

var der ingen, der havde *set*, om elektronen var en partikel eller en bølge – det drejede sig derimod om at fremlægge sandsynlige modeller for, hvordan stoffets mikroorganisation var, ud fra en lang række teoretiske antagelser og eksperimenter, som gensidigt understøttede hinanden. Hvis man antager, at energi ikke kan eksistere i mindre enheder end lyskvanter, og elektricitet ikke i mindre mængde end den, som en elektron besidder, så må al erkendelse i form af observation eller eksperimenter nødvendigvis ske ved hjælp af disse enheder. Vil man studere lyskvanter, kan det kun ske via lyskvanter. Der er ingen anden måde at få kendskab til disse fænomener end ved at studere dem via den samme type fænomener. Det er for så vidt samme situation, som findes på det makroskopiske niveau, hvor man ikke kan studere kosmiske sammenhænge ved hjælp af signaler med hastigheder over lysets. Vi er fundamentalt begrænsede i vores erkendemuligheder af de fænomener, vi ønsker at studere. Målinger – kernen i ethvert forsøg på at få viden om verden – er selv fysiske begivenheder og dermed underlagt den fysiske verdens lovmæssigheder og begrænsninger. En af fysikkens mere problematiske opgaver er også at vinde indsigt i disse begrænsninger.

## Usikkerhedsprincippet

I årene 1924-25 fremkom den unge tyske fysiker Werner Heisenberg (1901-76) med en ny teori om de atomare fænomener, der skulle vise sig at få vidtrækkende betydning. Heisenberg forsøgte at fremlægge en teori for atomare fænomener, der startede med alene at gå ud fra de observerbare fænomener. Det var først og fremmest en række tal, der angav frekvenser for visse linjer i brints spektrum. Heisenberg fremlagde nu en matematisk model, i hvilken man kunne beregne alle disse tal. Som input i modellen skulle anvendes de forskellige energitilstande, som en elektron kunne være i, og som output fik man så en række tal, der beskrev, hvad der kunne observeres. De energitilstande, et atom kan befinde sig i, er afhængige af de bohrske “spring”, og de forekommer med en vis sandsynlighed. Derfor må beskrivelsen af de atomare fænomener basalt set indeholde en lang række sandsynligheder for, at bestemte energiforandringer sker. Det var muligt for Heisenberg at redegøre for de observerede fænomener, og sågar at forudsige nye – men det var svært at give den rent matematiske model fysisk mening.

For yderligere at komplicere situationen fremkom næsten samtidig

et alternativ til Heisenberg, som baserede sig på en klar opfattelse af, at elektronen var et stofligt bølgefænomen. Teorien var en fortsættelse af de Broglies antagelser om, at elektroner både var partikler og bølger, og den blev fremsat af østrigeren Erwin Schrödinger (1887-1961). Det hele gik nu meget hurtigt. Det blev vist rent matematisk, at Schrödinger-ligningen og Heisenbergs ligninger var ækvivalente i den forstand, at de med samme input gav samme output. De var således lige gode til at redegøre for de faktisk observerede data. Men de var fundamentalt uenige, hvad angik den måde, de anskuede virkeligheden på. Schrödinger antog, at der fandtes en art materie-bølger, at stof basalt set var noget andet end en ansamling partikler.

Heisenbergs lærer Max Born (1882-1970) fortolkede nu kvadratet på Schrödinger-ligningen som sandsynlighederne for at finde en partikel et givet sted, og ikke som egenskaber ved en faktisk eksisterende bølge, og Heisenberg observerede to bemærkelsesværdige træk ved sin egen ligning. For det første brød visse dele af den med den grundlæggende regel for multiplikation, at faktorernes orden er ligegyldig, dvs. at  $ab = ba$ . For det andet indeholdt den det problem, at hvis man skulle tolke dens faktiske indhold, involverede den ikke kun det observerede, men også observatøren – forstået på den måde, at observationen skete via processer af samme slags som dem, der blev observeret. Det kom sig af, at Heisenberg antog, at påvisningen af en elektron måtte ske med lys. Men lys og elektronen ville fysisk interagere, og resultatet – det observerede – ville være påvirket af denne interaktion, dvs. man ville ikke observere objektet, men resultatet af interaktionen mellem objektet og det medium, med hvilket man observerede. Det skyldtes de forhold om interaktion mellem lys og partikler, som Compton havde påvist.

Heisenberg formulerede i 1926-27 sine konklusioner. De gik ud på, at det ikke var muligt nøjagtigt at bestemme en elektrons position og dens moment. Hvis man ville vide meget om den ene egenskab, ville det betyde mindre viden om den



Heisenbergs usikkerhedsprincip siger, at det ikke er muligt nøjagtigt at bestemme en partikels position og moment (som er et produkt af partiklens masse og hastighed). Usikkerhedsprincippet er et direkte resultat af partikel-bølge-dualiteten, som den f.eks. viser sig i fotoners skizofrene opførsel i dobbeltspalteeksperimentet (s. 250). Den nedre grænse for målingens nøjagtighed er givet ved  $\hbar/2$ , hvor  $\hbar$  er den reducerede Plancks konstant, der angiver størrelsen af en kvant, som er ca.  $10^{-34}$  Js.

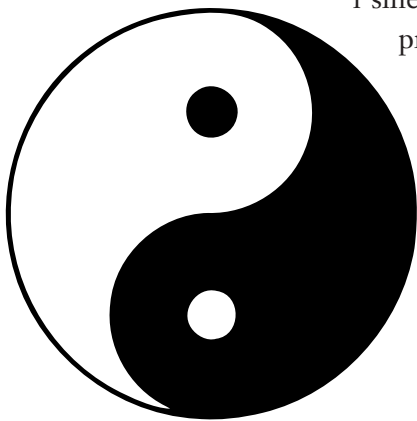
anden, og omvendt. Omfanget af denne usikkerhed var knyttet til Plancks konstant. Det forhold, at energi ikke kunne findes i vilkårligt små mængder andet end i frie fotoner, satte altså en grænse for, hvad man kunne vide om elementære størrelser som elektronen. Det betød, at enhver fundamental naturbeskrivelse 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.”