=2$ og $n=1$. Intet i tilstanden $n=4$ kan begrunde valget af sluttilstand. *Der er ingen kausalitet.*

I den senere kvantemekanik kan man beregne sandsynlighederne for de forskellige henfald.



Springet.

Spring kender vi i klassisk fysik, f.eks. spring fra 3 m-vippen.

Elektronspringet i et brintatom som Bohr så det, er af en helt anden type. Ukendt fra den klassiske fysik og uforudset som begreb i modsætning til f.eks. atomer (Demokrit) og vacuum (Aristoteles behandlede muligheden og afviste den).

Lad os kalde det nye spring for *kvantespring*.

Kvantespringets særlige karakter kan indses ved at betragte to helt ens brintatomer i tilstanden $n=4$.

Det til venstre antages at henfalde til $n=3$, mens det til højre henfalder til $n=2$.

Hvis vi betragter elektronen som en partikel i klassisk forstand, nok så lille, så vil den første del af faldet indtil $n=3$ være ens for det to atomer. Det til venstre udsender en infrarød foton. Så må det til højre også gøre det. Men det gør det ikke! Det udsender en tyrkis foton, med energi ($E=h\nu$) svarende til forskellen mellem $n=4$ og $n=2$. Det var den tyrkis linie I så i laboratorieøvelsen.

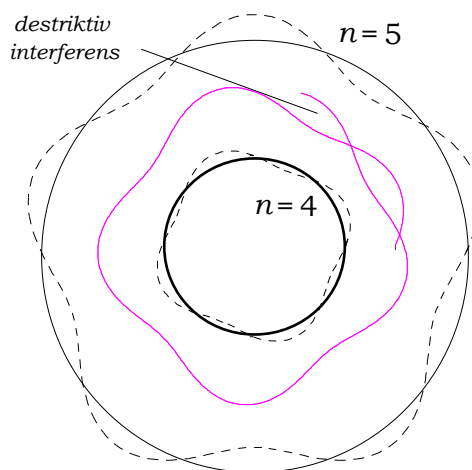
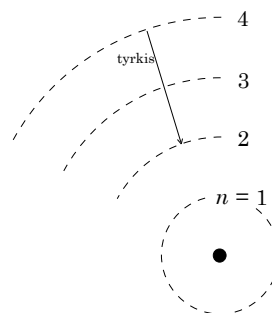
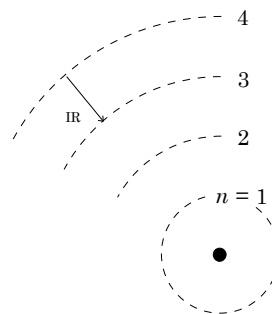
Og her var det at Henrik (og Rutherford - fint selskab, Henrik! Synd du ikke hørte min oplæsning) spurgte: "Hvordan kan den undervejs vide hvor den ender?"

Ordet "undervejs" er forkert.

Det er umuligt at operere med mellemtilstande. Den sidste tilstand $n=2$ er tilstede i kvantespringet samtidig med den første $n=4$.

Som lyset i dobbeltspalten der opfører sig som en bølge så længe det er overladt til sig selv og ikke vekselvirker med fotografisk papir eller afleverer impuls til spalterne, således vil også elektronen når den ikke registreres, opføre sig som en bølge. Det har vi indset ved at sammenligne med en stående bølge på en streng.

De prikkede figurer antyder elektronbølgen i tilstand $n=4$ og $n=5$ (ud/ind skal ikke illustrere en svingende bane, blot "noget" der svinger mellem to yderligheder som forstærker hinanden når de er ens og ophæver hinanden når de er modsat: +/- , op/ned , over-/under- you name it!). Imellem de to stående bølger $n=4$ og $n=5$ går λ ikke op i omkredsen og bølgen udslukker sig selv.



Det er illustrerende rent kvalitativt. Men faktisk kan ovenstående udledes af de Broglies hypotese sammen med en klassisk behandling af elektronen i en keplerbevægelse omkring kernen. Det giver søreme den "store" konstant i formel (5) i Atomfysikken kvantitativt korrekt! Men det må betragtes som noget af et tilfælde. I kvantemekanikkens behandling indgår en rumlig bølgefunktion således at brintatomet er kugleformet i grundtilstanden.

Filosofiske konsekvenser

Den klassiske fysik har fundet sin grænse ved den mikroskopiske verden. Kvantemekanikken fra 1926 er den nye formalisme på det område. Kvantemekanikken er en meget avanceret matematisk beskrivelse med begreber som ikke har nogen umiddelbar fysisk tolkning. Det er grunden til at Heisenberg og Schrödinger kunne formulere to helt forskellige udgaver af kvantemekanikken om hvilke det tog flere måneder at vise at når det kom til tolkningen så udtalte de det samme om de mikroskopiske fænomener.



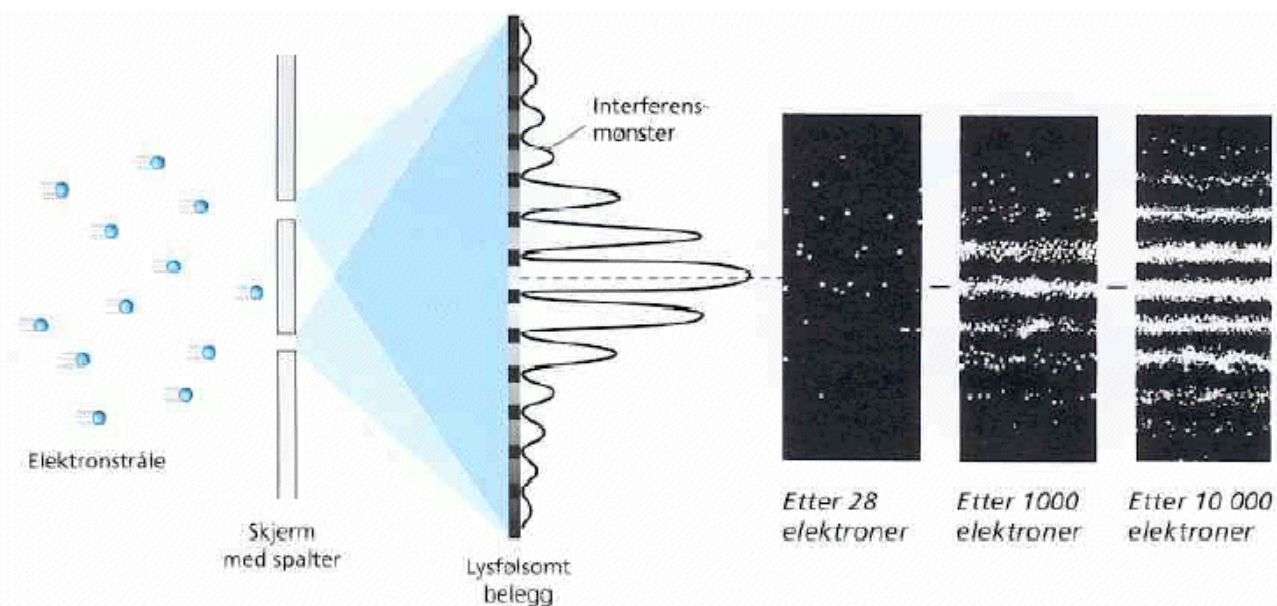
Fysikerne er i dag enige om at kvantemekanikken er fantastisk succesfuld når det drejer sig om forklaring af de atomare fænomener. Men nogle fysikere, herunder Einstein, var/er stadig uvillige til at opgive den klassiske fysiks determinisme og entydige beskrivelse af fysiske objekter. De forestiller sig at der kommer noget som kan genindsætte det der dybest set nok er Descartes opdeling i stof og ånd. Så vi igen kan se på naturen "udefra". Det kan vi ikke i kvantemekanikken. Vi kan ikke udtale os om kvanteverdenen uden at være uadskilligt deltagende som observatør. Uadskilleligt fordi den eksperimentelle opstilling vi er nødt til at vælge for at komme i kontakt

med kvanteverdenen, har afgørende indflydelse på hvordan den giver sig til kende for os. Kvantemekanikken påminder os om den gamle indsigt at vi er både aktører og tilskuere i tilværelsens store drama.

Kvantemekanikken kræver at vi udvikler en ny *anskuelsesform* som Bohr har kaldt *komplementaritet*, og som han har påvist er et generelt forekommende vilkår for vores bevidsthed.

I kvantemekanikken har man også brugt ordet, *dualitet*, to sider af samme sag. Begrebet rummer ikke noget nyt i forhold til komplementaritet. Men komplementaritet rummer foruden de to sider også påstanden om at vi hermed har den *komplette* beskrivelse af det fysiske system.

Symbolisk er forholdet fint beskrevet ved det *gamle kinesiske tegn* som (jf. linket) oprindeligt er en beskrivelse af solens gang på himlen, men som for mig (og for Niels Bohr – sans comparaison – som valgte symbolet til sit våbenskjold) fint udtrykker den nye kvantemekaniks komplementaritet (dualitet): To modsætninger udgør tilsammen helheden (cirklen). Over for hinanden udgør de modsætninger som "holder hinanden i skak", men tilsammen udgør de den komplette beskrivelse.



Denne tegning pointerer sandsynlighedsbegrebets nødvendighed når det drejer sig om elektronernes nedslag på den fotografiske film (lysfølsomt belegg). Efter

28 elektroner kan man slet ikke se mønstret.