

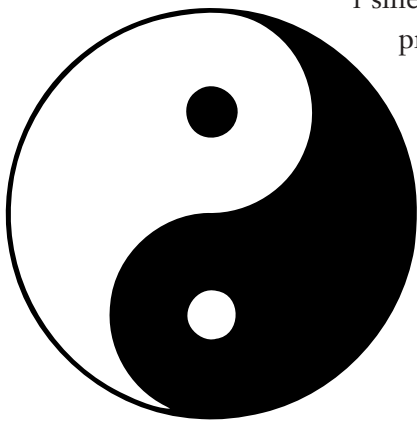
anden, og omvendt. Omfanget af denne usikkerhed var knyttet til Plancks konstant. Det forhold, at energi ikke kunne findes i vilkårligt små mængder andet end i frie fotoner, satte altså en grænse for, hvad man kunne vide om elementære størrelser som elektronen. Det betød, at enhver fundamental naturbeskrivelse måtte være baseret på *sandsynlighedsbeskrivelser* – og dermed blev den indeterministisk og delvist ikke-kausal.

Når Heisenberg hævdede, at elementarpartiklers sted og moment ikke kunne bestemmes vilkårligt, forudsatte han, at elektronen faktisk både havde et sted, hvor den var, og at den besad bestemte energi-egenskaber. Men hvad ville det så sige, at erkendelsen af den var udtrykt i sandsynlighed? Og hvad betød det, at den både teoretisk og eksperimentelt udviste bølgeegenskaber?

Komplementaritet fra København

Bohr opfattede ikke Heisenbergs teori som tilfredsstillende. Heisenberg havde en klar model, der involverede en observatør underlagt visse begrænsninger og en verden, som observatøren ikke kunne opnå fuld information om, selvom han godt kunne vide, hvad det var, han manglede information om. Bohr mente, at de erkendelsesteoretiske problemer var for store. Heisenberg gik ydermere ud fra, at det var uproblematisk at anvende begreber som f.eks. sted og hastighed på elektroner. Det havde Bohr selv gjort

i sine teorier fra 1913 til 1924. Men med en række problemer, paradokser og modsigelser til følge, hvorfor Bohr nu, i 1927, satte spørgsmålstegn ved fremgangsmåden. Ifølge Bohr var det ikke virkeligheden, der satte grænser for anvendelsen af vores begreber – det forholdt sig snarere omvendt: det var vores begreber, der satte grænser for vores erkendelse af virkeligheden. For på hvilken måde skulle man få mulighed for at præcisere begreberne “sted” og “hastighed”, hvordan skulle man nogensinde kunne vide, om man anvendte dem korrekt? Ikke desto mindre havde man intet andet valg end at forsøge at anvende de forhåndenværende begreber, der fik deres



Da Bohr i 1947 modtog Elefantordenen, brugte han det taoistiske yin og yang-symbol til at symbolisere komplementaritetsprincippet, fordi “det drejer sig ikke om modsigelser, men om komplementære opfattelser af fænomenerne.”

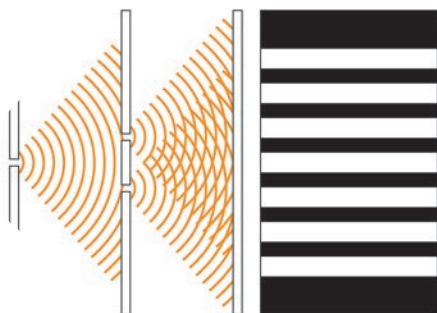
mening ud fra dagligdags erfaringer. Bohr supplerede dermed sit korrespondensprincip med et komplementaritetsprincip, der sagde, at vedrørende de atomare forhold var man nødt til at give flere hinanden udelukkende beskrivelser. At elektronen måtte beskrives med begreber, der tillagde den bølge-egenskaber, var ikke udtømmende, den kunne også beskrives som en partikel – men denne beskrivelse ville heller ikke være udtømmende. Der ville simpelthen ikke kunne gives en sammenhængende og modsigelsesfri beskrivelse af den atomare virkelighed.

Siden 1927 havde Bohr ment, at fysik ikke drejer sig om, hvordan virkeligheden er, men derimod om, hvad vi kan sige om den. Filosofisk set kan dette kaldes en epistemologisk position, det vil sige en position, som primært undersøger gyldigheden for viden. Ved et større fysikermøde i den italienske by Como introducerede Bohr sit begreb om komplementaritet. Ud fra det grundsynspunkt, at “vores tolkning af det eksperimentelle materiale hviler i alt væsentlig på klassiske begreber”, var han i stand til at redegøre for Heisenbergs påstande om ubestemthed, uden at tilslutte sig Heisenbergs og Max Borns forestillinger om, at virkeligheden var indeterministisk og ikke-kausal. Bohr sagde blandt andet: “En uafhængig virkelighed i sædvanlig (dvs. klassisk) fysisk forstand kan hverken tilskrives fænomenerne eller selve observationsmidlerne.” Heisenberg havde i 1927 hævdet, at “kvantemekanikken fastslår definitivt ugyldigheden af loven om kausalitet”, mens Bohr nu tolkede situationen sådan, at man på den ene side aldrig ville kunne undvære begrebet om kausalitet i beskrivelserne af naturen, men at man på den anden side måtte indse, at ingen beskrivelse af atomare fænomener nogensinde ville kunne give et fuldstændig sandfærdigt billede af virkeligheden. Det var imidlertid bestemt ikke det samme som at sige, at naturen ikke var underlagt kausalitet, sådan som Heisenberg gjorde det.

Den klassiske forståelse af eksperimentet var, at man stillede et spørgsmål, hvorpå der kom et klart udfald. Bohr forstod de nye betingelser således, at ved atomare eksperimenter havde spørgsmålet indflydelse på svaret. Det skulle forstås sådan, at dels var et svar aldrig udtømmende, og dels kunne der stilles et andet spørgsmål, der ville give et lige så godt svar – men et svar, der vel at mærke udelukkede det første.

Bohrs fortolkning, som også blev kaldt “Københavnertolkningen”, lavede i en vis forstand et billedforbud mod visse begreber og forståelser, fordi de ikke gav mening i forhold til de observerede kvantemekaniske fænomener.

•• Dobbeltpalteeksperimentet



Det var oprindeligt englænderen Thomas Young (1773-1829), der udførte det første dobbeltpalteeksperiment for at vise, at lys skulle forstås som bølger, og ikke som små partikler. Men efter at man i løbet af 1920'erne havde demonstreret, at lys vekselvirker med materie i form af diskrete, "kvantificerede" energipakker, kaldet fotoner, blev dobbeltpalteeksperimentet det ultimative eksempel på elementarpartiklers mærkelige partikel-bølge-dualitet.

I eksperimentet opsættes en plade med to spalter, hvorigennem fotoner (eller elektroner) kan passere og ramme en bagvedliggende fotoplade, på hvilken man kan se, hvor og hvornår fotonerne rammer. Hvis en af spalterne tildækkes, vil de efter hinanden følgende fotoner, der trænger igennem den anden spalte, langsomt opbygge et simpelt mønster med en top og kun lidt diffraktion, pænt i overensstemmelse med de heisenbergske usikkerheder, der er forbundet med en partikels position og moment. Men lige så snart begge spalter er åbne, vil det til at starte med se ud som om, at fotonerne rammer pladen tilfældigt, men efterhånden vil der opbygges et interferensmønster med et mønster af lyse og mørke striber.

Det er fristende at tro, at hver foton må

passere gennem enten den ene eller den anden spalte. Men hvis det var tilfældet, burde man kunne optage interferensmønsteret på film ved først at lukke den ene spalte i et stykke tid, og så åbne den igen og lukke den anden. Men det ved vi jo, ikke fungerer. Interferensmønsteret opstår kun, når begge spalter er åbne. Den enkelte foton er med andre ord ikke kun klar over, om der findes en anden spalte. Den ved også, om den er åben. Ifølge Københavnerfortolkningen bliver vi derfor nødt til at konkludere, at hver foton går gennem begge spalter, og at hver foton kun interferer med sig selv.

Hvis det lyder som nonsens, kan man glæde sig til det næste: i en lille variation af dobbeltpalteeksperimentet placeres små detektorer på hver af spalteåbningerne for at aflure, igennem hvilken fotonen går. Men det viser sig ikke at fungere. Blot en enkel detektor ødelægger interferensmønsteret. Det skyldes, at en måling med detektoren implicerer en fysisk interaktion med fotonen, og når det først er sket, vil fotonen fortsætte, som om der kun fandtes den ene spalte, hvor den blev målt. Fysikere har længe kæmpet med at fortolke sådanne kontraintuitive resultater. Ifølge den efterhånden mest anerkendte Københavnerfortolkning forestiller man sig, at der findes en bølgefunktion, som beskriver sandsynligheden for at finde en partikel i et givent punkt. Men indtil partiklen er registreret, antager man, at den eksisterer alle steder langs bølgefunktionen, dvs. alle steder på en gang. Hvis en partikel derfor *kan* passere gennem to steder på en gang, *vil* den også gøre det. Hvis partiklen registreres på vejen, vil bølgefunktionen "kollapse" og interferensmønsteret forsvinde.