

DAVID FAVRHOLDT

Niels Bohrs Filosofi

Når vi taler om »atomernes verden« i forhold til den makroskopiske virkelighed, som vi har med at gøre i dagliglivet, må vi gøre os klart, at vi i den atomare verden har med meget små størrelser at gøre. F.eks. er et brintatoms udstrækning i normaltstanden ca. en hundredmilliontedel af en centimeter. Kernen i brintatomet har en masse så lille, at der skal ca. en billion billioner (10^{24}) til, for at vi kan nå op på 1 gram, og en elektrons masse er under normale forhold næsten 2000 gange mindre. Det var ikke så mærkeligt, at mange fysikere i tiden omkring Niels Bohrs fødsel anså det for umuligt at udforske de atomare forhold. Men opdagelsen af radioaktiviteten og af at strømme af elektroner og andre atomdele kunne frembringes i lufttomme udladningsrør, gav nyt håb, og ved at bruge påvirkningsmidler af samme størrelsesorden som atomkernen selv, kunne Rutherford i 1911 vise nogenlunde, hvordan massefordelingen var i f.eks. guldatomer. Efter Bohrs første store indsats i 1913 stod det pludselig tillige klart, at de forskellige karakteristiske spektrallinier, som grundstofferne danner ved spektralanalyse, læst på den rigtige måde direkte »fortæller« om en række forhold i det ydre atom. Senere udvikledes tågekammeret og en række andre iagttagelsesmidler, som kom til at muliggøre hele det eksperimentelle fundament for kvantemekanikken!

Men – og det er den anden ting, som man må gøre sig klart – der er ikke tale om, at vi på en eller anden måde direkte kan se ind i den atomare verden. Det er ikke, som da man omkring 1680 opfandt mikroskopet. Da var der mange ting, amøber, blodlegemer, bakterier etc., som man nu pludselig kunne se, og som ingen tidligere havde set. Ved de atomare forsøg kommer vi ikke i denne forstand til at se noget nyt. De apparater, som man bruger i atomfysikken, er alle en slags forstærkeranlæg, hvor den effekt, man iagttager, ikke ligner det, der frembringer den eller sætter den i gang. Vi kommer aldrig til at se en elektron eller et atom. Men via forsøgsapparatet kan vi, som f.eks. ved spektralanalyse

af en glødende luftart, slutte os til en mængde forhold vedrørende atomernes struktur.

Dette hænger sammen med følgende forhold: Enhver fysisk iagttagelse kræver en energiudveksling over en vis tid. F.eks. må en iagttagelse af to kugler, der støder sammen, forudsætte, at de belyses eller på anden måde tilføres en energi udefra under sammenstødet, og at de afgiver noget af denne energi igen til de instrumenter, som man iagttager dem med. Og det samme gælder ved de atomare forhold, ved ethvert eksperiment og enhver måling.

Men som bekendt opdagede den tyske fysiker Max Planck allerede år 1900, at energi kun kan eksistere i bestemte kvanta, at energi i en vis forstand lige som stoffet er »atomiseret«. Energi kan ikke eksistere i vilkårligt små mængder. Enhver nok så lille mængde er altid et multipulum af den såkaldte Plancks konstant, h , og h har netop en sådan størrelse, at selv den ringeste energimængde, der må fordres, for at vi kan undersøge en række atomare forhold, altid er så stor, at den berøver os muligheden for nøjagtigt at bestemme energiudvekslingen mellem de atomare forhold, som vi undersøger, og de iagttagelsesinstrumenter, som vi undersøger dem med. Hvad det medførte af problemer, skal jeg om lidt vende tilbage til.

Forinden vil jeg kort skitsere den situation, atomfysikken befandt sig i ved årets begyndelse i 1927.

I tiden fra 1913, hvor Niels Bohr havde fremsat sin atomteori, og til 1927 havde der fundet en rivende udvikling sted i kvantefysikken. Man havde fået afklaret principperne for »opbygningen« af det ydre atom og kunne herudfra forklare alle de oprindelige ejendommeligheder i spektralanalysen, hele det periodiske system for grundstofferne samt en mængde andre fysiske og kemiske forhold. Men samtidig var mange spørgsmål ubesvarede. Man havde levet med en atommodel, som var noget af et paradoks: I et brintatom for eksempel kredser en elektron rundt om kernen med en meget stor hastighed, men uden at afgive energi, til trods for at den er elektrisk ladet. Elektronen kan kun befinde sig i ganske bestemte baner, men hvorfor? Elektronen har et spin, men at den faktisk spinder er en umulig antagelse. Ved hjælp af billeder lånt fra den klassiske mekanik var man nået så langt, samtidig med at mange af de principper, som man havde indført, var i modstrid med al klassisk fysik.

I 1925 lykkedes det Werner Heisenberg at udforme den såkaldte matrix-mekanik. Hans metode var positivistisk, idet han kun holdt sig til, hvad der kunne iagttages. Matrix-mekanikken indeholder derfor ikke

sådanne begreber som elektronens *bane* i en stationær tilstand eller elektronens omløbstid. Heisenberg tillader kun begreber som stationær tilstand, et atoms energiindhold, energikvanters svingningstal o.s.v. altså udelukkende de begreber, som vi finder i Bohrs postulater fra 1913. I Heisenbergs matrix-mekanik finder vi bl.a. alle de principper og regnearter, som vi har brug for ved redegørelsen for de atomare fænomener, der angår det ydre atom.

Men næsten samtidig med at Heisenberg udførte dette arbejde – sammen med Max Born og Pascual Jordan – udviklede Erwin Schrödinger sin såkaldte bølgemekanik. Den byggede på en hypotese, som den franske fysiker Louis de Broglie havde fremsat i 1924, og som gik ud på, at elektroner har bølgekarakter eller kan tilordnes en bølge, hvor bølgelængden er

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad \left(= \frac{h}{m \cdot v} \right).$$

h er Plancks konstant, p er impulsen, som er lig med massen (m) gange hastigheden (v). Schrödinger udviklede denne hypotese til en konsistent bølgemekanik, der på alle punkter stod mål med Heisenbergs matrix-mekanik. Det viste sig ret hurtigt, at de to mekanikker var ækvivalente, og at de må betragtes som to udtryk for samme matematiske formalisme.

I 1927 blev det eksperimentelt påvist, at elektroner har bølgekarakter, d.v.s. bl.a. kan danne interferensfænomener, som vi kender dem fra bølger i vand eller fra lys. Fra tidligere forsøg var det imidlertid lige så klart, at elektroner opførte sig som partikler.

Den dualisme, som man her blev præsenteret for, var ikke ukendt. Fra et fuldstændig sikkert erfaringsgrundlag ved vi, at lys er bølger, der kan brydes, udslukkes, interferere o.s.v. Men så tidligt som i 1905 forklarede Einstein den såkaldte fotoelektriske effekt ved at antage, at lys er partikler, senere kaldt fotoner, og i 1923 viste eksperimenter, at fotoner ved elastiske sammenstød med elektroner opfører sig fuldstændig som partikler. Niels Bohr havde indtil da vægret sig ved at tro på lysets dobbelt-natur, som Einstein faktisk plæderede for. Men efter 1923 var Bohr ikke i tvivl, og efter bølgemekanikkens fremkomst fastholdt han, som vi skal se, bølge-partikel-dualismen, hvorimod Einstein pudsigt nok gik over i den anden lejr og mente, at den var umulig.

Situationen var paradoksal, og der opstod hurtigt stor uenighed om, hvordan kvantemekanikken skulle fortolkes. Ifølge vore almindelige begreber om partikler og bølger, som er blevet præciserede i den klassiske fysik, er en partikel en skarpt afgrænset enhed, og to partikler kan ikke

befinde sig på samme sted til samme tidspunkt. Bølger er ikke afgrænsede i samme forstand, og to eller flere bølger eller bølgetog kan udmærket være på samme sted samtidig, de kan overlejre, udslukke eller forstærke hinanden og fortsætte uforandrede efter et sådant sammentræf.

Et flertal af fysikerne fastholdt, at elektroner måtte være partikler. *De Broglie* mente en overgang, at en elektron var en partikel, der blev båret eller styret af en bølge. *Schrödinger* mente, at en elektron slet og ret var en »bølgepakke«, oven i købet en elektromagnetisk bølge. *Max Born* udformede den meget anvendelige fortolkning, at *Schrödingers* bølgeligninger ikke beskrev reelt eksisterende bølger, men blot angav sandsynligheden for, hvor man kunne finde elektronen i et givet eksperiment. Elektronen var altså en partikel, der hele tiden befandt sig inden for amplituden af en bølge, der blot var en tankestørrelse. *Heisenberg* forsøgte at fastholde, at den atomare verden var principielt uanskelig, men forfaldt ofte alligevel til at tale om elektronen som en partikel. *Niels Bohr* havde, som vi skal se, et helt femte synspunkt, netop den fortolkning af situationen, som skulle vise sig at have den største bærekraft.

Fra september 1926 og til midt i februar 1927 diskuterede Heisenberg og Bohr – i begyndelsen sammen med *Schrödinger* – intenst fortolkningsproblemet. Heisenberg var da lektor ved Københavns Universitet, og han og *Niels Bohr* boede begge på instituttet på Blegdamsvej. Det var opslidende, langvarige diskussioner, som først blev afbrudt, da Bohr i februar 1927 tog på en måneds skiferie i Norge. Her – alene i Gudbrandsdalen – stod løsningen pludselig klar for ham. Bagefter kunne man se, at løsningen indeholdt mange ideer, som han gennem årene havde fremsat og vendt og drejet – men under skiferien faldt det hele på plads.

Også for Heisenberg skete der et afgørende ryk i hans tænkning. Han vandrede Fælledparken tynd, og på en natlig spadseretur nåede han gennem en kæde af ræsonnementer pludselig frem til de berømte usikkerhedsrelationer eller ubestemthedsrelationer, der nu bærer hans navn.

For at forstå Bohrs løsning er det en hjælp at kende Heisenbergs ubestemthedsrelationer, så lad os se på dem først. En partikel er i den klassiske fysik karakteriseret ved tre ting: Til enhver tid er den et bestemt sted, den har en masse og den har en hastighed – eller er i hvile, hvilket jo er et relativt begreb. Det, Heisenbergs usikkerhedsrelationer udsiger, er, at hvis man for en elektron i bevægelse vælger at bestemme dens sted, så vil bestemmelsen af dens hastighed eller dens hastighed gange dens masse – også kaldet dens impuls – være behæftet med en ubestemthed. Og hvis man vælger at bestemme dens impuls, så vil dens stedbestemmelse

være behæftet med en ubestemthed. Man kan altså aldrig samtidig tillægge den både et bestemt sted og en bestemt impuls. Produktet af ubestemtheden i sted og ubestemtheden i impuls er altid af en størrelse, der svarer til Plancks konstant. Generelt kan vi altså skrive, at

$$\Delta p \cdot \Delta q \approx h;$$

eller, hvis vi taler om, at elektronen bevæger sig i et tre-dimensionalt rum:

$$\Delta p_x \cdot \Delta q_x \approx h.$$

$$\Delta p_y \cdot \Delta q_y \approx h.$$

$$\Delta p_z \cdot \Delta q_z \approx h.$$

Hertil kan føjes en fjerde ubestemthedsrelation:

$$\Delta t \cdot \Delta E \approx h$$

der altså udsiger, at der er et tilsvarende reciprokt forhold mellem ubestemtheden ved målingen af elektronens energi, E og tidspunktet for målingen, t .

Heisenberg illustrerede ubestemthedsrelationerne ved et tankeeksperiment: Hvis vi tænker os et mikroskop, der er så stærkt, at vi kan se en elektron ved hjælp af det, så skal vi for at se elektronen belyse den. Men lys er jo en energiform, og som sådan kan lys kun forekomme i ganske bestemte energikvanter, hvor lysets energi hele tiden er et produkt (multiplum) af lysets frekvens og Plancks konstant ($E = h \cdot \nu$). Hvis vi ved iagttagelsen af elektronen bruger lys med en meget lav frekvens, altså med meget ringe energi, så vil vi kunne måle elektronens impuls nogenlunde nøjagtigt, medens stedbestemmelsen vil blive meget unøjagtig. Hvis vi bruger højfrekvent lys, vil impulsbestemmelsen blive meget unøjagtig, fordi lyskvantets eller lyskvanternes impuls vil slå elektronen ud af dens bane; lyskvantets impuls vil påvirke elektronens impuls på en principielt uberegnelig måde.

Måske er dette lettere at forstå, hvis vi bruger et meget groft billede. Lad os antage, at en håndbold ruller hen over et gulv i en gymnastiksal, hvor der er absolut mørkt. Vi kan ikke se den, men heldigvis har vi en mængde selvlysende tennisbolde. Ved at kaste dem mod håndbolden og se, hvordan de bliver slået tilbage, kan vi – hvis vi nøje beregner indfalds- og udfaldsvinkel og kender tennisboldenes baner, altså deres sted og impuls under hele forløbet – få et kendskab til håndboldens bane, altså dens sted og impuls under dens bevægelse. Men for at få så god en

stedsbestemmelse som mulig må vi give tennisboldene en stor hastighed, og herved ændrer de på håndboldens impuls. Giver vi dem en lav hastighed, får vi en nøjagtigere bestemmelse af impulsen. Til gengæld bliver stedsbestemmelsen mere unøjagtig.

Både dette sidste eksempel og Heisenbergs mikroskop-eksempel er nok en måde, hvorpå man kan forklare ubestemthedsrelationerne, men samtidig er begge eksemplerne fysisk og filosofisk set absolut vildledende. Det, det drejer sig om, er nemlig for det første, at vi *principielt* ikke kan bestemme både en elektrons sted og dens impuls helt nøjagtigt til et bestemt tidspunkt, men for det andet tillige, at *det ikke har mening* at tillægge elektronen et bestemt sted og en bestemt impuls til et givet tidspunkt.

Hvorfor ikke? I eksemplet med håndbolden må vi jo antage, at bolden ruller i en bestemt bane hen over gulvet, hvad enten vi iagttager den eller ej. Kan vi ikke lige så vel sige, at elektronen i sig selv har både bestemte stedkoordinater og bestemte impulskoordinater, men at vi bare er i den uheldige situation, at vi ikke kan måle begge dele nøjagtigt til et givet tidspunkt?

Nej, det kan vi ikke sige. *For det første* ville det være mærkeligt, om elektronen i sig selv havde både sted og impuls med fuldt nøjagtige værdier til ethvert tidspunkt, thi i så fald ville elektronen jo slet og ret være en partikel, og det ville så være logisk umuligt at forklare, hvordan elektroner kan optræde som bølgefænomener. *For det andet* skal vi lægge mærke til, at det er vildledende at tale om, at en elektron *har* egenskaber som sted og impuls. Sådanne begreber er nogle, *vi* har indført for at kunne beskrive og forudsige fysiske begivenheder. De får deres mening ud fra de definitioner vi har indført, det målesystem vi benytter, og de iagttagelsessituationer, hvor vi kan anvende dem. Så det er rigtigere at sige, at vi *tillægger* en elektron sted og impuls, end at sige, at den i sig selv *har* egenskaberne sted og impuls. *For det tredje* kan det vises, at umuligheden af at tillægge elektronen nøjagtig sted og impuls til et givet tidspunkt ikke skyldes manglende teknisk kunnen, altså at vi ikke kan lave f.eks. mikroskoper, der er stærke nok. Umuligheden er af rent begrebsmæssig eller logisk art. Ved en nærmere analyse af Heisenbergs eksempel med mikroskopet kunne Bohr påvise, at det ligger i selve begrebet mikroskop, at elektronen må blive afbildet ved en bøjningsplet, og at f.eks. stedsbestemmelsens nøjagtighed er afhængig af såvel lysets bølgelængde som objektiv-linsens åbningsvinkel. Bohrs pointe var, at de begreber, som indgår ved definitionen af et mikroskop som det, Heisenberg forestiller sig, rent logisk medfører ubestemthedsrelationerne – og at dette i

øvrigt gælder for alle mulige andre iagttagelsesmidler, man kunne tænke sig udover mikroskoper. Mere generelt kan det siges, at ubestemthedsrelationerne rent matematisk – eller logisk – følger af den kvantemekaniske formalisme. Så hvis man påstår, at en elektron selvfølgelig i sig selv har sted og impuls og dermed en veldefineret bane, så påstår man dermed, at hele kvantemeknikken er en forkert begrebsbygning.

Det hævdes ofte, at Heisenbergs ubestemthedsrelationer var udgangspunktet for Bohrs fortolkning, men det er ikke rigtigt. Da Bohr vendte hjem fra Norge i marts 1927, havde han som sagt fået afklaret sit synspunkt. Han var naturligvis fyr og flamme over ubestemthedsrelationerne, men absolut ikke begejstret for den fremstilling, Heisenberg havde givet af dem. Ubestemthedsrelationerne var en konsekvens af bølgepartikel-dualismen og ikke et udgangspunkt.

I september 1927 forelagde Niels Bohr ved en fysik-kongres i Como i Italien for første gang offentligt sin fortolkning. I de følgende år blev den mere og mere et centralt diskussionsemne, og der udspandt sig især mellem Einstein og Bohr en dybtgående diskussion af forholdene. En opsummering af denne diskussion finder man i Bohrs artikel: Diskussion med Einstein om erkendelsesteoretiske Problemer i Atomfysikken, fra 1949. Der kan næppe være tvivl om, at denne artikel er en af de væsentligste, der er skrevet om erkendelsesteori i det 20. århundrede.

I artiklen diskuterer Niels Bohr et tankeeksperiment, to-spalte-eksperimentet, der illustrerer bølge-partikel-dualismen. Der er desværre ikke plads til her at gennemgå det i alle detaljer, men det væsentlige i sagen er følgende: Da elektroner i visse eksperimenter opfører sig som bølger, kan vi tænke os følgende eksperiment (se fig. 1):

En parallel strøm af elektroner eller fotoner kommer fra venstre, passerer gennem den første skærm og derefter gennem de to spalter i skærm II. III er en fotografisk plade, og på den vil der danne sig et såkaldt interferensmønster, hvis begge spalterne i skærm II er meget snævre og afstanden imellem dem er meget lille, d.v.s. af samme størrelsesorden som elektronernes bølgelængde. Mønsteret fremkommer ved, at de to bølgetog fra spalte A og spalte B blandes og derved skiftevis forstærker hinanden og udslukker hinanden.

Undersøger vi nøje den fotografiske plade, vil vi se, at sværtningen fremkommer ved, at den enkelte elektron aktiverer et enkelt sølvbro-midkorn på pladen. Elektronen opfanges altså på pladen *ikke* som en udtværet bølge, men som en nogenlunde afgrænset enhed. Dette forhold har fået mange til at hævde, at det hele må være et partikelfænomen. Elektronerne må løbe som partikler igennem A og B og interfererer så på

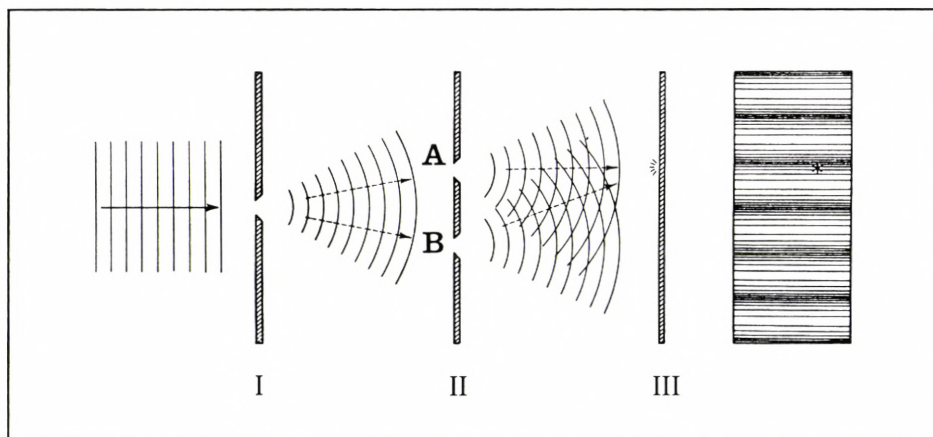


Fig. 1.

en eller anden mystisk vis med hverandre, så vi får bølgemønsteret på den fotografiske plade.

Denne opfattelse er imidlertid ikke holdbar. For det første har det i dette forsøg slet ingen mening at tale om, at en elektron bevæger sig gennem *enten* A eller B. Vi kan gøre elektronstrålen så svag, at kun en enkelt elektron ad gangen slipper igennem skærm I, f.eks. en elektron pr. minut. Interferensmønsteret vil da dannes langsomt, men mønsteret vil hele tiden blive det samme. Hvis man nu under hele forsøget betragter elektronen som en partikel med en bane, må den enkelte elektron bevæge sig igennem enten A eller B. En måde at afgøre dette på kunne være at lukke for A under første halvdel af forsøget og derefter åbne for A, men lukke for B under resten af forsøget. I så fald ville vi jo vide, at alle elektroner, der sværtede pladen i den første halvdel af forsøget gik igennem A, og at resten gik igennem B. Men hvis vi bærer os således ad, får vi slet ikke noget interferensmønster. Vi får i stedet to sværtningspletter.

Hele det oprindelige forsøg, der sætter os i stand til at måle elektronerne bølgelængde, er blevet erstattet med et forsøg, der fremdrager elektronerne partikelkarakter og tillader en stedsbestemmelse af partiklerne. For at sige det lidt paradoksalt: Hvis den ene af de to spalter er lukket, så vil elektronen opføre sig som en partikel. Hvis begge er åbne, vil den opføre sig som en bølge.

Går vi tilbage til det oprindelige forsøg, kan vi altså sige, at det ikke har mening at tale om, hvilken af spalterne den enkelte elektron går igennem. Det er ikke bare et spørgsmål om, at vi ikke kan afgøre det,

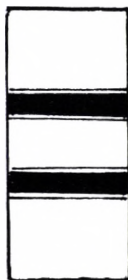


Fig. 2.

ikke måle det på nogen måde, men at elektronerne alligevel i det skjulte »i sig selv« går gennem enten A eller B. Thi gjorde de det, så ville vi ikke få noget interferensmønster, men i stedet den dobbeltsværtning, som vi ser på fig. 2.

I den nævnte artikel om Bohrs diskussioner med Einstein vil man kunne se, hvorledes alle muligheder for at underdele interferensforsøget gennemprøves. Resultatet er, som Bohr viser, at man hele tiden blot kommer til at skabe et andet forsøg end det oprindelige, eller at man f.eks. i overensstemmelse med ubestemthedsrelationerne opnår fuld information om elektronens sted, men mister al mulighed for at tale om dens impuls – læg mærke til, at jeg ikke siger, at man mister al *viden* om dens impuls, for det kunne hurtigt tolkes derhen, at elektronen i den givne situation havde en impuls, men at vi bare ikke kunne kende den. Men det er der ikke tale om. Den fulde viden om elektronens sted medfører, at vi ikke kan *tilskrive* elektronen en veldefineret impuls. Bohr brugte undertiden det udtryk, at impulsen var blevet *logisk begravet* i forsøgsopstillingen. Netop for at understrege, at det ikke på nogen måde var en blot teknisk begrænsning af vor viden eller i det hele taget noget, der på en eller anden måde fysisk skulle være skjult for os.

To-spalte-eksperimentet har været genstand for en omfattende diskussion igennem årene, og der er skrevet hundredevis af bøger og artikler om det. Hvad jeg her har sagt, er umådelig lidt, men forhåbentlig nok til, at man vil have de tilstrækkelige forudsætninger til at kunne forstå Niels Bohrs almene holdning i fortolkningen af kvantemekanikken.

Ifølge Bohr kan vi lave forsøg eller eksperimenter, hvor elektroners (eller fotoners) bølgekarakter viser sig, og vi kan også lave forsøg, der klart viser deres partikel-karakter. Men disse forsøg udelukker gensidigt hinanden; vi kan ikke til et givet tidspunkt foretage begge typer forsøg med samme elektron eller ensemble af elektroner. Imidlertid supplerer de to typer forsøg hinanden, de er begge nødvendige for etableringen af kvantemekanikken og kan derfor ikke forstås uafhængigt af hinanden.

Sådanne forsøg, der gensidigt udelukker hinanden, men som tillige supplerer hinanden og i videre forstand forudsætter hinanden, kalder Niels Bohr for komplementære i forhold til hinanden. Imellem dem råder et forhold, der kaldes *komplementaritet*.

I Bohrs skrifter finder man ikke nogen klar, eksplicit definition af komplementaritet. Skulle man give en med særligt henblik på bølgepartikel-dualismen, måtte den lyde omtrent således: En given teori giver plads for en komplementær fortolkning, hvis den tillader to *beskrivelser* af sit emneområde, som refererer til dette, som gensidigt udelukker hinanden, og som hver for sig ikke gør udtømmende rede for alle fænomener inden for området.

Alle »bølgebilleder« udelukker »partikelbilleder« inden for kvantemekanikken, ligesom det omvendte også gælder. Men også inden for partikelbilledet kan der være komplementære forhold, f.eks. mellem en rumtids-beskrivelse af en partikels bevægelse på den ene side og en årsagsbeskrivelse, hvor impuls og energi er i focus, på den anden side. Dette betyder, at den deterministiske beskrivelse, som vi kender fra klassisk fysik, er uigennemførlig i kvantemekanikken. Betingelsen for at lave en deterministisk beskrivelse af en partikels bevægelse er, at man samtidig kan kende både sted og impuls. I kvantemekanikken lader dette sig ikke gøre, men ud fra Schrödingers bølgeligninger kan man altid angive sandsynligheden for, hvor en elektron, f.eks. i et atom i en bestemt stationær tilstand, vil blive registreret ved en måling. Bølgepartikel-dualismen indebærer, at deterministiske beskrivelser må erstattes med sandsynlighedsudsagn.

Hvis vi atter vender tilbage til to-spalte-eksperimentet, kan det tjene som et eksempel-materiale for de fleste af Bohrs ideer vedrørende fortolkningen af kvantemekanikken. For det første kan eksperimentet ifølge Bohr, som jeg kort nævnte det, ikke underdeles. Sagt med andre ord betyder det, at vi ikke kan tale om, hvordan forløbet er undervejs – vi kan ikke fastlægge elektronernes baner og fastslå, om de går igennem A eller B. Men dette skyldes ikke, at noget er skjult for os, for vi ved, at *hvis* elektronerne havde bestemte baner og gik igennem enten A eller B (men ikke begge), så ville der slet ikke være noget interferens-fænomen. Forsøgets udfald er bestemt af forsøgsopstillingen (f.eks. er begge spalter åbne i skærm II og denne er fastgjort til underlaget) samt af den uanalyserbare energiudveksling mellem apparaturet og det atomare system – og denne er betinget af, at der findes noget, der kaldes Plancks konstant.

Forsøger man at underdele eksperimentet, får man blot et helt andet eksperiment. F.eks. foreslog Einstein, at man for at afgøre, hvilken spal-

te elektronen gik igennem, ophængte skærm II i en fjeder, så at man kunne aflæse af dens impuls, om en elektron var gået igennem A eller B. Men hermed behæftes skærm II selv med en ubestemthed i sted og impuls, fordi den løsnes fra det oprindelige forsøgsapparat og gøres til en del af det, der skal undersøges. Man flytter så at sige grænsen imellem subjekt og objekt, imellem det, der skal iagttages, og det, man iagttager med.

To-spalte-forsøget kan altså ikke underdeles. Det er, hvad Bohr fra 1939 og fremefter kaldte et kvantefænomen, som altså ikke er en sekvens af fysiske begivenheder, men et individuelt fænomen, en slags »begivenheds-atom«. For at gøre rede for dets udfald, må man gøre rede for hele den eksperimentelle opstilling. Dette kan man kun gøre rede for i det sprog, som vi bruger i den klassiske fysik, suppleret med vort almindelige dagligsprog, for hele den eksperimentelle opstilling er jo en makroskopisk foreteelse. Og når vi beskriver forsøgets udfald, er alle de begreber, vi bruger, brugt i nøjagtig den betydning, vi bruger dem i i klassisk fysik. Således mener vi med sted, impuls, bølgelængde og frekvens nøjagtig det samme som i klassisk fysik. Vi har imidlertid opdaget, at der er begrænsninger på disse begrebers anvendelse. Vi er i den situation, som Bohr siger det, at enhver given anvendelse af klassiske begreber udelukker den samtidige anvendelse af andre klassiske begreber, som i en anden sammenhæng er lige så nødvendige for forklaringen af fænomenerne.

I sine første foredrag fra 1927 og 1929 brugte Bohr udtrykkene subjekt og objekt og fremhævede, at objekter i kvantefysikken blev påvirket af det subjekt, der undersøgte dem. Det blev desværre i vide kredse misforstået. Man anså Bohr for at være filosofisk subjektivist eller idealist, en af dem der mener, at der ikke findes fysisk stof, men kun sansninger eller oplevelser – eller i bedste fald at der findes en omverden, men at vi altid kun kan have en subjektiv, personlig beskrivelse af den. Bohrs synspunkt er et ganske andet, og jeg skal nu søge kort at skitsere det.

I klassisk fysik er vi i den situation, at vi ikke behøver at tage hensyn til Plancks konstant, altså til at energi altid må forekomme i bestemte mindstemængder. Når vi iagttager en kugle, der ruller ned ad et skråplan, skal vi f.eks. belyse den for at kunne lave en filmoptagelse af den; men lyskvanterne er her så forsvindende små i forhold til kuglens størrelse, at vi ikke kan registrere nogensomhelst vekselvirkning mellem kuglen og det, vi iagttager den ved hjælp af. Vi er i stand til at give en objektiv beskrivelse af forløbet, og hermed menes, som ofte fremhævet af Bohr, at vi kan give en entydig eller u-tvetydig beskrivelse af hændelsesforløbet. Dette betyder igen, at vi kan fortælle andre, hvad der sker,

uden at henvise til, hvem, der har gjort iagttagelsen, eller med hvilke måleinstrumenter, den er registreret. Der er altså dels et skarpt snit imellem hændelsesforløbet og iagttagelsesinstrumenterne, dels et skarpt snit imellem iagttagelsesinstrumenterne og den eller de personer, der aflæser dem.

Men går vi nu til kvantefysikken, hvor det drejer sig om uendelig små værdier af masse, ladning og impuls etc., er situationen en anden. Her er vi stadig henvist til at bruge makroskopiske iagttagelsesinstrumenter og apparatur, som vi følgelig må beskrive i klassisk fysisk sprog, suppleret med, som Bohr fremhævede, vort almindelige dagligsprog. Her må vi, som jeg sagde til indledning, bruge spektroskopier, udladningsrør, elektronmikroskopier, tågekamre og fotografiske plader eller film og aflæse ved hjælp af målestokke, visserudslag o.s.v. Her er stadig et absolut, skarpt snit imellem iagttagelsesinstrumenterne og den eller de personer, som bruger dem og aflæser dem. Men mellem selve de undersøgte atomare systemer og iagttagelsesinstrumenterne er der nu en energiudveksling, som på grund af Plancks konstant er væsentlig. Den medfører, at man ikke kan anvende de klassisk-fysiske begreber på samme måde som i den klassiske fysik. Man er bestandig i iagttagelsessituationer, hvor man kan anvende nogle, hvis man samtidig giver afkald på anvendelsen af andre. Det er dette komplementaritetsforhold, vi er ude for, hvis vi f.eks. vil måle elektroners bølgelængde og følgelig må give afkald på at tale om dem som partikler, der bevæger sig ad bestemte, veldefinerede baner. Eller hvis vi vil give en rum-tids-beskrivelse af en elektrons bevægelse og da må give afkald på at tillægge den en bestemt impuls. Alt efter hvordan vi arrangerer forsøgsapparatet, der kan beskrives ud-tømmende klassisk-fysisk, kan vi flytte på snittet eller skillelinjen mellem det, vi iagttager, og det, vi iagttager ved hjælp af. Derfor er vi også nødt til ved enhver redegørelse for resultaterne for målinger af den nævnte art at gøre rede for hele forsøgsopstillingen og det apparatur, vi har anvendt. I konsekvens heraf fremhævede Bohr, at vi ved »fænomen« i kvantemekanikken må forstå iagttagelser, der er opnåede under angivne omstændigheder, der omfatter en redegørelse for hele forsøgsanordningen.

Det er klart, at Bohr var filosofisk realist i den forstand, at han mente, at der findes en omverden, også en atomar verden, der eksisterer uafhængigt af, om vi mennesker eller andre levende væsener erkender den eller ej. Men samtidig betonede han, at hvad vi kan sige om den fysiske omverden, er det, vi når frem til gennem den objektive eller éntydige fysiske beskrivelse. At tale om hvordan virkeligheden er i sig selv, hvil-

ket mange filosoffer har for vane at gøre, bagom den modsigelsesfrie beskrivelse, som fysikken giver os, var for ham at tale sort. Når nogen hævdede, at elektroner selvfølgelig altid »i sig selv« måtte have en veldefineret impuls og et veldefineret sted, var hans svar, at hvis de med sted og impuls mente det samme, som vi gør i klassisk fysik, som igen er en forfinelse af en række begreber i vort daglige sprog, så var det en falsk påstand, og hvis de mente noget andet med begreberne, så brugte de dem på en uforståelig eller tvetydig måde.

Af denne grund var han også betænkelig ved et udtryk som »verdensbillede« eller »det moderne fysiske verdensbillede«. Sådanne udtryk antyder jo, at man på en eller anden måde har et eller andet engleagtigt ståsted, hvorfra man dels kan se hele virkeligheden og dels hele beskrivelsen af virkeligheden og dernæst fastslå, at de stemmer overens – altså i en eller anden forstand, der skulle være analog til, at man kan stå halvtreds meter fra det skæve tårn i Pisa med et fotografi af det skæve tårn i hånden og fastslå, at billedet passer med virkeligheden. Når det drejer sig om vor erkendelse, som den foreligger såvel i dagliglivet som i videnskaben, har vi ikke et sådant ståsted. Vi *er* i virkeligheden og er, som han ofte sagde med en henvisning til kinesisk filosofi – selv om han nu egentlig nok havde det fra Poul Martin Møller – på en gang skuespillere og tilskuere på livets scene. Det, som Bohr her gør op med, er den såkaldte korrespondens-teori for sandhed, som er fremherskende gennem hele filosofiens historie, og som i vore dage finder sit kraftigste udtryk i den dialektiske materialisme.

Til forskel fra den nævnte afbildningsteori for forholdet mellem virkelighed og erkendelse eller beskrivelse – en teori som Einstein hang fast i, og som nok var den væsentligste hindring for, at han blev enig med Bohr – var Bohrs opfattelse, hvad man måske kunne kalde »situationistisk« – men lad mig straks slå fast, at han aldrig brugte denne vending. Han talte derimod gerne om »improvisation«, forstået således, at vi i alle erkendesituationer har noget, som vi bringer i focus, medens andet der ved henvises til et ubestemt randfelt – vi kan ikke have et samlet billede, et på alle punkter på én gang entydigt sprog. Vi kender det fra dagligsproget, hvor vi har en række begrebspar, der refererer til iagttagelsessituationer, der gensidigt udelukker hinanden, som f.eks. barmhjertighed og retfærdighed ved opdragelsen af børn, overvejelse og beslutning, instinkt og fornuft, for blot at nævne nogle. En eksplicit definition af disse begreber vil altid stå i et – komplementært – modsætningsforhold til den rige og mangeartede anvendelse af dem. Men vi er altid i stand til at anvende dem éntydigt i en række situationer, hvor til gengæld deres

komplementære modsætninger så at sige sættes ud af spillet, d.v.s. bruges på en vagt defineret måde.

I disse overvejelser bevægede Niels Bohr sig ofte ind på andre videnskabelige områder end fysikken, hvor han mente at finde analogier til gelsessituationen i kvantemekanikken. Han blev tit kritiseret for dette, for at se komplementaritetsforhold alle vegne. Det kan være rigtigt, at han skriftligt udtrykte sig meget kortfattet og derfor for en første betragtning meget uklart herom; men alle, der har oplevet ham tale om disse emner i situationer, hvor han ikke skulle helgardere sine formuleringer over for allehånde indvendinger, vil vide, at hans tanker var dybtgående og ledtes af et utroligt videnskabeligt instinkt. Jeg skal her til slut holde mig til to områder, biologien og psykologien.

Inden for *biologien* møder vi i sidste halvdel af det 19. århundrede og begyndelsen af det 20. striden mellem vitalismen og mekanicismen, der jo drejer sig om hele biologiens status. Ifølge mekanicismen kan levende organismer opfattes og restløs forklares som fysisk-kemiske systemer. Opfattelsen ligger i forlængelse af den filosofiske materialisme i 1700-tallet, men fik naturligt nok vind i sejlene i takt med fysikkens og især kemiens udvikling i 1800-tallet. Oprindeligt opfattede man, som navnet antyder, de levende organismer som mekaniske systemer, men som elektrodynamikken og termodynamikken blev udformet, forfinedes synspunktet.

Vitalisterne på deres side pegede på, at ingen kendt maskine og intet fysisk system har de for levende organismer karakteristiske træk: stofskifte, regeneration, vækst og målrettethed i udvikling og adfærd. Hvad det sidste angik, satte mekanicisterne naturligt nok deres lid til darwinismen som en teori, der ville kunne erstatte alle formålsforklaringer med årsagsforklaringer. Ikke desto mindre var de selvfølgelig ude af stand til at forklare, hvordan en levende celle kan dele sig til flere kopier af den oprindelige, eller f.eks. hvordan en regnorm, der skæres midt over, kan udvikle sig til to levedygtige individer. Ingen maskine, heller ikke vores tids elektronhjerners, kan fordoble eller reproducere sig selv, endsige »overleve« at blive skåret midt over.

Niels Bohrs far, fysiologen Christian Bohr, havde været meget optaget af dette problem og indtog en mæglende holdning, som siden hen skulle blive uddybet af Niels Bohr. Christian Bohr pegede på, at selv om vi ved den fysisk-kemiske analyse af en organisme kan komme meget langt, så når vi dog ikke umiddelbart til at reducere den eller det til et system, der kan årsagsforklares fysisk-kemisk. Grunden er organismens eller organets hensigtsmæssighed, der forstås ud fra den eller dets for-

mål, og indsigten i de regulerende og selvregulerende processer eller midler, der tjener dette formål. Samtidig gør Christian Bohr det dog klart, at man meget let ved falske analogier kan lægge noget subjektivt ind i formålet i de enkelte tilfælde, og han maner til forsigtighed på dette punkt.

Belært af situationen i kvantemekanikken lægger Niels Bohr stor vægt på beskrivelsesbetingelserne, stadig ud fra sit grundsyn, at det, det drejer sig om, ikke er at gætte på, hvordan virkeligheden er, men at undersøge, hvilke betingelser vi må overholde for at beskrive vore iagttagelser entydigt – vi må altså give agt på, hvordan vi må anvende vore ord og begreber, for at vi kan nå dette mål. Når det drejer sig om levende organismer, er det klart, at vi på den ene side har en dybtgående fysisk-kemisk forståelse af funktionerne helt ned til den enkelte celledes virkemåde. Men samtidig har vi en beskrivelsesmåde, der gør brug af teleologiske eller finalistiske begreber. Formål, hensigt og tilpasning hører ikke til den fysisk-kemiske beskrivelse, men synes alligevel helt uundværlige for forståelsen af levende organismers udvikling og adfærd. Den tanke er derfor nærliggende, at vi her har to sprogbrug, der ikke kan forenes i ét »billede«, men alligevel supplerer hinanden, når det drejer sig om at indfange alle sider ved de levende organismer i en konsistent beskrivelse. Denne dualitet i sprogbrugen indebærer altså en komplementær opfattelse, og dette betyder igen, at den sammenhængende, modsigelsesfri beskrivelse i biologien må bygge på, at vi ligesom i kvantemekanikken har iagttagelsessituationer, der gensidigt udelukker hinanden.

Et af Bohrs foretrukne eksempler er her den fysisk-kemiske analyses begrænsning, der lidt dramatisk går ud på, at vi kun kan opnå en tilbunds gående fysisk-kemisk analyse af et levende væsen ved at slå organismen ihjel. Og herved udelukker vi altså enhver mulighed for samtidigt at kunne følge de enkelte livsprocesser ud fra den funktionsbetragtning, der hører til den formålmæssige beskrivelsesmåde.

Den nærmere begrundelse for denne påstand er, at en levende organisme, hvor simpel den end måtte være, er en helhed, der ikke lader sig afgrænse fysisk. I og med at organismen har et stofskifte, vil der hele tiden være atomer og molekyler, der er på vej fra den livløse natur ind i organismens levende helhed, ligesom der er levende bestanddele, der er på vej ud af organismen i form af affaldsstoffer. En fysisk afgrænsning og dermed definition af organismen forudsætter altså for det første, at vi kan følge de enkelte atomer på deres vej fra ikke-liv til liv og deres tilbagevenden til den livløse natur. Men dette er jo på forhånd udelukket på grund af Plancks konstant, sådan som det markeres ved ubestemt-

hedsrelationerne. For det andet: Selv om man på en eller anden måde ikke vil acceptere dette, må man dog medgive, at en tilbundsgående undersøgelse, selv ud fra klassisk-fysiske principper, må indebære en komplet beskrivelse af hver mindstedel af organismen isoleret fra helheden, hvilket næppe kan tænkes foretaget, uden at man sætter stofskiftet i stå.

Bohr hævdede faktisk, at liv er et irreducibelt fænomen. Hermed ville han dog ikke indføre et mystisk element i de biologiske videnskaber. Han foretrak undertiden at sammenligne begrebet liv med sådanne naturkonstanter som Plancks konstant og lysets absolutte hastighed. Det er jo Plancks konstant, der er det konstituerende element i hele kvantemekanikken. Hvis vi når op på energi- og masseværdier, der er meget store i forhold til dem, vi har at gøre med i atomfysikken, spiller Plancks konstant ingen rolle, og kvantemekanikken glider over i klassisk mekanik og fysik. På tilsvarende måde er den specielle relativitetsteori nødvendiggjort af lysets absolutte hastighed. Beskæftiger vi os med bevægelsesforhold, hvor hastigheden er meget ringe i forhold til lysets, kan vi se bort fra denne og anvende den klassiske fysik. Klassisk fysik er altså et specialtilfælde af både kvantemekanik og relativitetsteori, og disse hænger på deres side på de to naturkonstanter h og c , d.v.s. henholdsvis Plancks konstant og lysets absolutte hastighed.

Bohr mente, at sammenhængen mellem biologi og fysik-kemi kunne være af lignende art. Der kunne tænkes en naturkonstant, der var den endelige begrundelse for, at liv er et irreducibelt fænomen.

Men – vil man måske sige – hvis darwinismen, suppleret med mutationsteorien og den nyeste arvelighedsforskning, hvor man har opdaget den genetiske kode, er holdbar, så må liv jo være opstået af det uorganiske materiale og derfor til syvende og sidst kunne forklares fysisk-kemisk. Hvad Bohrs svar på dette præcist ville være, tør jeg ikke sige. Kun kan jeg sige så meget, at det af ikke offentliggjorte breve fremgår, at han ikke var overbevist om, at neo-darwinismen gav den fulde forklaring på arternes udvikling.

Som sagt anførte Bohr mange eksempler på komplementaritet inden for *psykologiens* område. De angår for det meste det såkaldt egenpsykiske, altså den måde, vi oplever vort eget bevidsthedsindhold på. Her lever mange mennesker, også psykologer, i den illusion, at bevidsthedslevet er et ubrudt begivenhedsforløb, en kæde af tanker og følelser, der kører af sted pr. association, eller, når vi tager os sammen, pr. logiske slutninger, udledning af konsekvenser etc. For Bohr var dette nærmest indlysende forkert. Hvis vi f.eks. befinder os i en situation, hvor vi skal træffe en meget vanskelig beslutning, kan vi i lang tid overveje for og

imod, om vi skal gøre det ene eller det andet. Andre mennesker kan lægge pres på én: Du bliver nødt til at beslutte dig nu, og man beder måske om bare lidt mere tid til at overveje endnu engang. Så længe man overvejer, har man ikke besluttet noget. I samme øjeblik man træffer sin beslutning, hører overvejelserne op. Ikke fordi de nu er unødvendige, men fordi de qua overvejelser er logisk begravede. Det har jo ingen mening at sige til en person: Træf nu den beslutning, så kan du altid overveje bagefter.

Der kan gives mange eksempler på sådanne udelukkelsesforhold. F.eks. vil de fleste, der beskæftiger sig med kunst, kende til udelukkelsesforholdet mellem oplevelse og analyse. Man kan ureflekteret give sig hen i oplevelsen af musik, et maleri eller hvad det måtte være, så man nærmest føler, at ens jeg og oplevelsen er ét. Men man kan også bevidst analysere, hvorfor kunstværket er så godt, at det kan give én denne oplevelse. Blot kan man ikke gøre begge dele på én gang.

Den meget opmærksomme vil vide, at man i skiftet mellem de to situationer flytter på skillelinjen mellem det bevidsthedsindhold, der opleves eller iagttages, og det jeg, der iagttager. Når man er i den rene oplevelsessituation, er jeg'et og oplevelsen nærmest sammensmeltet. Når man er i analysesituationen, er der et langt tydeligere snit imellem det, der undersøges, og det, der undersøger. Men forløbet mellem de to indstillinger er ikke ubrudt, kontinuert. Tværtimod er der tale om et radikalt skift.

Tilsvarende kan iagttages ved en motivkamp, f.eks. ved en personlig konflikt. De modsatrettede motiver afløser på skift hinanden, og de udelukker gensidigt hinanden. Eller ved den førnævnte konflikt mellem retfærdighed og barmhjertighed, f.eks. i den situation hvor man bliver nødt til at straffe et barn, en hund eller hvad det kan være. Man kan mærke skiftet mellem de to holdninger, billedligt talt kan jeg'et indtage to positioner, som gensidigt udelukker hinanden, men alligevel kompletterer hinanden.

At gøre rede for det egenpsykiske er en meget vanskelig sag. Hver gang vi prøver på det, indfører vi et nyt jeg, der redegør uden selv at være en del af det, der bliver redegjort for. Og beskriver vi andre personer, er sagen ikke mindre vanskelig. Bohr var en erklæret modstander af behaviorismen inden for psykologien, fordi det er nødvendigt i beskrivelsen af andre mennesker at tage hensyn til, at de på en eller anden måde erkender sig selv. Selve dette faktum er et uomgængeligt træk i al psykologi, og det er naturligvis i kraft af dette, at psykologi som videnskab må være principielt forskellig fra fysik og biologi – fordi beskrivelsesbetingelserne er forskellig for de tre videnskaber.

Ved beskrivelsen af mennesker er vi, ifølge Bohr, f.eks. tvunget til at tale om »fri vilje«, som igen giver mulighed for at anvende ord som »pligt«, »håb« og »ansvar«. Han vendte ofte tilbage til problemet om viljens frihed uden dog at give noget endeligt svar på det. Hvad han mente at kunne sige var dog så meget, at det ikke kan lade sig gøre at etablere en deterministisk beskrivelse af en person. Vi kan ikke forudsige, hvad et andet menneske vil beslutte i en given situation, hvor alle muligheder står åbne. Hvis vi forsøger på det, må vi ikke alene udforske hele hans baggrund, inklusive alle de sider af hans livshistorie, som kan have bidraget til at forme hans karakter, men også vide nøjagtigt, hvad der rører sig i hans bevidsthedsliv lige nu, og hvordan han selv oplever det (f.eks. om han føler et svagt ubehag ved en af de foreliggende erindringer). Det vil kort og godt sige, at det, vi forsøger, er bogstaveligt talt at sætte os i den andens sted, at være den anden. Da dette er principielt udelukket, er vi tvunget til at give plads til anvendelsen af udtrykket »fri vilje« i beskrivelsen af personer.

Bohr sagde ofte, at det, som kvantemekanikken har lært os, er ikke blot at forstå noget nyt, men tillige en ny betydning af udtrykket »at forstå«. I oldtiden har det at forstå et fænomen sandsynligvis blot betydet at finde en analogi til det. I klassisk fysik kom udtrykket »at forstå et fænomen« til at betyde, at man kunne give en deterministisk beskrivelse af det, som både opfyldte idealet om kausalitet og kontinuitet. I kvantemekanikken er dette et for stærkt krav. Det ligger i Heisenbergs ubestemthedsrelationer, at vi ikke kan give en deterministisk beskrivelse af en enkelt elektrons opførsel i to-spalte-eksperimentet og f.eks. forudsige, hvor den vil lande på den fotografiske plade. Men hvis det drejer sig om et større og større antal af elektroner, kan vi med stadig større sandsynlighed forudsige, hvilket mønster de vil danne.

Et veldefineret svar kræver et veldefineret spørgsmål. Det, som Bohr pegede på, var, at man i kvantemekanikken kan give et klart svar på alle veldefinerede spørgsmål. Mere kan man videnskabeligt set ikke forlange. Den misforståelse, som mange gør sig skyldig i, er at stille spørgsmål vedrørende kvantemekanikken ud fra klassisk-fysiske forestillinger. F.eks. spørgsmålet: Hvilken spalte bevæger den enkelte elektron sig igennem i to-spalte-forsøget? Det ville være forkert at svare: Det ved vi ikke. Det rigtige svar er, at en nærmere analyse viser, at spørgsmålet ikke er veldefineret, men tværtimod meningsløst.

Niels Bohrs filosofiske overvejelser udgør ikke noget filosofisk system som f.eks. Spinozas eller Immanuel Kants. Alligevel er de uhyre væsentlige. De sigter dels på at vise, at iagttagelsessituationen i kvantemekanik-

ken, hvor usædvanlig den end er, ikke er så enestående endda, når vi kaster blikket på andre områder af vor erkendesituation. Og dels på at vise, at det afgørende for den filosofiske forståelse af en situation ikke er at stille ontologiske spørgsmål som »Hvad er liv?«, »Hvad er bevidsthed?« eller »Hvad er fri vilje?«, men derimod at afklare, hvilke ord der er uundværlige i vores beskrivelse, og derefter nærmere udforske betingelserne for deres anvendelse.