

Niels Bohr

Atomfysikk og menneskelig erkjennelse



CAPPELENS REALBØKER



NIELS BOHR (1885—1962), professor i fysikk ved Københavns Universitet 1916—56 og bestyrer av det berømte Institut for teoretisk fysikk fra opprettelsen i 1920. Nobelprisen i fysikk 1922 og bl.a. belønnet med den første Atoms for peace-prisen i 1957. Niels Bohr var en av pionerene i moderne atomfysikk, og har spilt en sentral rolle innen kvanteteori, naturfilosofi og erkjennelseslære. «Atomfysikk og menneskelig erkjennelse» utkom i dansk originalutgave 1957.

Atomfysikk og menneskelig erkjennelse

Den berømte danske atomfysiker, Nobelprisvinner 1922, har i denne boken samlet syv essays som tilsammen gir et fengslende oversiktsbilde av den moderne naturvitenskaps problem og metoder. Professor Bohr skildrer atomfysikkens utvikling i det 20. århundre fra Plancks kvanteteori, over Einsteins allmenne relativitetsteori og frem til sitt eget «komplementaritets-prinsipp». En grunntanke hos Bohr er at dette prinsippet også lar seg anvende utenfor atomfysikkens område: i biologi, psykologi og etnologi. De syv foredragene og artiklene i boken er opprinnelig skrevet for vitenskapsmenn fra andre fagområder enn hans eget, og de viser hvordan atomfysikerens erfaringer kan komme til nytte innenfor alle områder av den menneskelige erkjennelse. Av den grunn er boken godt egnet som en innføring i det moderne vitenskapelige verdensbilde som idag burde høre med i vår allmennutdannelse.

Professor Harald Wergeland har skrevet forordet til den norske utgaven.

J. W. CAPPELENS FORLAG



våre svenske brødre på den andre siden av det vakre sund like utenfor disse vinduene – våre brødre som vi i århundrer har kjempet med, endog innenfor dette slotets murer, og fra hvem vi gjennom tidene har mottatt så meget fruktbar inspirasjon. Man vil forstå hvor rystet jeg ble da en av tilhørerne etter foredraget kom bort til meg og sa at han ikke kunne begripe hvorfor jeg hatet svenskene. Jeg må åpenbart ved den anledning ha uttrykt meg på en meget forvirrende måte, og jeg er redd for at jeg også i dag har talt i dunkle vendinger. Allikevel håper jeg at jeg ikke har uttrykt meg så utydelig at det har kunnet gi anledning til en slik misforståelse av min tankegang.

5

Diskusjon med Einstein om erkjennelsesteoretiske problemer i atomfysikken

1949

Da utgiveren av serien «Living Philosophers» innbød meg til å skrive en artikkel til dette bindet, hvor samtidens vitenskapsmenn hedrer Albert Einsteins epokegjørende bidrag til fysikken og gir uttrykk for den taknemlighet som hele vår generasjon føler for den veiledning hans geni har gitt oss, tenkte jeg meget over hvordan jeg best kunne beskrive den inspirasjon jeg har mottatt fra ham. I den forbindelse har jeg i erindringen opplevd de mange ganger jeg i årenes løp har hatt den store opplevelse å diskutere med Einstein de erkjennelsesteoretiske problemer som den nyere utvikling av atomfysikken har reist. Våre samtaler har igjen stått levende for meg, og jeg har følt at jeg neppe kunne gjøre noe bedre enn å forsøke å gi en beretning om disse diskusjonene, som har betydd en så sterk ansporelse og vært av så stor verdi for meg. Jeg håper også at beretningen må bibringe videre kretser et inntrykk av hvor avgjørende en åpen meningsutveksling har vært for fremskritt på et område hvor overraskende erfaringer gang på gang har krevd fornyet overveielse av våre synspunkter.

Helt fra begynnelsen var hovedpunktet i diskusjonene spørsmålet om hvordan man skal stille seg til den av-

vikelse fra tilvante prinsipper for naturbeskrivelsen, som kjennetegner den nye utviklingen av fysikken, innledet i det første år av dette århundre med Plancks oppdagelse av det universelle virkningskvantum. Denne oppdagelse avslørte et helhetstrekk hos naturlovene, som går langt ut over den gamle lære om materiens begrensede delelighet, og lærte oss at de klassiske fysiske teorier er idealiseringer, som bare finner entydig anvendelse ved den grense hvor alle virkninger som opptrer er store i forhold til kvantet. Det omdiskuterte problem har vært hvorvidt det avkall på en årsaksbeskrivelse av atomære prosesser, som bestrebelsene på å finne seg til rette i situasjonen hadde medført, betydde en midlertidig avvikelse fra idealer som i siste instans måtte gjeninnføres, eller om vi stod overfor et ugjenkallelig skritt for å oppnå den rette harmoni mellom analyse og syntese av fysiske fenomener. For å beskrive bakgrunnen for våre diskusjoner og så klart som mulig belyse argumentene for de divergerende synspunkter, har jeg følt det nødvendig i en viss utstrekning å minne om noen hovedtrekk av utviklingen, som Einstein selv har ytet så avgjørende bidrag til.

Den nære sammenheng – særlig klarlagt av Boltzmann – mellom de termodynamiske prinsipper og de statistiske lovmessigheter som gjelder for mekaniske systemer med mange frihetsgrader, var som kjent ledetråden for Plancks skarpsindige behandling av varmestrålingsproblemet, som førte til hans fundamentale oppdagelse. Mens Planck i sin undersøkelse hovedsakelig anvendte betraktninger av rent statistisk karakter og med stor forsiktighet unnlot å trekke definitive slutninger om rekkevidden av de avvikelser fra grunnlaget for mekanikken og elektrodynamikken som eksistensen av kvantet måtte medføre, var Einsteins store bidrag til kvanteteorien (1905) nettopp erkjennelsen av hvordan fysiske fenomener som fotoeffekten direkte kan avhenge av

individuelle kvanteeffekter¹). I de samme årene da Einstein ved utviklingen av relativitetsteorien skapte et nytt grunnlag for fysikken, utforsket han med dristig fantasi de nye helhetstrekk som pekte ut over hele den klassiske fysikkens begrepsramme.

Med sikker intuisjon førtes Einstein således skritt for skritt til den slutning at enhver strålingsprosess består i emisjon eller absorpsjon av individuelle lyskvanter eller «fotoner», med energi og bevegelsesmengde

$$E = h\nu \quad \text{og} \quad P = h\sigma \quad (1)$$

hvor h er Plancks konstant, mens ν og σ henholdsvis er antallet av svingninger pr. tidsenhet og antallet av bølger pr. lengdeenhet. Skjønt fotonforestillingen var fruktbar, medførte den et helt uforutsett dilemma, idet ethvert enkelt korpuskulært bilde av strålingsforplantningen tydeligvis ville være uforenlig med de interferensvirkninger som utgjør et så vesentlig trekk ved strålingsfenomenene, og som bare kan beskrives ved hjelp av bølgebilder. Dilemmaets alvorlige karakter fremheves av den omstendighet at interferensvirkningene er vårt eneste middel til å definere begrepene frekvens og bølgelengde, som inngår i selve uttrykkene for fotonets energi og bevegelsesmengde.

I denne situasjon kunne det ikke bli tale om å gi en beskrivelse av strålingsfenomenene som hvilte på årsaksprinsippet, men bare om – ved en kombinert utnyttelse av de kontrasterende bilder – å beregne sannsynligheter for forekomsten av de individuelle strålingsprosessene. Det er imidlertid meget viktig å gjøre seg klart at den bruk som under disse omstendigheter gjøres av sannsynlighetslover, har et vesentlig annet siktepunkt enn den velkjente anvendelse av statistiske betraktninger som et praktisk hjelpemiddel ved redegjørelse for egen-

¹) A. Einstein, Ann. d. Phys. 17, 132 (1905).

skapene hos mekaniske systemer av komplisert oppbygning. I kvantefysikken har vi ikke å gjøre med komplikasjoner av denne art, men med umuligheten av å innbefatte i den klassiske begrepsramme det særegne trekk av udelelighet eller «individualitet» som kjennetegner de elementære prosessene.

At de klassiske fysiske teorier sviktet ved redegjørelsen for atomære fenomener, ble ytterligere fremhevet ved utdypelsen av vårt kjennskap til atomenes bygning. Fremfor alt avslørte Rutherfords oppdagelse av atomkjernen (1911) straks at de klassiske mekaniske og elektromagnetiske begrepene var uegnet til å forklare den stabilitet som er så karakteristisk for atomet. Her frembød kvanteteorien igjen en nøkkel til avklaring av situasjonen, og det viste seg mulig å gjøre rede for både den atomære stabiliteten og de empiriske lovene for grunnstoffenes spektre ved å anta at enhver reaksjon av atomet som medførte en endring av dets energi, betydde en fullstendig overgang mellom to såkalte stasjonære kvantetilstander, og at spektrene fremkom ved en trinnvis prosess, hvori hver overgang er ledsaget av utsendelsen av et monokromatisk lyskvantum med en energi som nettopp svarer til Einsteins foton.

Disse forestillinger, som snart etter ble bekreftet ved forsøk av Franck og Hertz (1914) over eksitasjonen av spektre ved beskytning av atomer med elektroner, rommet et ytterligere avkall på den kausale beskrivelsesmåte, ettersom tydingen av spektrallovne åpenbart medfører at det for et atom i en eksitert tilstand i alminnelighet vil være mulighet for en overgang med fotonutsendelse til den ene eller den annen av dets lavere energitilstander. Forestillingen om stasjonære tilstander er i seg selv uforenlig med enhver forskrift for valget mellom slike tilstander, og gir bare plass for begrepet relative sannsynligheter for de individuelle overgangsprosesser. Den eneste ledetråd ved beregningen av disse sannsynlighe-

tene var det såkalte korrespondensprinsipp, som uttrykker bestrebelsen på å oppnå den nærmest mulige forbindelse mellom den statistiske beskrivelse av de atomære prosesser, og de konsekvenser man måtte vente av den klassiske teori, som må gjelde ved den grense hvor alle de virkninger som opptrer på ethvert stadium av fenomenenes undersøkelse, er store sammenlignet med det universelle kvantum.

På den tid var en sammenhengende, motsigelsesfri kvanteteori ennå ikke i sikte, men den fremherskende holdning kan kanskje best belyses av følgende uttalelse i et foredrag av forfatteren fra 1913 ²⁾:

Jeg håper jeg har uttrykt meg så tydelig at dere har oppfattet hvor meget de fremførte betraktninger strider mot den så beundringsverdige sammenbygde krets av forestillinger som man med rette har benevnt den klassiske elektrodynamikk. På den annen side har jeg bestrebet meg for å bibringe dere det inntrykk at det — nettopp ved å fremheve denne motstrid så sterkt — kanskje er mulighet for med tiden også å bringe en viss sammenheng i de nyere forestillinger.

Et betydningsfullt fremskritt i utviklingen av kvanteteorien ble gjort av Einstein selv i 1917, med hans berømte avhandling ³⁾ om strålingslikevekten, hvor han viste at Plancks varmestrålingslov enkelt kunne utledes fra antagelser som stemte overens med grunnforestillingene i kvanteteorien for atomenes oppbygning. Med henblikk på dette formulerte Einstein generelle statistiske regler for forekomsten av strålingsoverganger mellom stasjonære tilstander, idet han antok at det ikke bare når atomet er utsatt for et strålingsfelt, vil opptre så vel absorpsjons- som emisjonsprosesser med en sannsynlighet pr. tidsenhet som er proporsjonal med strålingsintensiteten, men at det også uten ytre påvirkning vil fore-

²⁾ N. Bohr, Fysisk Tidsskrift 12, 97 (1914).

³⁾ A. Einstein, Phys. Zs. 18, 121 (1917).

komme spontane emisjonsprosesser med en hyppighet svarende til en viss *a priori* sannsynlighet. I forbindelse med dette siste fremhevet Einstein på tankevekkende måte den statistiske beskrivelsens fundamentale karakter, ved å henlede oppmerksomheten på analogien mellom antagelsene angående forekomsten av de spontane strålingsovergangene og de velkjente lover for omdannelsen av radioaktive stoffer.

I forbindelse med en omhyggelig undersøkelse av termodynamikkens krav vedrørende strålingsproblemer, understreket Einstein det tidligere nevnte dilemma enda sterkere ved å påvise at enhver strålingsprosess måtte være «ensrettet», i den forstand at det ved absorpsjonsprosessen ikke bare overføres en bevegelsesmengde til atomet, svarende til et foton med strålingsforplantningens retning, men at også det emitterende atom vil få en tilsvarende impuls i motsatt retning, til tross for at bølgebildet ikke er forenlig med noen slik retningsbestemmelse for emisjonsprosessen. Einsteins egen innstilling til disse overraskende slutninger er uttrykt i et avsnitt av artikkelen (loc. cit., s. 127 f.), som i oversettelse lyder:

Disse egenskaper hos de elementære prosesser synes å gjøre utviklingen av en ren kvanteteoretisk behandling av stråling nesten uunngåelig. Teoriens svakhet er dels at det ikke kan oppnås en nærmere forbindelse med bølgeteorien, og dels at tiden og retningen for de elementære prosesser overlates til tilfellet (*Zufall*). Men ikke desto mindre har jeg full tillit til at vi er slått inn på den rette vei.

Da jeg hadde den store opplevelse å møte Einstein for første gang ved et besøk i Berlin i 1920, var disse fundamentale spørsmålene emnet for våre samtaler. Diskusjonene, som jeg ofte siden i tankene er vendt tilbake til, føyer til min beundring for Einstein også et dypt inntrykk av hans fordomsfri innstilling. Hans forkjærlighet for maleriske vendinger som «spøkelsesbølger (*Gespen-*

sterfelder) som styrer fotonene», rommet ikke på noen måte en tendens til mystisisme, men var snarere uttrykk for en dyp humor bak hans skarpsindige bemerkninger. En viss forskjell i innstilling og utsyn gjorde seg allikevel gjeldende, idet Einstein med sin mesterlige evne til å forbinde tilsynelatende motstridende erfaringer uten å forlate kontinuitet og kausalitet, kanskje var mer utilbøyeelig til å oppgi disse idealene enn en for hvem avkall i så henseende stod som den eneste vei til videreføringen av den umiddelbart foreliggende oppgave, nemlig å sammenfatte de rikholdige erfaringer angående atomære fenomener, som dag for dag ble forøket ved utforskningen av dette nye kunnskapsområdet.

I de følgende år, da atomproblemene tiltrakk seg oppmerksomheten innenfor en raskt voksende krets av fysikere, gjorde de tilsynelatende motsigelser i kvanteteorien seg stadig sterkere følt. Betegnende for situasjonen er den diskusjon som oppdagelsen av Stern–Gerlach-effekten i 1922 gav støtet til. På den ene side støttet denne oppdagelsen på slående måte forestillingen om stasjonære tilstander og især den kvanteteori for Zeeman-effekten som var utviklet av Sommerfeld på dette grunnlag. Men som det så klart ble påvist av Einstein og Ehrenfest, stilte oppdagelsen på den annen side ethvert forsøk på å anskueliggjøre et atoms atferd i et magnetfelt, overfor uoverstigelige vanskeligheter⁴). Lignende paradokser ble reist ved Comptons oppdagelse (1924) av den endring av bølgelengden som ledsager elektrone-nes spredning av røntgenstråler. Som kjent gav dette fenomen en direkte bekreftelse på Einsteins synspunkter angående overføringen av energi og bevegelsesmengde ved strålingsprosesser. Samtidig var det like klart at ikke noe enkelt bilde av et korpuskulært sammenstøt kunne

⁴) A. Einstein og P. Ehrenfest, Zs. f. Phys. 11, 31 (1922).

gi en uttømmende beskrivelse av fenomenet. Under inntrykket av slike vanskeligheter var det en tid endog tvil om bevarelsen av energi og impuls ved de individuelle strålingsprosessene ⁵⁾, et synspunkt som imidlertid hurtig måtte forkastes, idet den fullstendige korrelasjon mellom fotonets avbøyning og elektronets tilsvarende tilbake støt kunne påvises ved de fortsatte, mer nøyaktige forsøk.

Veien til klarlegging av situasjonen måtte imidlertid først åpnes ved utviklingen av en mer sammenhengende kvanteteori. Det første skritt henimot dette mål var deBroglies erkjennelse (1925) av at bølge-partikkeldualiteten ikke var begrenset til egenskapene ved den elektromagnetiske strålingen, men var like uunngåelig ved beskrivelsen av materielle partiklers atferd. Denne oppfatning, som snart etter ble bekreftet på overbevisende måte ved forsøk over interferensfenomener hos elektroner, ble straks hilst av Einstein, som allerede tidligere hadde gjort oppmerksom på en dyptgående analogi mellom egenskapene hos varmestralingen og hos luftarter i den såkalte utartede tilstand ⁶⁾. Den nye tankegang ble med største hell videreført av Schrödinger (1926), som spesielt viste hvordan et atomært systems stasjonære tilstander kunne fremstilles som egenløsningene av en bølgeligning, hvis oppstilling han ble ledet til av den formelle analogi – opprinnelig påvist av Hamilton – mellom mekaniske og optiske problemer. Kvanteteoriens motstridende trekk var imidlertid på ingen måte oppklart med dette, men ble snarere fremhevet av den tilsynelatende motsetning mellom bølgebeskrivelsens superposisjonsprinsipp og det trekk av individualitet som er karakteristisk for de elementære atomære prosesser.

På samme tid hadde Heisenberg (1925) skapt grunn-

⁵⁾ N. Bohr, H. A. Kramers og J. C. Slater, *Phil. Mag.* 47, 785 (1924).

⁶⁾ A. Einstein, *Berl. Ber.* 261 (1924) samt 3 og 18 (1925).

laget for en rasjonell kvantemekanikk, som hurtig ble utviklet ved betydningsfulle bidrag av Born, Jordan og Dirac. I denne teori er det innført en formalisme hvori den klassiske mekanikkens kinematiske og dynamiske variable ble erstattet med symboler, underkastet en ikke-kommutativ algebra. Til tross for at forestillingen om partikkelbaner ble oppgitt, ble Hamiltons kanoniske ligninger bibeholdt, og Plancks konstant opptrer bare i ombytningsrelasjonene

$$qp - pq = \sqrt{-1} \frac{h}{2\pi}, \quad (2)$$

som gjelder for ethvert par av konjugerte variable q og p . Representasjon av symbolene ved hjelp av matriser, med elementer som henviser til overganger mellom stasjonære tilstander, muliggjorde for første gang en kvantitativ formulering av korrespondensprinsippet. Det må i denne forbindelse huskes at et viktig forberedende skritt henimot dette mål hadde vært den kvanteteori for dispersjonsfenomenene, som særlig var utviklet av Kramers, og hvor det gjøres vesentlig bruk av Einsteins generelle sannsynlighetslover for forekomsten av absorpsjons- og emisjonsprosesser.

Som Schrödinger snart etter viste, er resultatene av denne kvantemekaniske formalisme identiske med dem som oppnås ved hjelp av den i matematisk henseende ofte mer bekvemme bølge teori, og i løpet av de følgende årene ble det utviklet generelle metoder til statistisk beskrivelse av atomære prosesser, hvorved det trekk av individualitet som er særegent for kvanteteorien, mot sigelsesfritt ble forbundet med superposisjonsprinsippet krav. Blant de mange fremskritt fra denne perioden må særlig nevnes at det viste seg mulig ved hjelp av formalismen å gi uttrykk for det utelukkelsesprinsipp som karakteriserer tilstandene ved et system bestående av flere elektroner, og som allerede før kvantemekanikken ble

til var blitt oppstilt av Pauli på grunnlag av undersøkelser av atomspektra. Det faktum at det ble oppnådd en kvantitativ beskrivelse av et meget stort erfaringsmateriale, kunne ikke etterlate noen tvil om at den kvantemekaniske formalisme var fruktbar og hensiktsmessig, men dens abstrakte karakter skapte en utbredt følelse av utilfredshet. Avklaringen av situasjonen skulle da også kreve en inngående undersøkelse av selve iakttagelsesproblemet i atomfysikken.

Dette stadium av utviklingen ble som kjent innledet i 1927 av Heisenberg, som fremhevet at den kunnskap vi kan oppnå om et atomært systems tilstand, alltid vil være beheftet med en særegen «ubestemthet»⁷⁾. Enhver måling av et elektrons posisjon ved hjelp av en eller annen måleanordning, for eksempel et mikroskop hvori det brukes høyfrekvent stråling, vil således, ifølge de fundamentale ligninger, være forbundet med en utveksling av bevegelsesmengde mellom elektronet og apparatet, og denne blir desto større jo mer nøyaktig stedsmålingen foretas. Heisenberg sammenholdt slike overveielser med den kvantemekaniske formalismes krav og gjorde oppmerksom på at ombytningsregelen (2) medfører en resiprok begrensning i fastleggelsen av to konjugerte variable q og p , uttrykt ved ligningen

$$\Delta q \cdot \Delta p \approx h, \quad (3)$$

hvor Δq og Δp er passende definerte spillerom i bestemmelsen av disse variable. Ved å fremheve den nære forbindelse mellom kvantemekanikkens statistiske beskrivelse og de faktiske målemuligheter, er disse såkalte ubestemthetsrelasjoner, som Heisenberg viste, ytterst betydningsfulle for oppklaringen av de paradokser som er forbundet med forsøkene på å beskrive kvanteeffekter ved å referere til vanlige fysiske bilder.

⁷⁾ W. Heisenberg, Zs. f. Phys. 43, 172 (1927).

De nye fremskritt i atomfysikken ble kommentert fra forskjellig side ved den internasjonale fysiske kongress som ble holdt i september 1927 i Como, til minne om Volta. I et foredrag ved denne anledning⁸⁾ gjorde jeg meg til talsmann for et synspunkt som kort kan betegnes «komplementaritet», og som er egnet til å omfatte den karakteristiske individualitet hos kvantefenomenene og samtidig klarlegge de særegne trekk som iakttagelsesproblemet på dette erfaringsområde oppviser. I denne forbindelse er det meget viktig å gjøre seg klart at *redegjørelsen for alle erfaringer – uansett hvor langt fenomenene ligger utenfor rekkevidden av den klassiske fysiske beskrivelse – må uttrykkes ved klassiske begreper*. Begrunnelsen er simpelthen at vi med ordet «eksperiment» refererer til en situasjon hvor vi kan fortelle andre hva vi har gjort og hva vi har lært, og at forsøksanordningen og måleresultatene derfor må beskrives i det sedvanlige språk med passende bruk av den klassiske fysikkens terminologi.

Dette avgjørende punkt, som skulle bli et hovedemne for de diskusjoner det skal berettes om i det følgende, medfører at det er *umulig å skille skarpt mellom atomære objekters atferd og deres vekselvirkning med de måleinstrumenter som tjener til å definere betingelsene hvorunder fenomenene opptrer*. De typiske kvanteeffektens individualitet finner nettopp uttrykk i den omstendighet at enhver oppdeling av fenomenet ville kreve en endring i forsøksanordningen, med nye muligheter for prinsipielt ukontrollerbar vekselvirkning mellom objekter og måleinstrumenter. Erfaringer som er oppnådd under forskjellige forsøksbetingelser kan derfor ikke kombineres i et enkelt bilde, men må betraktes som komplementære i den forstand at fenomenene bare til-

⁸⁾ Atti del Congresso Internazionale dei Fisici, Como, Settembre 1927. På dansk i Atomteori og Naturbeskrivelse, København 1929.

sammen gir alle de mulige opplysninger om objektene.

Under disse omstendigheter kan det å tilskrive atomære objekter vanlige fysiske egenskaper, innebære en eiendommelig flertydighet, slik det fremgår av det omtalte dilemma angående partikkel- og bølgeegenskapene hos elektroner og fotoner, hvor vi har å gjøre med kontrasterende bilder, som hver for seg refererer til vesentlige sider av erfaringene. Et lærerikt eksempel på hvordan de tilsynelatende paradokser løses ved undersøkelse av de eksperimentelle betingelser som de komplementære fenomenene opptrer under, har vi i Compton-effekten, som det først syntes meget vanskelig å gi en motsigelsesfri beskrivelse av. Enhver forsøksanordning som er egnet til å kontrollere utvekslingen av energi og bevegelsesmengde mellom elektronet og fotonet, må nemlig for rom-tids-beskrivelsen av vekselvirkningen innebære et spillerom, tilstrekkelig for definisjonen av de bølgetall og frekvenser som opptrer i ligning (1). Omvendt ville ethvert forsøk på å lokalisere sammenstøtet mellom fotonet og elektronet mer nøyaktig, utelukke et nøyere regnskap med energi- og impulsbalansen på grunn av den uunngåelige vekselvirkning med de målestokker og ur som fastlegger rom-tid-referansesystemet.

Som det ble fremhevet i foredraget, gir den kvantemekaniske formalisme nettopp et matematisk redskap som egner seg for den komplementære beskrivelsesmåten. Vi har jo her å gjøre med et rent symbolsk skjema, som på korrespondensmessig grunnlag tillater forutsigelser om forsøksresultater som kan oppnås under betingelser fastlagt ved hjelp av klassiske begreper. Man må i denne forbindelse huske på at det selv i ubestemthetsrelasjonen (3) dreier seg om en konsekvens av formalismen, som det ikke er mulig å fortolke på en entydig måte i ord egnet til å beskrive klassiske fysiske bilder. En setning som «vi kan ikke kjenne både bevegelsesmengden og posisjonen til et atomært objekt», gir såle-

des straks foranledning til spørsmål om den fysiske realitet av slike attributter til objektet, og det kan bare svares ved å henvise til betingelsene for den entydige bruk av rom-tids-begrepene på den ene side og de dynamiske bevarelsesetninger på den annen. Mens foreningen av disse begreper i ett enkelt bilde er grunnlaget for den klassiske mekanikkens årsaksbeskrivelse, skapes det nettopp plass til lovmessigheter utenfor denne beskrivelsens rekkevidde ved den omstendighet at studiet av komplementære fenomener krever forsøksanordninger som utelukker hverandre.

Når det i atomfysikken er nødvendig å undersøke på ny grunnlaget for den entydige bruk av elementære fysiske forestillinger, så minner det i mange henseender om den situasjon som opprinnelig førte Einstein til å fremheve iakttagelsesproblemets avgjørende betydning og gav støtet til hans geniale revisjon av grunnlaget for rom-tids-koordinasjonen, som skulle gi vårt verdensbilde en så stor enhet. Uansett alle nye trekk ved betraktningmåten, var det mulig i relativitetsteorien å opprettholde årsaksbeskrivelsen i ethvert referansesystem. I kvanteteorien tvinges vi imidlertid av den ukontrollerbare vekselvirkning mellom objekter og måleinstrumenter til å gi avkall, selv i så måte. Men erkjennelsen av dette rommer på ingen måte en begrensning av den kvantemekaniske beskrivelsens rekkevidde, og den tankegang som ble fremsatt i Como-foredraget, tok nettopp sikte på å vise at komplementaritetssynspunktet må betraktes som en rasjonell generalisering av selve kausalitetsidealet.

Under diskusjonene i Como savnet vi alle Einsteins nærvær, men kort etter, i oktober 1927, hadde jeg anledning til å treffe ham i Brussel på Solvay-instituttets femte fysiske konferanse, hvis emne var «Elektroner og fotoner». Ved Solvay-konferansene hadde Einstein helt

fra begynnelsen vært en fremtredende skikkelse, og mange av oss møtte med store forventninger for å høre hans reaksjon på det seneste stadium av utviklingen, som etter vår oppfatning hadde bragt vidtgående avklaring av de problemer han selv så skarpsindig hadde trukket frem. Under konferansen, hvor hele emnet ble gjennomgått ved bidrag fra mange sider, og hvor også de argumenter som er omtalt i det foregående ble frem-satt igjen, uttrykte imidlertid Einstein stor betenkelighet ved at den rom-tidlige årsaksbeskrivelse i så stor ut-strekning var oppgitt i kvantemekanikken.

For å belyse sin innstilling henviste Einstein ved et av møtene ⁹⁾ til det enkle eksempel, illustrert ved fig. 1, hvor en partikkel (elektron eller foton) passerer et hull eller en trang spalte i en skjerm som er anbragt foran en fotografisk plate. På grunn av spredningen av den

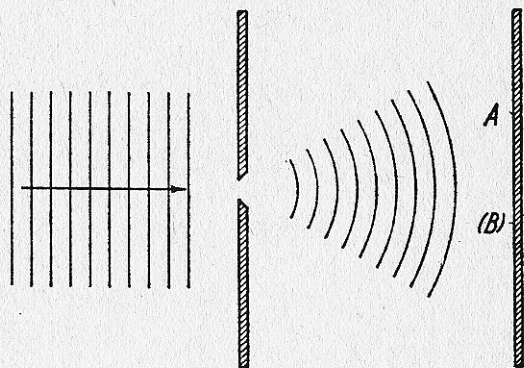


Fig. 1

bølge som er knyttet til partikkelens bevegelse, og som på figuren er antydnet ved de tynne linjene, er det under slike betingelser ikke mulig å forutsi hvilket punkt på den fotografiske platen elektronet vil nå, men bare å be-

⁹⁾ Institut International de Physique Solvay, Rapport et discussions du 5e Conseil, Paris 1928, 253 ff.

regne sannsynligheten for at elektronet ved et eksperiment vil bli funnet innenfor et gitt område på platen. Den tilsynelatende vanskelighet som Einstein følte så sterkt, er at det såfremt elektronet ved eksperimentet blir iaktatt i et punkt A på platen, dermed ikke kan bli tale om å observere noen virkning av dette elektronet i et annet punkt B, skjønt lovene for vanlig bølgeutbredelse ikke rommer noen som helst korrelasjon mellom to slike begivenheter.

Einsteins innstilling gav støtet til ivrige diskusjoner innenfor en liten krets, hvor Ehrenfest, som gjennom årene hadde vært en nær venn av oss begge, deltok på en aktiv og hjelpsom måte. Selvfølgelig stod det klart for oss alle at det nevnte eksempel ikke gav noen analogi til anvendelsen av statistikk ved behandlingen av kompliserte mekaniske systemer, men snarere minnet om bakgrunnen for Einsteins egne tidlige slutninger angående individuelle strålingseffekters ensrettethet, som står i så skarp motsetning til et enkelt bølgebilde (jfr. s. 65). Diskusjonene konsentrerte seg om spørsmålet om hvorvidt den kvantemekaniske beskrivelsen uttømte mulighetene for å redegjøre for de iakttagbare fenomener, eller om undersøkelsen, som Einstein fastholdt, kunne føres videre, og især om det kunne oppnås en mer uttømmende beskrivelse ved å trekke inn i betraktningen den detaljerte energi- og impulsbalanse i individuelle prosesser.

For å forklare Einsteins tankegang er det opplysende å betrakte her noen enkle trekk ved bevegelsesmengde- og energibalansen i forbindelse med lokalisering av en partikkel i rom og tid. For dette formål skal vi undersøke det enkle tilfelle hvor en partikkel går gjennom et hull i en skjerm med eller uten en lukker til å åpne og dekke til hullet, slik det er antydnet i henholdsvis fig. 2 a og 2 b. De ekvidistante parallelle linjer til venstre i figurene angir det plane bølgetog svarende til bevegelsestil-

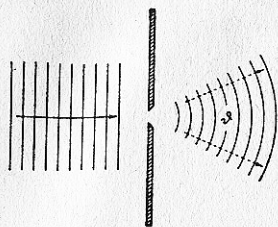


Fig. 2 a

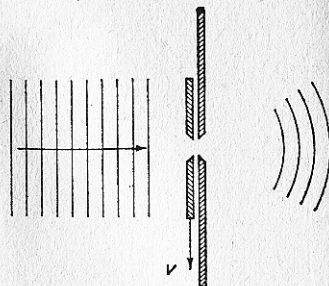


Fig. 2 b

standen til en partikkel som før den kommer til skjermen har en impuls P , knyttet til bølgetallet σ ved den annen av ligningene (1). I overensstemmelse med at bølgene avbøyes når de passerer hullet, er partikkelens bevegelsestilstand til høyre for skjermen representert ved et sfærisk bølgetog med en passende definert åpningsvinkel ϑ og i tilfellet på fig. 2 b også med en begrenset radial utstrekning. Beskrivelsen av denne tilstand innebærer derfor en viss uskarphet Δp i partikkelens bevegelsesmengdekomponent parallelt med skjermen og, i tilfelle av en blender med lukker, ytterligere et spillerom ΔE , for den kinetiske energi.

Ettersom et mål for uskarpheten Δq i partikkelens lokalisering i skjermens plan er gitt ved hullets radius a , og da $\vartheta \approx 1/\sigma a$, får vi ved å bruke ligning (1) nettopp $\Delta p \approx \vartheta P \approx h/\Delta q$, i overensstemmelse med uskarphetsrelasjonen (3). Dette resultatet kunne naturligvis utledes direkte ved å bemerke at den begrensede utstrekning av bølgefeltet i spalten vil medføre et spillerom $\Delta\sigma \approx 1/a \approx 1/\Delta q$ for bølgetallets komponent parallelt med skjermens plan. På lignende måte er spredningen av frekvensene av de harmoniske komponenter i det begrensede bølgetog på fig. 2 b, åpenbart $\Delta\nu \approx 1/\Delta t$, hvor Δt er det tidsintervall da hullet er åpent, og Δt representerer altså spillerommet for tiden for partikkelens passasje gjennom blanderen. Fra (1) får vi derfor

$$\Delta E \cdot \Delta t \approx h, \quad (4)$$

som igjen er i overensstemmelse med ligning (3) for de to konjugerte variable E og t .

De uskarpheter som opptrer i beskrivelsen av partikkelens tilstand etter passasjen gjennom hullet, kommer ifølge bevarelsessetningene fra mulighetene for utveksling av energi med skjermen eller lukkeren. I referansesystemet i fig. 2 a og 2 b kan man se bort fra skjermens bevegelse, og behøver bare å ta i betraktning utvekslingen av impulsen Δp mellom partikkelen og skjermen. Lukkeren, som lar hullet være åpent i tiden Δt , beveger seg derimot med en betydelig hastighet $V \approx a/\Delta t$, og en impulsoverføring Δp er derfor forbundet med en energiutveksling med partikkelen, som beløper seg til

$$V \Delta p \approx \frac{\Delta q \Delta p}{\Delta t} \approx \frac{h}{\Delta t}$$

og nettopp er av samme størrelsesorden som uskarpheten ΔE , gitt ved (4), og den gir således spillerom for impuls- og energibalansen.

Einstein reiste nå det problem i hvilken utstrekning en kontroll av den overføring av bevegelsesmengde og energi som er forbundet med lokaliseringen av partikkelen i tid og rom, kunne benyttes til en videregående fastlegging av partikkelens tilstand etter passasjen gjennom hullet. Her må vi huske at vi hittil har antatt at posisjon og bevegelse av skjermen og lukkeren nøyaktig kunne fastlegges i rom-tid-referansesystemet. I beskrivelsen av disse legemenes tilstand medfører denne antagelsen en vesentlig uskarphet i deres impuls og energi, men det behøver selvfølgelig ikke å innvirke merkbart på hastighetene hvis skjermen og lukkeren er tilstrekkelig tunge. Så snart vi imidlertid ønsker å kjenne bevegelsesmengden og energien til disse delene av apparatet med en nøyaktighet, tilstrekkelig til å kontrollere impuls- og

energiutvekslingen med den undersøkte partikkelen, vil vi i overensstemmelse med de generelle ubestemthetsrelasjonene tape muligheten for å lokalisere dem nøyaktig i rom og tid. Vi må derfor undersøke i hvilken utstrekning denne omstendigheten vil berøre den tilsiktede bruk av hele forsøksanordningen, og som vi skal se, bringer dette avgjørende punkt fenomenenes komplementære karakter klart for dagen.

Vender vi et øyeblikk tilbake til den enkle oppstilling som er antydnet på fig. 1, må vi huske på at det hittil ikke er blitt angitt hva den tenkes brukt til. Det er jo bare under forutsetning av at skjermen og platen har veldefinerte posisjoner i rommet, at det innenfor den kvantemekaniske formalismes rammer er umulig å gjøre mer detaljerte forutsigelser med hensyn til det punkt på den fotografiske platen hvor partikkelen vil bli registrert. Hvis vi imidlertid tillater et tilstrekkelig stort spillerom i kjennskapet til skjermens posisjon, skulle det i prinsippet være mulig å kontrollere impulsoverføringen til skjermen, og således gjøre mer nøyaktige forutsigelser om retningen av elektronets vei fra hullet til skjermen. Hva angår den kvantemekaniske beskrivelse, dreier det seg her om et tolegeme-system, bestående av skjermen så vel som partikkelen, og det er nettopp en direkte anvendelse av bevarelsessetningene på et slikt system, som vi har å gjøre med ved Compton-effekten, hvor vi for

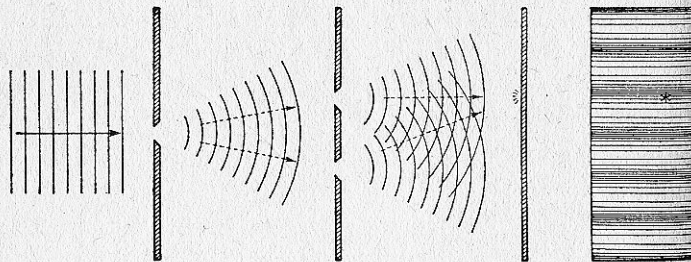


Fig. 3

eksempel ved å iaktta tilbake støtet av elektronet ved hjelp av et tåkekammer blir i stand til å forutsi i hvilken retning det avbøyde fotonet vil bli iaktatt.

Betydningen av slike betraktninger ble i samtalen løp belyst på en interessant måte ved undersøkelsen av en oppstilling hvor det mellom skjermen med spalten og den fotografiske platen er anbrakt en annen skjerm med to parallelle spalter, som vist på fig. 3. Hvis en parallell strøm av elektroner (eller fotoner) fra venstre faller inn på den første skjermen, vil vi under normale betingelser iaktta et interferensmønster på platen, antydnet ved skraveringen av den fotografiske platen, som til høyre på figuren er vist sett forfra. Ved intensiv bestråling bygges dette mønster opp ved akkumulering av et stort antall individuelle prosesser, som hver forårsaker en liten flekk på den fotografiske platen, og fordelingen av disse flekkene følger en enkel lov som kan utledes fra bølgeanalysen. Den samme fordeling skulle også finnes ved den statistiske beskrivelsen av mange forsøk, foretatt med stråling så svak at bare ett elektron (eller foton) i hver enkelt eksponering vil nå hen til platen og ramme den i et eller annet punkt, på figuren antydnet ved en liten stjerne. Da nå – som angitt ved de prikkete pilene – den impuls som overføres til den faste skjermen må avhenge av om elektronet går gjennom øverste eller nedre spalte i den andre skjermen, antok Einstein at en kontroll med impulsoverføringen ville tillate en nøyaktigere analyse av fenomenet, og spesielt avgjøre hvilken av de to spaltene elektronet hadde passert før det nådde platen.

En nærmere undersøkelse viste imidlertid at den foreslåtte kontroll av bevegelsesmengdeoverføringen ville medføre en uskarphet i kjennskapet til skjermens posisjon, som ville utelukke at det nevnte interferensfenomenet opptrådte. Hvis nemlig ω er den lille vinkelen mellom de antatte veiene for en partikkel som går gjennom

øverste eller nederste spalte, vil forskjellen i impulsoverføringen i de to tilfellene, ifølge (1) bli $h\omega$, og enhver kontroll av skjermens bevegelsesmengde med en nøyaktighet tilstrekkelig til å måle denne forskjellen, vil på grunn av ubestemthetsrelasjonen være forbundet med et spillerom for skjermens posisjon, som minst beløper seg til $1/\sigma\omega$. Dersom skjermen med de to spaltene slik som på figuren er anbrakt midt imellom den første skjermen og den fotografiske platen, vil antallet av striper pr. lengdeenhet nettopp være $\sigma\omega$, og da en ubestemthet $1/\sigma\omega$ i den første skjermens posisjon bevirker en like stor ubestemthet i stripenes beliggenhet, kan det altså ikke konstateres noen interferenseffekt. Det samme resultatet kan lett vises å gjelde for enhver annen plassering av den andre skjermen mellom den første skjermen og platen, og man ville også få det hvis man i stedet for den første skjermen brukte et annet av de tre legemer til den foreslåtte kontroll av impulsoverføringen.

Dette punktet er av stor logisk betydning, for det er bare den omstendighet at vi står overfor et valg mellom *enten* å etterspore en partikkels vei *eller* iaktta interferensvirkninger, som gjør at vi kan unngå den paradoksale slutning at et elektrons eller fotons atferd skulle avhenge av tilstedeværelsen av en spalte i skjermen, som det kunne vises at den ikke passerte gjennom. Vi har her å gjøre med et typisk eksempel på hvordan de komplementære fenomenene opptrer under forsøksomstendigheter som utelukker hverandre (jfr. s. 81), og vi står nettopp overfor dette at det er umulig ved undersøkelsen av kvanteeffekter å skjelne skarpt mellom en selvstendig atferd av atomære objekter og deres vekselvirkning med de måleinstrumenter som tjener til å definere betingelsene som fenomenene opptrer under.

Våre samtaler om den stilling man må ta til en ny situasjon med hensyn til undersøkelse og sammenfatning av erfaringer, førte oss naturlig inn på mange sider

av filosofisk tenkning, og til tross for alle forskjeller i oppfatning og betrakningsmåte var diskusjonene preget av adskillig humor. Einstein på sin side spurte oss ironisk om vi virkelig kunne tro at guddommelige makter tok tilflukt til terningspill («. . . *ob der liebe Gott würfelt*»), og på det svarte jeg med å henvise til at allerede oldtidens tenkere hadde manet til forsiktighet med å tilskrive forsynet attributter hentet fra dagligtalen. Jeg husker også at Ehrenfest, som hadde en elskverdig måte å erte sine venner på, spøkende på diskusjonens høydepunkt hentydet til den tilsynelatende likhet mellom Einsteins holdning og innstillingen hos relativitetsteoriens motstandere. Men Ehrenfest tilføyde straks at han for sitt vedkommende ikke ville kunne føle noen fullstendig befrielse før det var oppnådd enighet med Einstein.

Einsteins betenkeligheter og kritikk ble for oss alle en ytterst verdifull spore til å underkaste de forskjellige sider av situasjonen vedrørende beskrivelsen av atomære fenomener, fornyet prøving. For meg var det en velkommen tilskyndelse til ytterligere å klarlegge den rolle måleinstrumentene spiller, og for å tydeliggjøre den

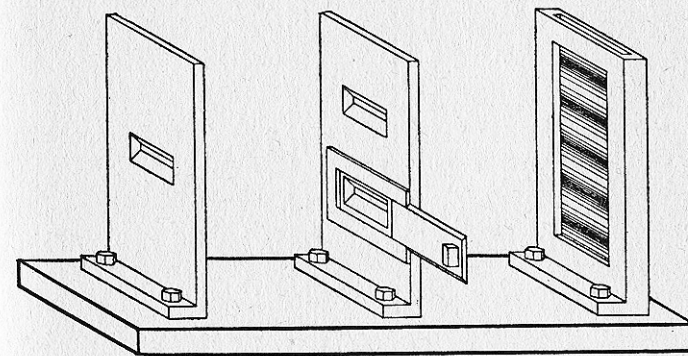


Fig. 4

gjensidig utelukkende karakter hos de forsøksbetingelser som komplementære fenomener opptrer under, forsøkte jeg den gang å skisserer forskjellige apparatoppstillinger i en pseudorealitisk stil som de følgende figurer er eksempler på. Til studiet av et interferensfenomen av den type som er angitt i fig. 3, ligger det således nær å benytte en forsøksanordning som vist i fig. 4, hvor de massive apparatdelene som tjener som skjermer og plateholder, er skrudd fast på et felles underlag. Med en slik oppstilling, hvor kjennskapet til de relative posisjoner av skjermene og den fotografiske platen er sikret gjennom den stive forbindelsen, er det tydeligvis umulig å kontrollere noen bevegelsesmengde, utvekslet mellom partikkelen og apparatets enkelte deler. Den eneste måten for i en slik anordning å sikre at partikkelen gikk gjennom en bestemt av spaltene i midtskjermen, ville være å lukke den andre spalten med et deksel, slik det er antydnet på figuren. Men hvis spalten er tildekket, er

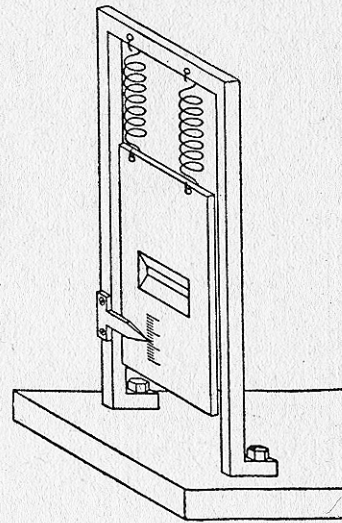


Fig. 5

det naturligvis ikke tale om noe interferensfenomen, og på platen vil vi simpelthen iaktta en jevn fordeling, sva- rende til eksemplet med en enkelt skjerm i fig. 1.

Ved studiet av fenomener ved hvis beskrivelse vi har å gjøre med detaljert impulsbalanse, må visse deler av oppstillingen selvfølgelig være fritt bevegelige, uavhengig av andre. Et slikt apparat er skissert i fig. 5, hvor en skjerm med en spalte er opphengt ved hjelp av tynne fjærer fra et solid åk, som er skrudd fast på det underlaget som også andre ubevegelige deler av anordningen må festes til. Skalaen på skjermen sammen med viseren på en av åkets bærestenger refererer til den undersøkelse av skjermens bevegelse som ville være nødvendig for å måle den overførte bevegelsesmengde og trekke slutninger angående den avbøyning partikkelen har fått ved å passere spalten. Men da enhver avlesning av skalaen, hvordan den enn foretas, vil være forbundet med en ukontrollerbar endring av skjermens impuls, vil det – i overensstemmelse med ubestemthetsprinsippet – alltid bestå et resiprokt forhold mellom vår kunnskap om spaltens posisjon og nøyaktigheten av kontrollen med bevegelsesmengden.

I samme halvt alvorlige stil forestiller fig. 6 en del av en apparatoppstilling til undersøkelse av fenomener som – i motsetning til de nettopp omtalte – rommer en direkte tidskoordinasjon. Apparatet består av en lukker, fast forbundet med et robust ur. Dette er festet til et underlag, som bærer en skjerm, og som andre lignende apparatdelar som reguleres av det samme ur eller av andre som er synkronisert med det, også må fastgjøres på. Den spesielle hensikt med figuren er å understreke at et ur er en maskin hvis virkemåte fullstendig beskrives ved hjelp av vanlig mekanikk, og som hverken influeres ved avlesning av viserens posisjon eller ved vekselvirkningen mellom urets tilbehør og en atomær partikkel. Ved at man sikrer seg at hullet åpnes et be-

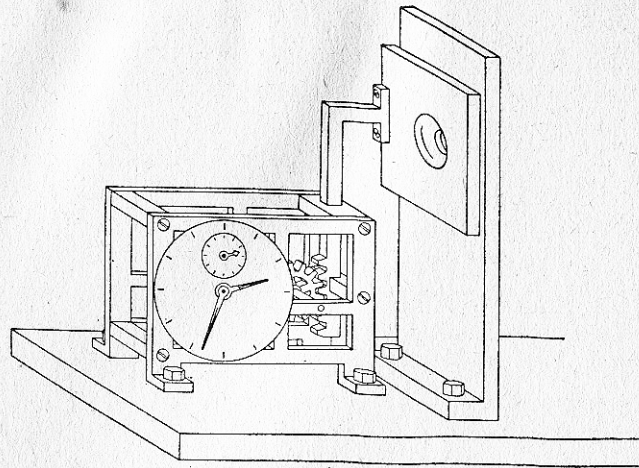


Fig. 6

stemt øyeblikk, kan et apparat av denne typen f. eks. benyttes til en nøyaktig måling av den tid det tar for et elektron eller foton å komme fra skjermen til et annet sted, men det gir åpenbart ingen mulighet for å kontrollere energioverføringen til lukkeren, og således trekke slutninger om energien til den partikkelen som har passert gjennom hullet. Hvis vi er interessert i slike slutninger, må det naturligvis brukes en oppstilling hvor lukkeranordningene ikke lenger kan tjene som nøyaktig ur, men hvor vårt kjennskap til tidspunktet for åpningen av hullet i skjermen inneholder en uskarphet, som gjennom den generelle ligning (4) er forbundet med nøyaktigheten av energimålingen.

Betraktninger over slike mer eller mindre praktiske anordninger og deres mer eller mindre fiktive bruk viste seg å være meget lærerike, fordi de henledet oppmerksomheten på vesentlige trekk ved problemene. Hovedsaken er her å skjelve mellom *undersøkelsesobjektene* og de *måleinstrumenter* som tjener til, ved hjelp av klas-

siske begreper, å definere betingelsene som fenomenene opptrer under. I denne forbindelse kan det bemerkes at det for de foregående betraktninger ikke er relevant at eksperimenter som innebærer en nøyaktig kontroll med overføringen av bevegelsesmengde og energi fra atomære partikler til tunge legemer som skjermer og lukkere, ville være meget vanskelige å foreta om de overhodet kunne bringes til utførelse. Avgjørende er bare at disse legemene – i motsetning til de egentlige måleinstrumenter – i så tilfelle sammen med partiklene utgjør det system som den kvantemekaniske formalisme skal anvendes på. Med hensyn til fastleggingen av betingelsene for enhver veldefinert anvendelse av formalismen er det videre vesentlig at *hele det eksperimentelle arrangementet* tas i betraktning. Innføringen av nye apparatdelene, f. eks. et speil, i partikkelens bane kan medføre nye interferensvirkninger, som vesentlig innvirker på forutsigelsene om de mulige iakttagelsesresultater.

I hvor høy grad vi må gi avkall på å anskueliggjøre atomære fenomener på grunn av deres udelelighet, kommer slående til uttrykk i følgende eksempel som Einstein meget tidlig henledet oppmerksomheten på og ofte har vendt tilbake til. Hvis et foton passerer et halvgjennomtrengelig speil som gir to muligheter for dets forplantningsretning, kan fotonet enten registreres på én og bare én av to fotografiske plater, anbrakt i store avstander i de nevnte retninger, eller vi kan – ved å erstatte platene med speil – iaktta virkninger som er fremkommet ved interferens mellom de to reflekterte bølgetog. Ved ethvert forsøk på billedlig fremstilling av fotonets atferd ville vi således stå overfor følgende vanskelighet: På den ene side å bli nødt til å si at fotonet alltid velger én av to veier, og på den annen side at det oppfører seg som om det hadde gått *begge* veier.

Det er nettopp argumenter av den art som minner oss om umuligheten av å dele opp kvantefenomenene og van-

skeligheten ved å tilskrive atomære objekter vanlige fysiske attributter. Særlig må vi gjøre oss klart at enhver entydig bruk av rom-tid-begreper i beskrivelsen av atomære fenomener – ut over redegjørelsen for plasseringen og synkroniseringen av de instrumentene som utgjør forsøksanordningen – er begrenset til registrering av iakttagelser som beror på merker på en fotografisk plate eller lignende praktisk irreversible forsterknings-effekter, f. eks. oppbygningen av en vandråpe omkring et ion i et tåkekammer. Skjønt virkningskvantet selvfølgelig i siste instans er ansvarlig for egenskapene hos de stoffer som måleinstrumentene er oppbygd av og iakttagelsesmidlenes virkemåte beror på, er denne omstendighet ikke relevant for spørsmålet om hensiktsmessigheten og fullstendigheten av de her diskuterte aspekter av den kvantemekaniske beskrivelse.

Disse problemene ble instruktivt belyst på det samme Solvay-møte ¹⁰⁾ hvor Einstein reiste sine generelle innvendinger. Ved den anledning oppsto også en interessant diskusjon om hvordan man skal tale om opptreden av fenomener som bare kan forutsies statistisk. Spørsmålet var om vi med hensyn til opptreden av individuelle effekter skulle gjøre bruk av en terminologi som var foreslått av Dirac, og si at det dreide seg om et valg fra «naturens» side, eller om vi, som Heisenberg gjorde seg til talsmann for, skulle si at vi hadde å gjøre med et valg foretatt av iakttageren, som konstruerer måleinstrumentene og avleser resultatene. Enhver slik terminologi vil vel imidlertid lett synes tvilsom, for det er på den ene side neppe rimelig å tilskrive naturen en vilje i vanlig forstand, og på den annen side er det jo ikke mulig for iakttageren å innvirke på de begivenheter som kan inntreffe under de betingelser han har arrangert. Etter min oppfatning har vi ikke annet alternativ enn å erkjenne at

¹⁰⁾ Sst. 248 ff.

vi på dette erfaringsområde har å gjøre med individuelle fenomener, og at våre muligheter for å benytte måleinstrumentene bare tillater oss å treffe et valg mellom de forskjellige komplementære typer av fenomener som vi ønsker å studere.

De erkjennelsesteoretiske problemer som her er berørt, ble mer eksplisitt behandlet i et bidrag til et festskrift ¹¹⁾ i anledning av Plancks 70-års fødselsdag i 1929. I denne artikkelen ble den belæring som oppdagelsen av det universelle virkningskvantum har gitt oss, sammenlignet med den utvikling som hadde fulgt på erkjennelsen av lysets endelige hastighet, og som gjennom Einsteins banebrytende verk i så høy grad avklart de grunnleggende prinsipper for naturbeskrivelsen. Ved å fremheve alle fenomeners avhengighet av referansesystemet, åpnet relativitetsteorien helt nye veier til å etterspore generelle fysiske lover av uanet rekkevidde. I kvanteteorien har den logiske beskrivelse av de fundamentale lovmessigheter som behersker atomære fenomener, og som så lenge var skjult, krevd erkjennelsen av at det ikke kan skjernes skarpt mellom objektenes atferd og deres vekselvirkning med de måleinstrumentene som definerer referansesystemet.

I denne henseende stiller kvanteteorien oss overfor en ny situasjon i fysikken, men i artikkelen understrekes likheten med situasjoner vedrørende analyse og syntese av erfaringer på andre områder av menneskelig viten. Som kjent stammer mange problemer i psykologien fra den forskjellige plassering av skillet mellom objekt og subjekt ved beskrivelsen av psykiske opplevelser. Således brukes ord som «tanker» og «følelser», som begge er like uunnværlige for å belyse rikdommen og mangfoldigheten i det bevisste liv, på lignende komplemen-

¹¹⁾ N. Bohr, *Die Naturwissenschaften* 17, 483 (1929). På dansk i *Atomteori og Naturbeskrivelse*, København 1929.

tær måte som rom-tids-koordinasjon og dynamiske bevarelseslover i atomfysikken. En nøyaktig formulering av slike analogier innebærer selvfølgelig terminologiske vanskeligheter, og forfatterens innstilling antydes kanskje best i et avsnitt av artikkelen hvor det henvises til det gjensidige utelukkelsesforhold som alltid vil bestå mellom den praktiske bruk av et ord og forsøk på en streng definisjon av det. Hovedformålet med disse betraktningene, som ikke minst var inspirert av håpet om å påvirke Einsteins innstilling, var å peke på den bakgrunn som studiet av nye men enkle fysiske erfaringer har skapt til belysning av generelle erkjennelsesproblemer.

Under det neste møte med Einstein ved Solvay-konferansen i 1930 tok våre diskusjoner en nesten dramatisk vending. Som en innvending mot den oppfatning at en kontroll med utvekslingen av bevegelsesmengde og energi mellom objektene og måleinstrumentene var utelukket, hvis disse instrumentene skulle tjene sitt formål, nemlig å definere rom-tid-rammen for fenomenene, fremsatte Einstein det argument at en slik kontroll måtte være mulig når man tok relativitetsteoriens krav i betraktning. Spesielt skulle den generelle ligning mellom energi og masse, uttrykt i Einsteins berømte formel

$$E = mc^2 \quad (5)$$

gjøre det mulig å måle ved enkel veining den totale energi hos ethvert system, og således i prinsippet å kontrollere den energi som overføres til det under dets vekselvirkning med et atomært objekt.

Som en anordning egnet til et slikt formål foreslo Einstein det apparatet som er antydnet i fig. 7, og som består av en kasse i hvis ene vegg et hull kan åpnes og lukkes ved hjelp av en lukker som beveges av et urverk. Hvis kassen i begynnelsen inneholdt en viss mengde stråling,

og uret var innstilt til å åpne hullet til en bestemt tid i et meget lite intervall, kunne man oppnå at et enkelt foton slapp igjennom hullet til et tidspunkt som var kjent med så stor nøyaktighet det skulle være. Videre ville det tilsynelatende være mulig, ved å veie hele kassen før og etter denne hendelsen, å måle fotonets energi med enhver ønsket nøyaktighet, direkte i strid med den resiproke ubestemthet av tids- og energistørrelsene i kvantemekanikken.

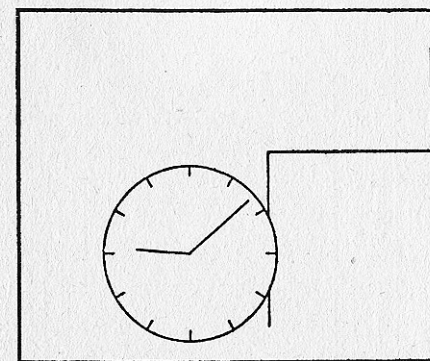


Fig. 7

Dette argumentet syntes å romme en alvorlig innvending og var foranledningen til inngående undersøkelse av hele problemet. Ved utgangen av diskusjonen, som Einstein selv bidro virksomt til, ble det imidlertid klart at argumentet ikke kunne opprettholdes. Det viste seg nødvendig ved behandlingen av spørsmålet å undersøke nærmere konsekvensene av den identifikasjon av treg og tung masse som inneholdes i ligning (5). Særlig var det vesentlig å være oppmerksom på sammenhengen – velkjent fra rødforskyvningen av linjen i solens spektrum – mellom et urs gang og dets posisjon i et tyngdefelt, som er en følge av Einsteins prinsipp om

ekvivalensen mellom tyngdevirkninger og fenomener som iakttas i akselererte referansesystemer.

Diskusjonen dreide seg især om den mulige bruk av et apparat som inneholder Einsteins anordning, og som i fig. 8 er tegnet i den samme pseudorealistiske stil som

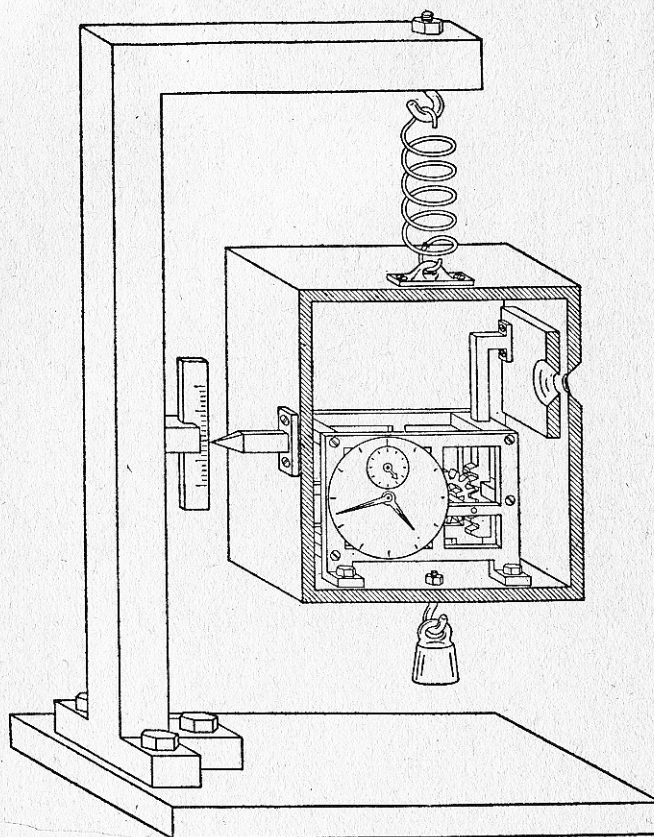


Fig. 8

noen av de tidligere figurer. Kassen, som er vist i tverrsnitt for at man kan se det indre av den, er opphengt i en fjær og forsynt med en viser til å angi dens posisjon

på en skala, fastgjort til bærestangen. Veiningen av kassen kan således foretas med enhver gitt nøyaktighet Δm , ved å justere vekten til dens nullstilling ved hjelp av passende lodder. Det vesentlige punkt er nå at enhver bestemmelse av denne posisjonen med en gitt nøyaktighet Δq krever et minste spillerom Δp i kontrollen med kassens bevegelsesmengde, forbundet med Δq ved ligning (3). Dette spillerom må åpenbart igjen være mindre enn den totale impuls som i løpet av hele den tid T som det tar å utføre veiningen, kan overføres fra gravitasjonsfeltet til et legeme med massen Δm , eller

$$\Delta p \approx \frac{h}{\Delta q} < T \cdot g \cdot \Delta m, \quad (6)$$

hvor g er gravitasjonskonstanten. Jo større nøyaktighet viseravlesningen q forlanger, desto lenger må altså veiningensintervallet T være, hvis det skal oppnås en gitt nøyaktighet Δm av veiningen av kassen med innhold.

Ifølge den alminnelige gravitasjonsteori vil nå et ur som forskyves et stykke Δq i gravitasjonskraftens retning, forandre sin gang på en slik måte at avlesningen i løpet av et tidsintervall T viser en avvikelse ΔT , gitt ved ligningen

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{c^2} g \Delta q. \quad (7)$$

Ved å sammenligne (6) og (7) ser vi derfor at det etter veiningen vil være et spillerom i vårt kjennskap til urets justering

$$\Delta T > \frac{h}{c^2 \Delta m}.$$

Sammen med formelen (5) fører denne ligningen til

$$\Delta T \cdot \Delta E > h,$$

i samsvar med ubestemthetsprinsippet. Bruken av apparatet som et middel til en nøyaktig måling av fotonets energi vil altså hindre oss i å kontrollere tidspunktet for utsendelsen av det.

Diskusjonen, som på så lærerik måte viste styrken og motsigelsesfriheten ved relativistiske argumenter, understreket altså enda en gang at det ved studiet av atomære fenomener er nødvendig å skjelne mellom egentlige måleinstrumenter, som tjener til å definere referansesystemet, og de deler som utgjør undersøkelsesobjektene og i hvis beskrivelse virkningskvantet ikke kan settes ut av betraktning. Tross den slående bekreftelse på konsekvensen og rekkevidden av den kvantemekaniske beskrivelsesmåten, uttrykte Einstein i en påfølgende samtale med meg sin bekymring med hensyn til den tilsynelatende mangel på urokkelige prinsipper for naturbeskrivelsen, som alle kunne enes om. Fra mitt synspunkt kunne jeg imidlertid bare svare at vi like overfor den oppgave å bringe orden på et helt nytt erfaringsområde, neppe kunne stole på noen tilvante prinsipper, om de var aldri så generelle, bortsett fra kravet om å unngå logisk motsigelse, og i så måte oppfylte jo kvantemekanikkens matematiske formalisme alle fordringer.

Solvay-møtet i 1930 var siste gang vi i diskusjonene med Einstein kunne nyte godt av Ehrenfests stimulerende og meglende innflytelse, men kort før sin tragiske død i 1933 fortalte han meg at Einstein var langt fra å være tilfreds, og med sin vanlige skarpsindighet hadde trukket frem nye aspekter av situasjonen, som bestyrket hans kritiske innstilling. Ved en videre undersøkelse av mulighetene for å anvende veiningsanordningen hadde Einstein tenkt ut andre fremgangsmåter, som – selv om de ikke tillot den bruk han opprinnelig hadde tilstrebet – syntes å skjerpe paradoksene og forhindre den logiske løsning av dem. Einstein hadde således pekt på at man etter den innledende veining av kassen med uret og den

derpå følgende utsendelse av fotonet hadde valget mellom å gjenta veiningen eller å åpne kassen og sammenligne uret med et standardur. Vi kan altså på dette stadium ennå velge fritt om vi ønsker å trekke slutninger om fotonets energi eller om det tidspunkt da den forlot kassen. Uten på noen måte å forstyrre fotonet mellom dets utsendelse og dets senere vekselvirkning med andre passende målemidler er vi altså i stand til å gjøre nøyaktige forutsigelser, *enten* om tidspunktet for dens ankomst *eller* om energimengden som frigjøres ved dens absorpsjon. Ifølge den kvantemekaniske formalisme kan det imidlertid i fastleggingen av en isolert partikkels tilstand ikke inngå både en veldefinert forbindelse med tidsskalaen og en nøyaktig bestemmelse av energien, og det kunne altså se ut som om denne formalismen ikke gav en adekvat beskrivelse.

Enda en gang hadde Einsteins søkende tanke trukket frem et eiendommelig trekk av situasjonen i kvanteteorien, som slående illustrerer hvor langt vi her er utenfor tilvante forklaring av fysiske fenomener. Allikevel kunne jeg ikke slutte meg til den tankegang som Ehrenfest berettet om. Etter min oppfatning kunne en logisk motsigelsesfri matematisk formalisme bare sies å være utilstrekkelig når det kunne påvises at dens konsekvenser avvek fra erfaringen eller at dens forutsigelser ikke uttømte iakttagelsesmulighetene, og ikke noen av disse punkter var Einsteins argumentasjon rettet mot. Vi må jo gjøre oss klart at det ved det problem det gjelder ikke er tale om *én* fastlagt forsøksanordning, men om *to* forskjellige anordninger som utelukker hverandre. I den ene benyttes vekten sammen med andre apparatdelene, f. eks. et spektrometer, til å undersøke energioverføring ved et foton. I den andre anvendes en lukker som reguleres av et standardisert ur, sammen med andre apparater av lignende art, nøyaktig synkronisert i forhold til uret, til undersøkelse av tiden for fotonets forplantning

over en gitt avstand. I begge disse tilfelle ventes det – som også antatt av Einstein – at de iakttagbare effekter skal være i overensstemmelse med teoriens forutsigelser.

Problemet understreker igjen nødvendigheten av å betrakte *hele* forsøksanordningen, hvis fastlegging er nødvendig for enhver veldefinert anvendelse av den kvantemekaniske formalisme. I denne sammenheng kan det bemerkes at lignende paradokser som de som Einstein overveide, også opptrer ved så enkle anordninger som den som antydes i fig. 5. Etter en innledende måling av skjermens bevegelsesmengde har vi, når et elektron eller foton har gått gjennom hullet, i prinsippet valget mellom å gjenta impulsmålingen eller å kontrollere skjermens posisjon og således gjøre forutsigelser om forskjellige påfølgende iakttagelser. Det kan også tilføyes at det åpenbart ikke kan gjøre noen forskjell med hensyn til de iakttagelser som kan oppnås ved en bestemt forsøksanordning, om våre planer for konstruksjonen og bruken av apparatene er fastlagt i forveien, eller om vi foretrekker å utsette planleggingen til et senere tidspunkt, når partikkelen allerede er på vei fra et apparat til et annet.

I den kvantemekaniske beskrivelsen kommer vår frihet til å bygge opp og bruke forsøksanordningen til uttrykk i muligheten for å velge de klassisk definerte parametrene, som inngår i enhver veldefinert anvendelse av formalismen. I alle slike henseender svarer kvantemekanikken, så nøye som det er forenlig med fenomenenes individualitet, til forholdene i den klassiske fysikken. Ved å hjelpe til å bringe dette punktet så klart frem, hadde Einsteins betenkeligheter altså igjen gitt en velkommen tilskyndelse til å utforske vesentlige trekk ved situasjonen.

*

Emnet for det neste Solvay-møte i 1933 var de problemer som gjaldt atomkjernenes struktur og egenskaper, et område hvor det nettopp på den tiden var skjedd store fremskritt som følge både av eksperimentelle oppdagelser og av nye fruktbare anvendelser av kvantemekanikken. Det er i denne forbindelse neppe nødvendig å minne om at de opplysninger man fikk ved studiet av kunstige kjerneomdannelser, direkte bekreftet Einsteins fundamentale lov om ekvivalensen mellom masse og energi, som skulle bli en stadig viktigere ledetråd ved kjernefysiske undersøkelser. Det kan også nevnes hvordan Einsteins intuitive erkjennelse av forbindelsen mellom loven for de radioaktive omdannelser og de sannsynlighetsregler som behersker de individuelle kvanteeffekter (jfr. s. 60), ble bekreftet ved den kvantemekaniske forklaring av de spontane kjernesplittings. Vi har her å gjøre med et typisk eksempel på den statistiske beskrivelsesmåte, og komplementaritetsforholdet mellom energi-impulsbevarelse og tid-romkoordinasjon finner slående uttrykk i det velkjente paradoks om partiklers gjennomgang gjennom potensialbarrierer.

Einstein selv deltok ikke i dette møtet. Det fant sted i en tid, formørket av den tragiske utvikling i den politiske verden, som skulle innvirke så dypt på hans skjebne og i så høy grad øke hans byrder i menneskehetens tjeneste. Få måneder tidligere, under et besøk i Princeton – hvor Einstein var gjest ved det nylig opprettede *Institute for Advanced Study*, som han snart etter ble fast knyttet til – hadde jeg imidlertid igjen anledning til å tale med ham om de erkjennelsesteoretiske problemer i atomfysikken, men forskjellene i vår innstilling og måte å uttrykke oss på la stadig hindringer i veien for gjensidig forståelse. Mens forholdsvis få personer inntil da hadde deltatt i de diskusjoner som er omtalt i denne artikkelen, ble Einsteins kritiske holdning til kvante-

mekanikken alminnelig kjent gjennom en avhandling ¹²⁾ med titelen «Kan den kvantemekaniske beskrivelse av den fysiske virkelighet betraktes som fullstendig?» Den ble offentliggjort i 1935 av Einstein, Podolsky og Rosen.

Argumentasjonen i denne avhandlingen er basert på et kriterium som forfatterne uttrykker i følgende setning: «Hvis vi, uten på noen måte å forstyrre et system, med full sikkerhet kan forutsi verdien av en fysisk størrelse, så eksisterer det et element av den fysiske virkelighet, svarende til denne fysiske størrelsen.» Ved en elegant utvikling av den kvantemekaniske formalismes konsekvenser med hensyn til tilstanden av et system bestående av to deler som i et begrenset tidsintervall har vært i vekselvirkning, vises det dernest at forskjellige størrelser, hvis bestemmelse ikke kan kombineres i fremstillingen av ett av delsystemene, ikke desto mindre kan forutsies ved målinger utført på det annet delsystem. I overensstemmelse med sitt kriterium slutter forfatterne derfor at kvantemekanikken «ikke er en fullstendig beskrivelse av den fysiske virkelighet», og de gir uttrykk for sin overbevisning om at det vil være mulig å utvikle en mer adekvat redegjørelse for fenomenene.

På grunn av at argumentet var klart og tilsynelatende ubestridelig, vakte avhandlingen av Einstein, Podolsky og Rosen røre blant fysikerne, og den har siden spilt en stor rolle i den alminnelige filosofiske diskusjon. Det dreier seg jo om et meget subtilt spørsmål, som er egnet til å understreke hvor langt vi i kvanteteorien er utenfor rekkevidden av billedlige forestillinger. Imidlertid vil det fremgå at vi her har å gjøre med problemer av akkurat samme art som dem Einstein reiste i de tidligere diskusjonene, og i en artikkel ¹³⁾ som utkom få måneder senere, søkte jeg å vise at komplementaritetssynspunk-

¹²⁾ A. Einstein, B. Podolsky og N. Rosen, Phys. Rev. 47, 777 (1935).

¹³⁾ N. Bohr, Phys. Rev. 48, 696 (1935).

tet fullstendig fjernet de tilsynelatende motsigelsene. Tankegangen var i alt vesentlig den samme som den jeg har utviklet på de foregående sider, men for å gjenkalle hvordan situasjonen den gang ble diskutert, vil jeg gjerne sitere noen avsnitt av artikkelen.

Etter å ha henvist til de slutninger som Einstein, Podolsky og Rosen hadde trukket på grunnlag av sitt kriterium, skrev jeg:

En slik argumentasjon er imidlertid neppe egnet til å ramme den kvantemekaniske beskrivelse, idet denne er basert på en sammenhengende matematisk formalisme, som automatisk omfatter enhver måling av omtalte art. Den tilsynelatende motsigelse avslører bare at den tilvante betraktningmåten på vesentlige punkter er uegnet til rasjonell redegjørelse for de fenomener som vi møter i kvantefysikken. *Den endelige vekselvirkning mellom objektet og målemidlene*, som er betinget av selve virkningskvantets eksistens, medfører — på grunn av at det er umulig å kontrollere objektets reaksjon på måleinstrumentene hvis disse skal tjene sitt formål — at det er nødvendig å gi definitivt avkall på det klassiske kausalitetsideal og å foreta en gjennomgripende revisjon av vår innstilling til problemet om den fysiske virkelighet. Som vi skal se, inneholder det virkelighetskriterium som er foreslått av de nevnte forfattere, en vesentlig flertydighet når det anvendes på de faktiske problemer som vi her står overfor.

Med hensyn til det spesielle problem som Einstein, Podolsky og Rosen hadde behandlet, ble det deretter vist at formalismens konsekvenser når det gjaldt et system bestående av to atomære objekter som er i vekselvirkning med hverandre, svarer til de enkle argumenter som i det foregående er nevnt i forbindelse med diskusjonen av forsøksanordninger, egnet til studiet av komplementære fenomener. Skjønt ethvert par av konjugerte rom- og impulsvariable adlyder den regel som er uttrykt i (2) for ikke-kommutativ multiplikasjon, og altså bare kan fastlegges ved resiproke spillerom gitt ved (3), vil differansen $q_1 - q_2$ mellom to romkoordinater av systemets bestanddeler kommutere med summen p_1

+ p_2 av de tilsvarende bevegelsesmengdekomponenter, hvilket følger direkte av ombyttbarheten av q_1 og p_2 og av q_2 og p_1 . Både $q_1 - q_2$ og $p_1 + p_2$ kan altså fastlegges nøyaktig i en tilstand av det sammensatte system, og vi kan derfor forutsi verdien av enten q_1 eller p_1 , hvis enten q_2 eller p_2 er bestemt ved direkte målinger. Hvis vi som de to deler av systemet tar en partikkel og en skjerm som den som er antydnet i fig. 5, ser vi at muligheten for å fastlegge partikkelens tilstand ved målinger på skjermen, nettopp svarer til den situasjonen som er beskrevet på side 69 f. og ytterligere diskutert på side 87 f., hvor det ble nevnt at vi etter at partikkelen har passert skjermen, stadig i prinsippet har valget mellom å måle skjermens posisjon eller dens bevegelsesmengde, og i hvert av tilfellene gjøre forutsigelser med hensyn til videre iakttagelser av partikkelen. Som det ofte er blitt understreket, er hovedpunktet her at slike målinger krever forsøksanordninger som utelukker hverandre.

Argumentasjonen i artikkelen ble sammenfattet i følgende avsnitt:

Fra vårt synspunkt ser vi nå at formuleringen av det ovenfor nevnte kriterium på fysisk virkelighet, foreslått av Einstein, Podolsky og Rosen, rommer en flertydighet med hensyn til betydningen av uttrykket «uten på noen måte å forstyrre et system». Selvfølgelig er det i et tilfelle som det vi nettopp har betraktet, ikke tale om en mekanisk forstyrrelse av det undersøkte system på det siste kritiske stadium av målingene. Men nettopp på dette stadium er det tale om *en innflytelse på selve de betingelser som definerer de mulige typer av forutsigelser angående systemets fremtidige atferd*. Ettersom disse betingelsene utgjør et uunnværlig element av beskrivelsen av ethvert fenomen som uttrykket «fysisk virkelighet» på konsekvent måte kan knyttes til, ser vi at de nevnte forfatteres argumentasjon ikke rettferdiggjør deres konklusjon, at den kvantemekaniske beskrivelse i sitt vesen er ufullstendig. Denne beskrivelsen må tvert imot, som det fremgår av den foregående diskusjon, karakteriseres som en rasjonell utnyttelse av alle muligheter for entydig interpretasjon av målin-

ger, forenlig med den endelige og ukontrollerbare vekselvirkning — som er betinget av virkningskvantet — mellom objektene og måleinstrumentene på kvanteteorien område. Det er bare det gjensidige utelukkelsesforhold mellom to forsøksanordninger — hvorved muligjgjøres entydig definisjon av komplementære størrelser — som gir plass for nye fysiske lover, hvis opptreden ved første blick synes uforenlig med naturvitenskapens grunnleggende prinsipper. Det er nettopp denne helt nye situasjon når det gjelder beskrivelse av fysiske fenomener, som betegnelsen *komplementaritet* tar sikte på å karakterisere.

Når jeg leser disse avsnittene igjen, har jeg en sterk følelse av manglene ved uttrykksformen. De må ha gjort det meget vanskelig å følge tankegangen, som tar sikte på å fremheve den flertydighet som rommes i en henvisning til objekters fysiske attributter, når det er tale om fenomener hvor det ikke kan skjelnes skarpt mellom objektene egen atferd og deres vekselvirkning med måleinstrumentene. Jeg håper imidlertid at diskusjonene med Einstein i de forløpne år, som bidro så meget til å gjøre oss fortrolige med situasjonen i kvantefysikken, gir et klarere inntrykk av at gjenopprettelsen av logisk orden på dette erfaringsområde krevde en gjennomgripende revisjon av grunnlaget for fysisk forklaring.

Einsteins synspunkter fra den tid er uttrykt i en artikkel med titelen «Fysikk og virkelighet»¹⁴). Etter å ha gitt en instruktiv fremstilling av den gradvise utvikling av de fundamentale prinsipper i de klassiske fysiske teorier og deres forhold til problemet om den fysiske virkelighet, hevder Einstein her at den kvantemekaniske beskrivelse bare må betraktes som et middel til å reddegjøre for den gjennomsnittlige atferd hos et stort antall atomære systemer. Hans innstilling til den oppfatning at det skulle være tale om en uttømmende beskrivelse av individuelle fenomener ble uttrykt i følgende ord: «Å

¹⁴) A. Einstein, Journ. Franklin Institute 221, 349 (1936).

tro dette, er mulig uten logisk motsigelse. Men det er i så sterk motsetning til mitt vitenskapelige instinkt at jeg ikke kan oppgi å lete etter en mer fullstendig beskrivelse.»

Selv om en slik innstilling i og for seg kunne synes ganske nøktern, rommer den ikke desto mindre en avvisning av hele den argumentasjon som er utviklet i det foregående, og som tar sikte på å vise at vi i kvantemekanikken ikke har å gjøre med noe vilkårlig avkall på en mer detaljert analyse av atomære fenomener, men at det gjelder erkjennelsen av at en slik analyse er *prinsipielt* utelukket. Kvanteeffektene eiendommelige individualitet stiller oss overfor en ny situasjon når det gjelder sammenfatningen av veldefinerte erfaringer – en situasjon som ikke var forutsett i den klassiske fysikken og er uforenlig med tilvante forestillinger, egnet til vår orientering i og tilpasning til dagliglivets verden. Det er i denne henseende at kvanteteorien har krevd en fornyet revisjon av grunnlaget for den entydige bruk av elementære begreper – som et videre skritt i den utvikling som siden relativitetsteorien er blitt så karakteristisk for vår tids vitenskap.

De mer filosofiske sider av situasjonen i atomfysikken vakte i de følgende år interesse i stadig videre kretser, og ble blant annet diskutert på Den annen internasjonale kongress for vitenskapens enhet, som fant sted i København i juli 1936. I et foredrag ¹⁵⁾ ved denne anledning søkte jeg særlig å understreke likheten i erkjennelsesteoretisk henseende mellom årsaksbeskrivelsens begrensning i atomfysikken og situasjoner som vi møter på andre kunnskapsområder. Et hovedformål med slike paralleller var å henlede oppmerksomheten på at det er nød-

¹⁵⁾ N. Bohr, *Erkenntnis* 6, 293 (1937) og *Philosophy of Science* 4, 289 (1937).

vendig på mange områder av menneskelig interesse å ta stilling til problemer av lignende art som dem kvanteteorien har reist. Derved håpet jeg å skape en mindre fremmed bakgrunn for den tilsynelatende ekstravagante uttrykksmåte som fysikere har utviklet for å løse sine påtrengende vanskeligheter.

Foruten de komplementære trekk som er iøynefallende i psykologien, og som allerede har vært berørt (jfr. s. 81), kan eksempler på slike sammenhenger også etterspores i biologien, navnlig når det gjelder sammenligningen mellom mekanistiske og vitalistiske synspunkter. Dette siste spørsmålet hadde tidligere vært emne for et foredrag som jeg holdt på Den internasjonale kongress for lysbehandling i København 1932 ¹⁶⁾. I denne sammenheng ble det også fremhevet at selv den psykofysiske parallellisme som Leibnitz og Spinoza diskuterte, hadde fått større rekkevidde gjennom utviklingen av atomfysikken. Den påtvinger oss en innstilling til spørsmålet om forklaring, som minner om den gamle visdom at vi i vår søken etter harmonier i livet aldri må glemme at vi både er skuespillere og tilskuere i tilværelsens drama.

Slike ytringer måtte naturlig nok hos mange skape inntrykket av en bakenforliggende mystisisme, fremmed for vitenskapens ånd. Ved den ovenfor nevnte kongress i 1936 forsøkte jeg derfor å oppklare den slags misforståelser og understreke at det bare var tale om en bestrebelse på å klarlegge vilkårene for beskrivelse og sammenfatning av erfaringer på ethvert kunnskapsområde ¹⁵⁾. Allikevel er jeg redd at det i denne henseende bare i liten grad lyktes meg å overbevise mine tilhørere. For dem måtte de innbyrdes meningsforskjeller mellom fysikerne selvfølgelig gi grunn til skepsis når det gjaldt

¹⁶⁾ Trykt i kongressberetningen. På dansk i *Naturens Verden* 22, 433 (1938), gjengitt i denne samlingen, s. 14 ff.

nødvendigheten av i så stor utstrekning å gi avkall på tilvante krav til forklaring av fysiske fenomener. Ikke minst i en ny diskusjon med Einstein i Princeton i 1937, hvor vi ikke kom videre enn til en spøkefull strid om hvilken stilling Spinoza ville ha tatt hvis han hadde opplevd utviklingen i våre dager, ble jeg sterkt minnet om betydningen av den ytterste omhyggelighet i alle spørsmål om terminologi og dialektikk.

Disse sider av situasjonen ble særlig diskutert ved en kongress i Warszawa i 1938, arrangert av Folkeforbundets internasjonale institutt for intellektuelt samarbeid¹⁷). De foregående år hadde vært vitne til store fremskritt i kvantefysikken, og disse skrev seg så vel fra fundamentale oppdagelser angående atomkjernenes oppbygning, som fra en betydningsfull utvikling i bestrebelsene på å tilpasse den matematiske formalisme til relativitetsteoriens krav. Med hensyn til det siste, ga Diracs geniale kvanteteori for elektronet et slående eksempel på den kvantemekaniske beskrivelsesmåtenes styrke og fruktbarhet. Ved dannelsen og tilintetgjørelsen av elektronpar har vi å gjøre med nye fundamentale helhetstrekk, som er nøye forbundet med de uklassiske aspekter av kvantestatistikken, uttrykt i utelukkelsesprinsippet, og som har krevd enda mer vidtgående avkall på forklaring ved hjelp av billedlig fremstilling.

I mellomtiden hadde diskusjonen av de erkjennelsesteoretiske problemene i atomfysikken tiltrukket seg mer oppmerksomhet enn noensinne, og ved omtalen av Einsteins synspunkter når det gjaldt den kvantemekaniske beskrivelsesmåtenes ufullstendighet, gikk jeg mer direkte inn på terminologiske spørsmål. I denne forbindelse advarte jeg særlig mot uttrykk som ofte forekommer i den fysiske litteraturen, som f. eks. «forstyrrelse av fenomener ved iakttagelse» eller «dannelse av atomære objek-

¹⁷) New Theories in Physics, Paris 1933, 11.

ters fysiske attributter ved målinger». Slike uttrykk kan tjene til å minne om de tilsynelatende paradokser i kvanteteorien, men er på samme tid vill-ledende, fordi ord som «fenomener» og «iakttagelse», akkurat som «attributter» og «målinger», brukes på en måte som neppe er forenlig med vanlig språk og praktisk definisjon.

Som en mer treffende uttrykksmåte foreslo jeg at ordet *fenomen* utelukkende brukes for å referere til iakttagelser, oppnådd under angitte betingelser som omfatter en redegjørelse for hele forsøksanordningen. Med en slik terminologi er iakttagelsesproblemet befridd for en hvilken som helst forvikling, ettersom alle iakttagelser ved faktiske eksperimenter uttrykkes ved entydige utsagn, som f. eks. angår registreringen av det punkt hvor et elektron treffer en fotografisk plate. En slik uttrykksmåte er videre egnet til å understreke at det ved den konsekvente fysiske tyding av den symbolske kvantemekaniske formalisme bare dreier seg om forutsigelser, av entydig eller statistisk karakter, om individuelle fenomener som opptrer under betingelser definert ved klassiske fysiske begreper.

Uansett all forskjell mellom de fysiske problemer som har gitt støtet til utviklingen av henholdsvis relativitetsteorien og kvanteteorien, avslører en sammenligning av de rent logiske trekk av den relativistiske og den komplementære betraktningens måte slående likheter når det gjelder å gi avkall på den absolutte betydning av objektets sedvanlige fysiske attributter. Det er videre karakteristisk for anvendelsen av både relativitetsteorien og kvantemekanikken at man ved redegjørelsen for erfaringene ser bort fra den atomære oppbygning av måleinstrumentene selv. At virkningskvantet er så lite i forhold til de virkninger som opptrer ved vanlige erfaringer – herunder også oppstillingen og bruken av fysiske apparater – er like vesentlig i atomfysikken som det enorme antall atomer som verden består av er for den

alminnelige relativitetsteori. Som ofte påpekt, krever jo denne at dimensjonene av apparater til vinkelmåling kan gjøres små i forhold til rommets krumningsradius.

I Warszawa-foredraget omtalte jeg bruken av ikke direkte anskuelige symbolismer i relativitetsteorien og kvanteteorien på følgende måte:

Selv formalismene, som i begge teorier innenfor sine anvendelsesområder, er egnet til å sammenfatte alle tenkelige erfaringer, oppviser dyptgående likheter. Den forbausende enkelhet ved disse generaliseringer av de klassiske fysiske teorier — som oppnås ved bruken av flerdimensjonal geometri og ikke-kommutativ algebra — beror i begge tilfelle på innføringen av det konvensjonelle symbol $\sqrt{-1}$. Den abstrakte karakter hos de formalismer det gjelder, er jo ved nærmere betraktning like typisk for relativitetsteorien som for kvantemekanikken, og det er i denne henseende bare et spørsmål om tradisjon, hvis den førstnevnte teori betraktes som en avrunding av den klassiske fysikk, snarere enn som et innledende fundamentalt skritt i den dyptgående revisjon av våre begrepsmessige hjelpemidler til sammenfatning av iakttagelser, som fysikkens nyere utvikling har påtvunget oss.

Det er naturligvis riktig at vi i atomfysikken står overfor mange uløste fundamentale problemer, spesielt med hensyn til den intime forbindelse mellom den elementære elektriske enhetsladning og det universelle virkningskvantum. Men disse problemene har ikke mer forbindelse med de erkjennelsesteoretiske spørsmål som er diskutert her, enn begrunnelsen av den relativistiske betraktningmåten har med de ennå uløste kosmologiske problemer. Både i relativitetsteorien og i kvantemekanikken har vi å gjøre med nye trekk av vitenskapelig analyse og syntese, og det er i denne forbindelse interessant å legge merke til at det selv i den kritiske filosofiens store epoke i forrige århundre bare var tale om i hvilken utstrekning det *a priori* kunne gis argumenter for rom-tids-koordinasjon og kausal forbindelse mellom erfaringer, men aldri tale om rasjonell generalisering eller

jøbende begrensning av slike kategorier for menneskelig tenkning.

Skjønt jeg i de senere årene atskillige ganger har hatt anledning til å møte Einstein, har de fortsatte diskusjoner — som alltid har gitt meg nye impulser — ennå ikke ført til en felles oppfatning av de erkjennelsesteoretiske problemer i atomfysikken, og våre motstridende synspunkter er kanskje klarest uttrykt i et nylig utkommet hefte av *Dialectica*¹⁸⁾, som bringer en generell diskusjon av disse problemene. Med henblikk på de mange hindringer for gjensidig forståelse når det gjelder et emne hvor utgangspunkt og bakgrunn må påvirke enhver innstilling, har jeg imidlertid vært glad for denne anledning til å gi en bredere fremstilling av den utvikling hvorved en virkelig krise i fysikken etter min oppfatning er blitt overvunnet. Den belæring som vi herunder har mottatt, har kanskje bragt oss et avgjørende skritt videre i den aldri avsluttede streben etter harmoni mellom innhold og form, og har enda en gang minnet oss om at intet innhold kan fremstilles uten en logisk ramme, og at enhver form, hvor nyttig den enn har vært hittil, kan vise seg for snever til å omfatte nye erfaringer.

I en situasjon som denne, hvor det har vært så vanskelig å nå frem til gjensidig forståelse, ikke bare mellom filosofer og fysikere, men selv mellom fysikere av forskjellige skoler, har vanskelighetene ikke sjelden sin rot i en forkjærlighet for uttrykksmåter som byr seg frem, alt etter hvordan man nærmer seg problemene. På Instituttet i København, hvor i årenes løp mange unge fysikere fra forskjellige land er kommet sammen til diskusjoner, pleide vi i vanskelige stunder å trøste oss med spøk, blant annet med den gamle historien om de to slags sannheter. Til den ene slags hører utsagn som er så enkle og klare at den motsatte påstand helt åpen-

¹⁸⁾ *Dialectica* 1, 312 (1948).

bart ikke kan forsvares. Den annen slags – de «dype» sannheter – er utsagn for hvilke det gjelder at det motsatte også inneholder dyp sannhet. Utviklingen på et nytt område vil jo vanligvis gå gjennom stadier hvor kaos gradvis erstattes med orden. Men ikke minst på de mellomliggende trinn, hvor dype sannheter er fremherskende, er arbeidet spennende og ansporer fantasien til å søke fastere grunn. For slike bestrebelse på å oppnå den rette balanse mellom alvor og spøk står Einsteins personlighet som et forbilde, og når jeg uttrykker min forvissning om at vi gjennom et enestående fruktbart samarbeid mellom en hel generasjon av fysikere nærmer oss det mål hvor logisk orden gjør det mulig for oss, i vid utstrekning å unngå dype sannheter, håper jeg at det vil bli oppfattet i hans ånd og må tjene som unnskyldning for atskillige av bemerkningene på de foregående sider.

Diskusjonene med Einstein, som har vært emnet for denne artikkelen, har strakt seg over mange år, hvor vi har vært vitne til store fremskritt på atomfysikkens område. Enten våre møter har vært av kortere eller lengre varighet, har de alltid etterlatt et dypt og uforglemmelig inntrykk hos meg, og under utarbeidelsen av denne beretningen har jeg så å si diskutert med Einstein hele tiden, selv når jeg er kommet inn på emner som kunne synes fjernt fra de spesielle problemene som ble drøftet når vi møttes. Hva redegjørelsen for våre samtaler angår, er jeg selvfølgelig klar over at jeg bare bygger på min egen hukommelse, likesom jeg er forberedt på den mulighet at mange trekk av kvanteteorien utvikling – som Einstein har spilt en så stor rolle i – for ham selv kan fremtre i et annet lys. Jeg håper imidlertid at jeg har formådd å gi et inntrykk av hvor meget det har betydd for meg å kunne nyte godt av den inspirasjon som vi alle har mottatt ved enhver kontakt med Einstein.

6

Kunnskapens enhet

1954

Før vi forsøker å besvare spørsmålet om i hvilken grad man kan tale om kunnskapens enhet, må vi spørre om betydningen av selve ordet kunnskap. Det er imidlertid ikke min hensikt å holde et akademisk filosofisk foredrag – det har jeg neppe den nødvendige lærdom til. Men enhver vitenskapsmann blir til stadighet stilt overfor problemet om objektiv beskrivelse av erfaringene, og med det mener vi simpelthen entydige meddelelser. Vårt fundamentale redskap er selvfølgelig dagligtalens språk, som tjener det praktiske livs og det sosiale samkvems behov, og vi skal her ikke beskjeftige oss med opprinnelsen til dette språket, men med dets rekkevidde ved vitenskapelig meddelelse og særlig med problemet om hvordan beskrivelsens objektivitet kan bevares når erfaringsområdet overskrider dagliglivets hendelser.

Hovedpunktet er å gjøre seg klart at all kunnskap opprinnelig uttrykkes i en begrepsmessig ramme som er tilpasset redegjørelsen for tidligere erfaringer, og at enhver slik ramme kan vise seg å være for snever til å gi rom for nye erfaringer. Vitenskapelig forskning på mange kunnskapsområder har gang på gang gjort det nødvendig å oppgi eller omforme synspunkter som på grunn av sin fruktbarhet og tilsynelatende ubegrensede anvendelighet ble betraktet som uunnværlige for rasjonell forklaring. Skjønt denne utviklingen skriver seg fra

CAPPELENS REALBØKER

bygger på et omfattende internasjonalt samarbeid. Seriens norske konsulentråd består av professor, dr. med. *Alf Brodal*, professor, dr. philos. *Knut Fægri*, direktør *Gunnar Randers* og professor, dr. philos. *Harald Wergeland*. Hittil utkommet:

1. *Robert Galambos*: Nerver og muskler.
2. *C. V. Boys*: Fysikk med såpebobler.
3. *Donald J. Hughes*: Det fantastiske neutronet.
4. *C. G. Jung*: Det ubevisste.
5. *Alfred Romer*: Det aktive atomet.
6. *Göran Bergman*: Fuglenes liv.
7. *Donald G. Fink* og *David M. Lutyens*: Fjernsynets fysikk.
8. *Michael W. Ovenden*: Liv i universet.
9. *Lev Landau* og *G. B. Rumer*: Hva er relativitet?
10. *Johannes Setekleiv*: Kampen mot smerten.
11. *Victor F. Weisskopf*: Vitenskapens verdensbilde.
12. *Isaac Asimov*: Den genetiske koden.
13. *F. M. Branley*: På vei til månen.
14. *Sverre Dick Henriksen*: Immunitet.
15. *Hermann Bondi*: Verdensrommets gåter.
16. *Martin Gardner*: Relativitet for millioner.
17. *D. K. C. MacDonald*: Nær null.
18. *Kenneth S. Davis* og *John Arthur Day*: Vann. Vitenskapens speil.
19. *Isaac Asimov*: Blodet – livets elv.
20. *L. C. Dunn* og *Th. Dobzhansky*: Arv, rase og samfunn.
21. *Irving Adler*: Den nye matematikken.
22. *Sigmund Freud*:Psykoanalysen.
23. *Donald R. Griffin*: Å se med hørselen.
24. *René Dubos*: Louis Pasteur og den moderne vitenskap.
25. *Hannes Alfvén*: Atomet – mennesket – universet.
26. *C. G. Jung*: Psykologi og religion.
27. *E. N. da C. Andrade*: Rutherford og moderne atomfysikk.
28. *George Gamow*: Gravitasjon.
29. *Knut Schmidt-Nielsen*: Dyrenes fysiologi.
30. *Anatol og Natascha Heintz*: Menneskets avstamning.
31. *Marston Bates*: Menneskets plass i naturen.
32. *Sigmund Freud*: Seksualteorien.
33. *Fred Hoyle*: Mennesker og melkeveier.
34. *C. G. Jung*: Jeg'et og det ubevisste.
35. *Isaac Asimov*: Biologiens utvikling.
36. *Donald R. Griffin*: Fugletrekk.
37. *Hermann Bondi*: Relativitet og sunn fornuft.
38. *V. G. Dethier* og *Eliot Stellar*: Dyrenes atferd.
39. *P. E. Baldry*: Kampen mot mikrobene.
40. *Irving Adler*: Elektronhjernen.

Niels Bohr

Atomfysikk og menneskelig erkjennelse

Til norsk ved

Hedvig Wergeland

OSLO 1967

J. W. CAPPELENS FORLAG

Originalens tittel:

Atomfysik og menneskelig erkendelse.

Til norsk ved Hedvig Wergeland.

© Niels Bohr 1958.

Norsk utgave: © J. W. Cappelens Forlag A.s 1967.

Trykt hos Emil Moe&Stue A.s, Oslo.

Norsk forord

*Det syn på iakttagelsesproblemet som Niels Bohr sammenfattet i begrepet *k o m p l e m e n t a r i t e t*, la han frem på Volta-konferansen i Como i 1927, like etter at Heisenberg hadde oppdaget «usikkerhetsprinsippet».*

Komplementaritet er ledemotivet som belyses fra mange sider i denne boken. Den vender seg i like høy grad til en alminnelig leserkrets som til fysikerne, og forutsetter således i grunnen ikke spesielle kunnskaper. En sak for seg er det at fysikerne allerede fra sitt arbeid vil være mer fortrolig med de eksempler som er brukt. Uansett hvilke forkunnskaper man har, krever det en innsats å tilegne seg begrepet komplementaritet. Det er en tenkemåte som virker uvant for oss, preget som vi er av enten en Platonistisk eller en substansiell («materialistisk») naturoppfatning.

Niels Bohr var ytterst omhyggelig med sine formuleringer, og hvert ord i disse foredragene er «veiet på gullvekt». En friere oversettelse – som i og for seg kunne vært ønskelig ut fra norsk språkfølelse – var derfor ikke mulig uten at viktige nyanser ble satt på spill.

Trondheim, 3. mars 1967.

Harald Wergeland.

Innhold

1. *Innledning* 11
2. *Lys og liv* 14
Foredrag ved åpningsmøtet for Den II. internasjonale kongress for lysterapi i København, august 1932. Trykt i *Naturens Verden*, 17, 49, 1933.
3. *Biologi og atomfysikk* 28
Foredrag ved en kongress for fysikk og biologi i Bologna, oktober 1937, til minne om Luigi Galvani. Trykt i *Naturens Verden*, 22, 433, 1938.
4. *Fysikkens erkjennelsestærelse og menneskekulturene* 42
Foredrag under en sammenkomst på Kronborg under Den internasjonale kongress for antropologi og etnografi i København, august 1938. Trykt i *Tilskueren*, 56, 1, 1939.
5. *Diskusjon med Einstein om erkjennelsesteoretiske problemer i atomfysikken* 55
Bidrag til «Albert Einstein: Philosopher-Scientist». The Library of Living Philosophers, Evanston, Ill., b. 7, 199, 1949.
6. *Kunnskapens enhet* 101
Foredrag ved en kongress om kunnskapens enhet, oktober 1954, i forbindelse med 200 års jubileet for Columbia University. Trykt i kongressberetningen *The Unity of Knowledge*, s. 47. Doubleday and Co., New York 1955.

7. *Atomene og den menneskelige erkjennelse* 122
Foredrag i Det kgl. danske videnskabernes selskab, oktober 1955. Trykt i Oversigt over Selskabets Virksomhed 1955—56, s. 112.
8. *Fysikken og livets problem* 137
Utarbeidet 1957 etter Steno-forelesning i Medicinsk Selskab, København, februar 1949.

Forfatterens forord

Denne samling av artikler som er skrevet ved forskjellige anledninger i løpet av de siste 25 årene, danner en fortsettelse av tidligere avhandlinger, utgitt i Københavns Universitets festskrift 1929 under titelen «Atomteori og naturbeskrivelse». Emnet for artiklene er den erkjennelsesteoretiske belæring som atomfysikkens nyere utvikling har gitt oss, og som kaster lys over vår stilling med hensyn til beskrivelse og sammenfatning på mange områder av menneskelig erkjennelse. Avhandlingene i den tidligere samlingen var skrevet på en tid da utformingen av kvantemekanikkens matematiske metoder hadde skapt et fast grunnlag for motsigelsesfri behandling av atomfenomener, og et synspunkt som fikk betegnelsen komplementaritet, ble brukt til å karakterisere situasjonen vedrørende den entydige beskrivelse av erfaringene. I de artiklene som er samlet her er denne innstillingen ytterligere utviklet med hensyn til logisk formulering og videre anvendelse. Selvfølgelig har gjenstander vært uunngåelige, men forhåpentlig vil dette tjene til å illustrere den gradvise avklaring av argumentasjonen, især hva angår en mer konsis terminologi.

Diskusjoner med tidligere og nåværende medarbeidere ved Instituttet for teoretisk fysik ved Københavns Universitet har bidratt meget til utviklingen av disse synspunktene. For hjelp ved utarbeidelsen av artiklene

i denne samlingen står jeg især i gjeld til Oskar Klein og Leon Rosenfeld, som nå arbeider ved universitetene i Stockholm og Manchester, og til Stefan Rozentel og Aage Petersen ved Instituttet i København. Videre vil jeg gjerne takke fru S. Hellmann for virksom bistand, så vel ved forberedelsen av de enkelte artiklene som ved denne utgivelsen.

København, august 1957.

Niels Bohr

1

Innledning

Fysikkens betydning for alminnelig filosofisk tenkning ligger ikke bare i dens bidrag til vårt stadig voksende kjennskap til den natur som vi selv er en del av, men også i at den gang på gang har gitt støtet til prøving og forfinelse av våre begrepsmessige hjelpemidler. I vårt århundre har studiet av stoffenes atomære oppbygning avslørt en uanet begrensning i rekkevidden av den klassiske fysikkens forestillinger, og de krav til vitenskapelig forklaring som var blitt overtatt i tradisjonell filosofi, er derved stilt i et nytt lys. Den undersøkelse av forutsetningene for entydig bruk av våre elementære begreper som sammenfatningen av de atomære fenomener har gjort nødvendig, har derfor bud langt ut over fysikkens egentlige område.

Hovedpunktet i den belæring atomfysikkens utvikling har gitt oss, er som kjent det helhetstrekk hos atomære prosesser som er betinget av virkningskvantet. I avhandlingene har man søkt å fremstille de vesentlige sider ved situasjonen i kvantefysikken, og samtidig understreke de likhetspunkter den viser med vår stilling på andre kunnskapsområder utenfor den mekaniske naturoppfatnings rekkevidde. Det dreier seg her ikke om mer eller mindre vage analogier, men om en undersøkelse av betingelsene for konsekvent bruk av våre språklige uttrykksmidler. Betragtningene har ikke bare tjent

