

# Kvanteteorien og dens fortolkning

*Af Werner Heisenberg*

Mit første møde med Niels Bohr fandt sted i Göttingen i sommeren 1922, da Bohr efter indbydelse af det stedlige matematisk-naturvidenskabelige fakultet holdt en række forelæsninger, som vi senere gerne omtalte som »Bohr-Festspillene«. Sommerfeld, min lærer i München, havde taget mig med til Göttingen, skønt jeg dengang kun var en 20-årig student i fjerde semester. Sommerfeld nærede en varm interesse for sine studenter, og han havde mærket, hvor stærkt jeg interesserede mig for Bohr og hans atomteori. Det første indtryk af Bohrs personlighed står endnu ganske tydeligt i min erindring. Fuld af ungdommelig spænding, men dog noget forlegen og sky, med hovedet hældende lidt til den ene side, stod den danske fysiker på det lyse podium i auditoriet, i hvilket Göttinger-sommerens stærke lys strømmede ind gennem de vidtåbne vinduer. Hans sætninger kom noget stammende og sagte, men bag ethvert af de omhyggeligt valgte ord anede man en lang kæde af tanker, som fortonede sig et eller andet sted i baggrunden i en filosofisk indstilling, som fængslede mig overmåde.

I slutningen af det andet eller tredje foredrag af denne forelæsningsrække talte Bohr om en beregning, som hans medarbejder hollænderen **Kramers** havde anstillet af den såkaldte kvadratiske Stark-effekt i brintatomet, og Bohr sluttede med den bemærkning, at man vel trods alle indre vanskeligheder i den daværende atomteori måtte antage, at **Kramers'** resultater var rigtige og senere ville blive eksperimentelt bekræftet. Jeg kendte **Kramers'** arbejde ganske godt, da jeg havde refereret indholdet af det i det Sommerfeldske seminar i München. Derfor vovede jeg under den påfølgende diskussion at fremkomme med en indvending. Jeg kunne ikke tænke mig, at **Kramers'** resultater var helt rigtige, thi den kvadratiske Stark-effekt kunne jo opfattes som et grænsetilfælde af spredning af lys med meget stor bølglængde. Men da man allerede ved, at en beregning af spredningen på brintatomet med den klassiske fysiks metode må føre til forkerte resultater – den karakteristiske resonanseffekt ville jo optræde ved elektronens bane-frekvens og ikke ved brintatomets iagttagne strålingsfrekvens – så kunne

næppe heller Kramers' regning give det rigtige resultat. Bohr svarede hertil, at man vel her måtte tage strålingens tilbagevirkning på atomet med i betragtning, men han var dog synligt noget forurolet over denne indvending. Da diskussionen var forbi, kom Bohr hen til mig og foreslog at vi skulle spadserere en tur sammen på Hainberg uden for Göttingen, hvilket jeg naturligvis meget gerne ville. Denne samtale, der førte os på kryds og tværs over Hainbergs skovbevoksede højdedrag, var den første indgående diskussion, som jeg kan huske, om de fysiske og filosofiske grundproblemer i den moderne atomteori, og den har givetvis haft afgørende indflydelse på min senere livsbane. Jeg forstod for første gang, at Bohr stod meget mere skeptisk over for sin egen teori end mange andre fysikere, som f. eks. Sommerfeld, gjorde på den tid, og at erkendelsen af sammenhængene for ham ikke udsprang af en matematisk analyse af de til grund liggende antagelser, men af en intensiv beskæftigelse med selve fænomenerne, der gjorde det muligt for ham intuitivt at føle sammenhængene snarere end formelt at udlede dem.

Således opstod altså en naturerkendelse, og først som et næste skridt kan det lykkes at præcisere det erkendte i matematisk form og at gøre det tilgængeligt for den fulde rationelle analyse. Bohr var først og fremmest filosof, ikke fysiker; men han vidste, at i vor tid har naturfilosofien kun styrke, når den i alle enkeltheder underkastes eksperimentets ubønhørlige efterprøvelse.

Bohr indbød mig til at komme til København nogle uger det følgende forår og til eventuelt senere, måske på et stipendium, at arbejde der i længere tid. Dermed begyndte for mig en uendelig lærerig tid med snævert venskabeligt samarbejde, og det føjede sig endda så lykkeligt, at det netop kom i stand i det øjeblik, hvor vanskelighederne i kvanteteorien blev mere og mere uforståelige, dens indre modsigelse syntes at blive stadigt værre og drive os imod en krise som ved en næsten dramatisk række af overraskende opdagelser i løbet af få år førte til en løsning af de grundlæggende problemer.

Besøget i København fandt, hvis jeg husker rigtigt, sted i påskeferien 1923. De første indtryk af Institutet og af den kreds af unge mennesker, som den gang omgav Bohr, hensatte mig allerede efter få dages forløb i en tilstand af dyb nedtrykthed. Disse unge fysikere fra så mange forskellige lande i verden var mig langt overlegne. De fleste af dem beherskede flere fremmede sprog, mens jeg ikke kunne udtrykke mig fornuftigt på et eneste,



de kendte til den store verden derude, til mange folkeslags kultur og digtning, de spillede forskellige musikinstrumenter med stor fuldkommenhed og forstod fremfor alt langt mere end jeg af den moderne atomfysik. At jeg skulle komme til at passe ind i denne kreds syntes mig temmelig håbløst. Alligevel kom jeg hurtigt i et venskabeligt forhold til flere af dens medlemmer. Med særlig glæde mindes jeg de første diskussioner med Kramers fra Holland, Urey fra U.S.A. og Rosseland fra Norge. De syntes alle at kende Bohr godt og at agte ham højt og var fulde af optimisme med hensyn til udviklingen af den Bohrske teori.

Det største udbytte af disse uger var naturligvis samtalerne med Bohr selv. Da administrationen af Institutet allerede dengang hvilede tungt på Bohr, foreslog han, at vi skulle gøre en fodtur på nogle dage i Nordsjælland, hvor vi ville få tid til uforstyrret sammen at drøfte alle fysiske spørgsmål. Bohr var åbenbart også selv lykkelig over på denne måde at kunne vise mig nogle steder i Danmark, som han holdt særligt af. Hamlets slot Kronborg ved den nordlige del af sundet mellem Danmark og Sverige, det kunstfærdige renaissanceslot Frederiksborg ved søen i Hillerød, den store skov, der strækker sig videre mod nord til Esrum Sø og de små fiskerlejer ved Kattegat fra Gilleleje til Tisvildeleje. I nærheden af Tisvildeleje havde Bohr et rummeligt sommerhus for sin familie. På denne tur fortalte Bohr mig meget om landets historie og om dets slotte, om begivenheder fra de ældste tider med tilknytning til de islandske sagaer, som han kendte så nøje, og således fik jeg på få dage mere at vide om Skandinavien, end jeg havde gjort i hele min skoletid. Jeg lærte også at holde af det lykkelige og fredelige land, som i vort århundrede i det væsentlige var blevet forskånet for store katastrofer, og omvendt måtte jeg fortælle Bohr om, hvad der i min skoletid var forekommet i mit eget land af krig, revolution, sult og nød. Vore samtaler strakte sig over langt videre områder end fysik og naturvidenskab, og jeg var lykkelig over, at Bohr også havde så megen sans for al slags ungdommeligt overmod. Ved stranden prøvede vi ofte at se, hvem der kunne kaste en sten længst ud i havet, eller om vi kunne ramme en svømmende bjælke. Bohr fortalte, at han og Kramers engang ved stranden havde fundet en mine, der stammede fra krigens tid, og de havde da forsøgt, hvem der kunne træffe tændrøret. Efter forgæves forsøg var det imidlertid blevet klart for dem, at de dog aldrig ville kunne nyde glæden over at have ramt, da den eksploderende mine forinden ville have gjort ende på deres liv, og de havde derefter fundet sig et andet mål. Bohrs for-

kærlighed for filosofisk generaliseren blev ofte vakt netop ved ganske enkle lege. Da jeg engang på en ensom landevej kastede en sten mod en fjern telegrafpæl, og stenen mod al sandsynlighed ramte, sagde han: »At sigte på en så fjern genstand og så ramme, det er naturligvis umuligt. Men hvis man er i besiddelse af den uforkammethed at kaste i den retning uden at sigte og tilmed forestille sig den absurde mulighed, at man også kunne ramme, ja, så kan det måske dog ske. Den forestilling, at noget måske kunne ske, kan være stærkere end øvelse og vilje.«

Naturligvis indtog atomfysikkens vanskeligheder også en stor plads i vore samtaler; de blev mig vel først bevidst i al deres skarphed gennem Bohrs analyse, og vore diskussioner bestyrkede måske hos Bohr den skepsis, han allerede da så levende følte over for atomteoriens daværende stade. Man var endnu langt fra en løsning, og selv så vigtige opdagelser som Compton-effekten, som samme år blev kendt, skærpede nærmest vanskelighederne og modsigelserne. Da vi fra vor fodtur var vendt tilbage til København, havde jeg den følelse nu gennem Bohr at kende langt mere til ånden i den fremtidige atomteori, end jeg før havde gjort. Det var som om den tykke tåge, der omgav os, på en eller anden måde allerede var lettet en smule, som om man allerede ganske svagt kunne skelne konturerne af nogle af de bjerge, som vi senere måtte bestige for derfra at få overblik over sammenhængene i de atomare fænomener.

I sommersemestret 1923 arbejdede jeg i München på min doktorafhandling, hvis emne var hentet fra et helt andet område af fysikken, nemlig hydrodynamikken. Udviklingen i atomfysikken fulgte jeg så at sige kun på afstand. Om efteråret fik jeg ansættelse som assistent hos Born ved universitetet i Göttingen og tog fra da af del i diskussionerne i den derværende kreds om atomteoriens problemer. Først i vintersemestret 1924–25 kunne jeg som Rockefeller stipendiat på anbefaling af Bohr atter drage til Institutet på Blegdamsvej. Der udviklede sig lige fra begyndelsen et snævert videnskabeligt samarbejde mellem Bohr, hans nærmeste medarbejder Kramers og mig, og de samtaler, som vi førte to eller tre ad gangen, blev snart et fast punkt på programmet og hørte for mig til dagens vigtigste begivenheder, vigtigere end seminarer og forelæsninger.

Det centrale punkt i vore diskussioner var dengang teorien for dispersion, d.v.s. spredning af lys på atomer, hvorom Kramers netop havde offentliggjort et meget vigtigt arbejde. Kramers betragtninger skulle samtidig udvides til at omfatte den såkaldte Raman-effekt (spredning ledsaget af en



ændring af lysets farve), og det drejede sig åbenbart her om at gætte de rigtige matematiske formler ved hjælp af analogislutninger, udlede dem kunne man ikke, da man foreløbig manglede et grundlag for sådanne beregninger. Kramers og jeg var i begyndelsen ikke ganske enige og i visse specielle tilfælde holdt vi på forskellige formler. For mig var det overordentlig lærerigt at se, hvorledes Bohr stadig prøvede at komme videre ved fysisk fortolkning af formlerne for derigennem at nå frem til en afgørelse, medens det lå meget nærmere for mig at benytte et formelt matematisk synspunkt, altså i en vis forstand et æstetisk kriterium ved bedømmelsen. Til alt held førte til sidst begge metoder til samme svar, og jeg forsøgte at overbevise Bohr om, at det måtte være således, hvis teorien skulle være enkel og gennemsigtig. Men jeg lagde mærke til, at den matematiske gennemsigtighed ikke i sig selv for Bohr var af nogen indlysende værdi. Bohr var bange for, at den formelle matematiske struktur skulle skjule problemets fysiske kerne, og han følte sig i hvert fald overbevist om, at den fuldstændige fysiske opklaring ubetinget måtte gå forud for den matematiske formulering. Måske var jeg allerede på det tidspunkt i højere grad end Bohr parat til at gå bort fra de anskuelige billeder og tage skridtet over i den matematiske abstraktion. I hvert fald sporede jeg i de formler, som jeg havde udarbejdet sammen med Kramers, en matematik, som på en vis måde virkede af sig selv uafhængigt af alle fysiske forestillinger. For mig udgik fra denne matematik en magisk tiltrækningskraft, og jeg var fascineret af den tanke, at man her måske øjnede de første tråde af et kæmpemæssigt net af dybtliggende sammenhænge.

Ligeså lykkelig var jeg over resultatet af en diskussion med Bohr og Kramers, som drejede sig om polarisationen af fluorescenslyset. Bohr havde skrevet et udkast til en kort note herom i forbindelse med nogle eksperimenter på Francks institut, og jeg havde med foragt for alle anskuelige billeder anvendt mit mere formelle synspunkt på Bohrs problem og derved opnået kvantitative resultater, der gik noget videre end Bohrs arbejde. Det lykkedes mig at overbevise Bohr og Kramers om mine formler, men da jeg efter frokost atter trådte ind i Bohrs arbejdsværelse, var Bohr og Kramers blevet enige om, at mine formler var forkerte og forsøgte at gøre mig deres standpunkt klart. Herover udviklede der sig en timelang videnskabelig diskussion, under hvilken, så vidt jeg husker, fordringen om at gå bort fra anskuelige billeder for første gang blev udtalt i al sin skarphed og erklæret for ledetråden i det fremtidige arbejde. Bohrs tænkemåde, der i fysikkens

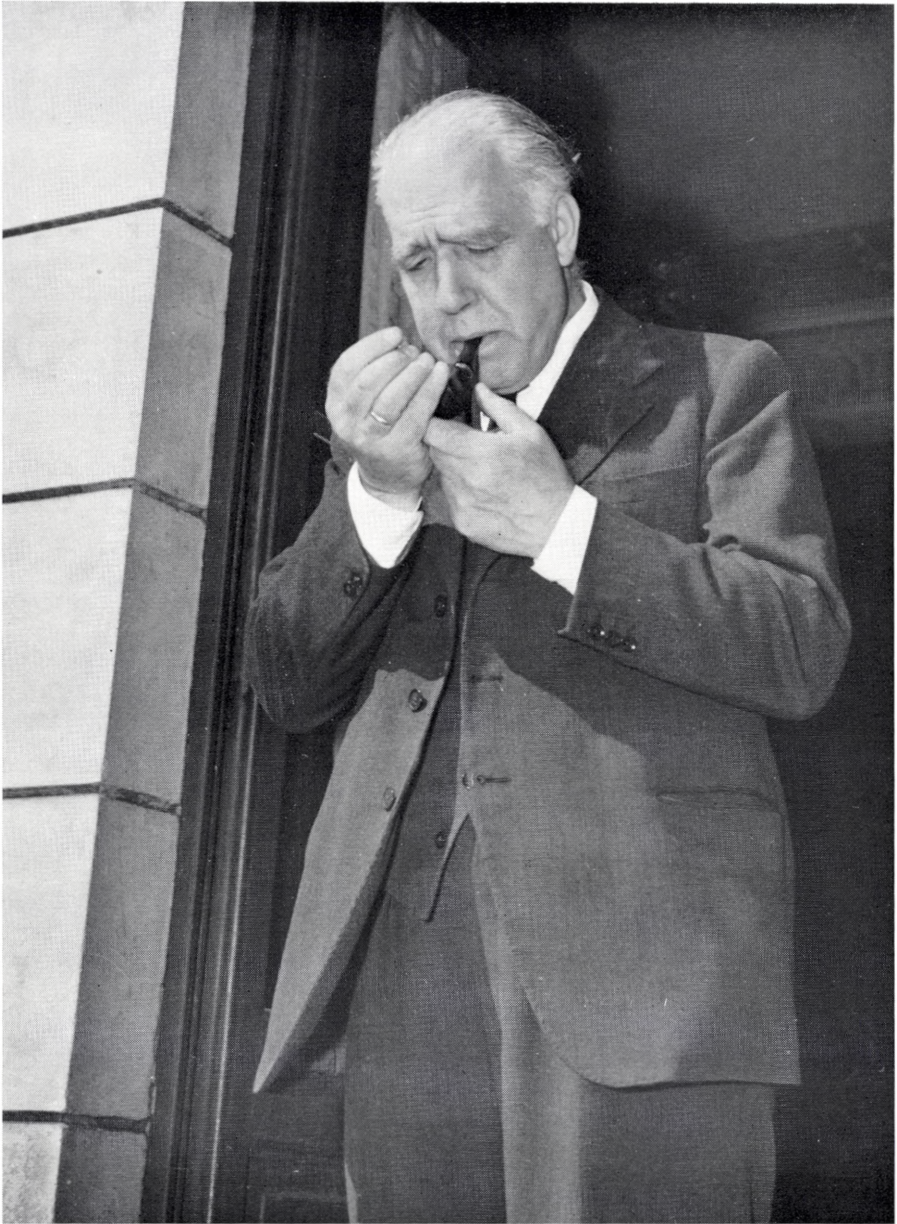
historie måske nærmest er legemliggjort i skikkelser som Faraday og Gibbs, satte ham i stand til med uovertræffelig klarhed at slå ned på problemets kerne, men han tøvede ved at tage skridtet over i den matematiske abstraktion, skønt han ikke talte imod det. Vi blev til slut enige om, at formelen var rigtig, og jeg havde den følelse, at vi var kommet den fremtidige atomteori et godt stykke nærmere.

Bohr tog naturligvis ligeså aktivt del i mange andre institutmedarbejders arbejde, og da han altid var umådelig grundig, lagde denne virksomhed så meget beslag på hans tid, at den ofte kom i konflikt med hans egne arbejder og administrationen af Institutet. Således følte Bohr sig ofte noget be-  
trængt, og det blev endnu sværere for ham at formulere sine egne tanker skriftligt. Når han gjorde det, dikterede han mig i reglen det første udkast, og jeg beundrede den omhu hvormed hvert enkelt ord igen og igen blev overvejet og ændret.

I det hele videnskabelige liv spillede også Bohrs gæstfri sommerhus i Tisvilde en vigtig rolle. Ofte tilbragte jeg nogle dage dér sammen med familien. Sammen vandrede vi gennem skoven til stranden, nød udsigten fra de skovbevoksede, sandede højder over det klare blå Kattegat, hvor gammeldags sejlskibe stadig bar deres last af sted, og vi svømmede ofte ret langt ud i havet. Engang var Bohr under badningen kommet meget langt ud, og da jeg forsøgte at svømme ud til ham, opdagede jeg til min store skræk, at vi af en strøm blev ført stadig længere fra land. Heller ikke for Bohr lykkedes det at nærme sig bredden, selv om vi med store anstrengelser bestræbte os på at komme ind mod land, og det var åbenbart, at han var træt. Jeg gennemlevede derfor nogle ængstelige minutter, da vi var helt alene, og jeg ikke mere vidste, hvad der egentlig var at gøre. Lykkeligvis nåede vi dog gennem strømmen hen i nærheden af en lille sandbanke, som vi til sidst kom op på, og hvor Bohr da i længere tid hvilede sig. Afstanden fra sandbanken til bredden var ganske vist endnu lang, men efter at have hvilet os kunne vi, idet vi svømmede så hurtigt som muligt, uden større vanskeligheder nærme os land og endelig nå bredden. Bohr og hans familie havde også en lille hest og en vogn, og da jeg var gode venner med børnene, betragtede jeg det som en særlig ære, når jeg sommetider fik lov til at køre alene omkring i skoven sammen med et af dem. Ofte kom der gæster fra København eller fra udlandet til Tisvilde, og ved deres egne overvejelser eller ved beretninger om nye eksperimenter bragte de nyt liv i de videnskabelige samtaler om de vanskeligheder i atomteorien, der foruroligede os alle.



I sommersemestret 1925 holdt jeg igen forelæsninger i Göttingen. Desuden udarbejdede jeg under en kort sygeorlov på øen Helgoland i juni et første udkast til kvantemekanikken, der for mig i en vis forstand repræsenterede kvintessensen af vore samtaler i København, nemlig en matematisk formulering af Bohrs korrespondensprincip. Jeg håbede ved en ny og for mig selv endnu meget fremmedartet matematisk metode at have fundet en vej til de mærkværdige sammenhænge, som allerede under samtalerne med Bohr og Kramers af og til var kommet til syne. Efter et besøg i Holland og England og den derpå følgende sommerferie rejste jeg igen for nogle uger til København for at diskutere den nye situation med Bohr. Bohr var yderst interesseret og havde i hvert fald ikke mere nogen indvending mod radikalt at give afkald på de anskuelige billeder. Hvorvidt de matematiske metoder ville lade sig udbygge til en fuldstændig teori var imidlertid på dette tidspunkt endnu ikke afgjort. Med særlig glæde mindes jeg fra de uger et kort ophold i Bohrs sommerhus, hvortil også de tre matematikere Harald Bohr, Hardy fra Cambridge og Besikovitch fra Rusland var kommet. Besikovitch var netop fordrevet fra Rusland på grund af det politiske virvar dér og håbede nu at finde nye arbejdsmuligheder i England. Samtalen førte hurtigt ind på den nye udvikling af atomteorien, og de tre matematikere diskuterede på en måde, som jeg fandt yderst stimulerende, hvilken matematisk sammenhæng der kunne skjule sig bag mine metoder. Desværre var mit kendskab til matematik for ringe til, at jeg rigtig kunne følge dem. Men diskussionen efterlod dog hos mig en stærk følelse af, at dele af et stort net af omfattende sammenhænge her var kommet for dagen. Senere på eftermiddagen spillede vi boccia; vi delte os i to partier, og da Harald Bohr og Hardy var lidenskabelige sportsmænd, blev der kæmpet bittert fra begge sider. Alene Besikovitch, der åbenbart var fuldkommen uerfaren, havde desværre kun ringe succes. Spillet endte på en meget usædvanlig måde. Niels Bohrs parti var nogle points bagud, men havde det sidste kast, som Besikovitch skulle udføre. Klar over situationens håbløshed kastede Besikovitch kuglen baglæns over sin skulder ind i spillefeltet. Til hans forbløffelse ramte kuglen nøjagtig på det rigtige sted og afgjorde under almindelig jubel partiet til hans fordel. Jeg mindedes Bohrs bemærkning på landevejen ved Gilleleje uden dog at filosofere nærmere derover. På hjemrejsen i toget til København forelagde Hardy mig »som øvelse« et matematisk problem, nemlig teorien for et kinesisk spil, der lige var blevet nøjagtigt udarbejdet. Jeg bestræbte mig med yderste anstrengelse på at løse problemet, indtil







En af de årlige kongresser på Institutet med deltagelse af gamle medarbejdere. På første række sidder fra venstre: Klein, Bohr, Heisenberg, Pauli, Gamow, Landau, Kramers



Niels Bohr i diskussion på Institutets frokoststue med to af sine nærmeste medarbejdere, Werner Heisenberg og Wolfgang Pauli, der begge spillede en fremtrædende rolle ved kvantefysikkens udvikling

Harald pludselig bebrejdende sagde til Hardy: »Du skulle ikke misbruge et ungt menneskes matematiske kraft til den slags løjer.« På dette tidspunkt havde jeg kun fundet ud af en del af teorien og fremstillede den for Hardy. Han svarede blot tørt: »Nå ja, i det mindste for brintatomet vil den nye atomteori nok være rigtig.«

I vintersemestret 1925–26 måtte jeg opfylde mine undervisningspligter i Göttingen. Desuden arbejdede jeg sammen med Born og Jordan på den matematiske udformning af kvantemekanikken. Born og Jordan havde opnået afgørende fremskridt i den matematiske analyse af den nye mekanik, og uafhængigt af dem havde også Dirac i Cambridge taget fat på disse problemer og var i det væsentlige kommet til samme resultat som Born og Jordan. Således var vi i hele vintersemestret fuldt beskæftiget med at åbne adgang til det indvundne, nye matematiske land og gøre det farbart. Da Kramers i mellemtiden havde taget imod et professorat i sit hjemland Holland, tilbød Bohr mig den stilling som lektor i teoretisk fysik ved Københavns Universitet, som Kramers havde haft. Fra påsken 1926 kunne jeg således igen helt tage del i arbejdet i København, hvor de daglige samtaler med Bohr ligesom tidligere udgjorde den vigtigste del af mit videnskabelige liv. På mange steder arbejdede man nu på atomteorien. De tanker, som de Broglie i 1924 havde fremsat om dualismen mellem bølge- og partikelforestilling, var blevet grebet af Schrödinger og videreudviklet til den såkaldte bølgemekanik. Schrödingers første arbejder var på det tidspunkt (påsken 1926) netop udkommet, men snart hørte vi, at det sandsynligvis var lykkedes Schrödinger at bevise den matematiske ækvivalens mellem hans bølgemekanik og den nyudviklede kvantemekanik. Dette fremskridt stod nu i centrum af vore diskussioner i København. Schrödingers undersøgelser forekom af to grunde Bohr meget betydningsfulde. På den ene side styrkede de tilliden til rigtigheden i den matematiske formalisme, som man nu med samme ret kunne kalde kvantemekanik og bølgemekanik. På den anden side opstod det spørgsmål, om man ikke for at opnå en anskuelig fortolkning af denne formalisme måtte søge helt andre veje, end man tidligere havde tænkt sig i københavnerkredsen. Bohr erkendte straks, at her måtte afgørelsen falde om de grundlæggende problemer, som han egentlig uaf-ladelig siden 1913 havde kæmpet med, og han koncentrerede nu sin hele tankekraft om, i lyset af den nyvundne erkendelse, kritisk at prøve de argumenter, der havde ført ham til begreber som stationær tilstand og kvantespri-  
ng. Fortolkningen af kvantemekanikken blev altså fra nu af vort vig-



tigste samtaleemne. Jeg selv var egentlig ikke parat til at indrømme Schrödingers teoris indflydelse på tydningen af kvanteteorien. Jeg betragtede den snarere som et overordentlig værdifuldt værktøj til at løse kvantemekanikkens matematiske problemer, men ikke som andet. Bohr syntes derimod tilbøjelig til allerede i teoriens grundforudsætninger at optage dualismen mellem bølge og partikel.

Det var i overensstemmelse med denne indstilling, at jeg nu først og fremmest var optaget af kvantemekanikkens praktiske anvendelse på heliumspektret. Derved spillede også de smukke målinger, som Foster havde foretaget af Stark-effekten i heliumspektret en vigtig rolle. Foster fra Canada var for et stykke tid kommet til København for at sammenligne sine målinger med den nye teori. Diskussionerne foregik for det meste i fru Maars sommerhus, der lå højt på en skrænt i Ålsgårde ved Helsingør. På havebænkene mellem rosenbedene, hvorfra vi så ofte havde spejdet ud over sundet efter bjergene på den svenske kyst, blev forstørrelserne af Fosters spektraloptagelser bredt ud, og de målte liniebilleder blev sammenlignet med teoriens resultater. Overensstemmelsen var fuldkommen, og vi glædede os over at se, hvor mange af de mest komplicerede og tilsyneladende ganske uoverskuelige enkeltheder, der så at sige af sig selv kom ud af kvantemekanikkens formler. Også Bohr glædede sig over, at Stark-effekten endnu engang, ligesom ti år tidligere ved brintatomet, gav en af de smukkeste bekræftelser på, at man var på den rette vej til at forstå atomerne. Ofte diskuterede jeg også med Bohr heliumspektrrets almindelige teori, som jeg havde angrebet ved fri benyttelse af såvel Schrödinger som Göttinger-metoden. Det var for os begge en dyb tilfredsstillelse, at eksistensen af begge spektre, ortohelium og parahelium, nu kunne udledes af almindelige principper, og dette forholds forbindelse med »Pauli-princippet« åbnede vejen for den endelige forståelse af grundstoffernes periodiske system. I juni rejste jeg med det kun halvfærdige arbejde til Norge, blev otte dage i Lillehammer ved Mjøsasøen for at fuldende manuskriptet og vandrede derefter alene med manuskriptet i rygsækken fra Gudbrandsdalen gennem Jotunheimens bjerge til Sognefjorden, hvorfra jeg med skib og jernbane igen vendte tilbage til København. Bohr var tilfreds med afhandlingen, som derefter kunne sendes til trykning.

I juli besøgte jeg mine forældre i München, og ved denne lejlighed hørte jeg et foredrag, som Schrödinger holdt for fysikerne i München om sine arbejder over bølgemekanik. Således blev jeg for første gang kendt med den

fortolkning, som Schrödinger ville give sin matematiske formalisme, bølgemeknikken, og jeg var helt fortvivlet over den begrebsforvirring, som dermed efter min opfattelse blev bragt ind i atomteorien. Desværre fik jeg intet ud af mit forsøg på under diskussionen igen at bringe orden i begreberne. Mit argument, at man med Schrödingers fortolkning jo ikke engang kunne forstå Plancks strålingslov, overbeviste ingen, og Wilhelm Wien, der var professor i eksperimentel fysik ved Münchens universitet, svarede temmelig skarpt, at det nu virkelig måtte have en ende med kvantespring og den hele atommystik, og at de vanskeligheder, som jeg talte om, sikkert snart ville blive løst af Schrödinger. Om jeg skrev til Bohr om denne hændelse i München, husker jeg ikke mere. I hvert fald indbød Bohr kort derefter Schrödinger til København og bad ham ikke alene om at holde foredrag om sin bølgemekanik, men også om at opholde sig så længe i København, at der kunne blive tilstrækkelig tid til at diskutere kvanteteoriens fortolkning.

Disse diskussioner, der, så vidt jeg husker, fandt sted i København engang i september 1926, har hos mig efterladt det allerstærkeste indtryk især af Bohrs personlighed. Thi skønt Bohr ganske vist var et ualmindelig hensynsfuldt og imødekommende menneske, så kunne han dog i en sådan diskussion, hvor det drejede sig om de for ham vigtigste erkendelsesproblemer, med fanatisme og med en næsten skrækindjagende ubønhørighed insistere på den ubetingede klarhed i alle argumenter. Han gav ikke op, end ikke efter timers kamp, før Schrödinger måtte indrømme, at hans tydning ikke slog til, ikke engang til at forklare Plancks lov. Ethvert forsøg fra Schrödingers side på at komme uden om dette bitre resultat blev i uendelig møjsommelige samtaler langsomt punkt for punkt imødegået. Måske har det været en slags overanstrengelse, der gjorde, at Schrödinger efter nogle dages forløb blev syg og måtte ligge i sengen som gæst i Bohrs hjem. Men selv her veg Bohr næppe fra Schrödingers seng og bestandig lød sætningen: »Men Schrödinger, De må dog indrømme, at . . .« Engang udbrød Schrödinger næsten fortvivlet: »Når det dog skal blive ved dette fordømte kvantespringeri, så beklager jeg, at jeg nogensinde har givet mig af med atomteori.« Bohr svarede dertil: »Men vi andre er Dem så taknemmelig for, at De har gjort det og dermed bragt atomteorien et afgørende skridt videre.« Schrödinger rejste til slut lidt modløs fra København, medens vi på Bohrs Institut havde følelsen af, at i hvert fald Schrödingers fortolkning af kvanteteorien, en fortolkning, der lidt for letsindigt var opstillet med de klassiske



teorier som model, nu var gendrevet, men at der endnu manglede nogle vigtige synspunkter, før man var nået til en fuld forståelse af kvanteteorien.

Samtalerne mellem Bohr og hans medarbejdere i København koncentrerede sig fra nu af stadigt mere om det centrale spørgsmål i kvanteteorien: hvorledes den matematiske formalisme i de enkelte tilfælde skulle anvendes på de eksperimentelle begivenheder og dermed, hvorledes de ofte diskuterede paradokser, som for eksempel den tilsyneladende modstrid mellem bølgeforestilling og partikelforestilling, kunne opklares. Der blev udtænkt stadig nye tankeeksperimenter, hvor paradokserne trådte særlig skarpt frem, og vi forsøgte at gætte, hvilket svar naturen sandsynligvis ville give i et sådant eksperiment. Under disse bestræbelser satte Bohr og jeg ind i noget forskellige retninger. Allerede to år tidligere havde Bohr i samarbejde med Kramers og Slater udgivet en afhandling, hvori han forsøgte at tage dualismen mellem bølge- og partikelforestilling som udgangspunkt for tydnin-gen af kvanteteorien. Bølgerne skulle tydes som et sandsynlighedsfelt, hvorved man rigtignok blev tvunget til at opgive sætningen om energiens bevarelse for de individuelle processer. Siden havde Bothe og Geiger imidlertid eftervist energisætningen gyldighed også for de individuelle processer. Alligevel følte Bohr med rette den tilsyneladende dualisme som et så centralt fænomen, at den forekom ham at være det naturlige udgangspunkt for fortolkningen. Selv satte jeg min lid til den nyudviklede matematiske formalisme. Da den fysiske fortolkning af visse størrelser allerede var fastlagt i kvantemekanikkens grundlæggende antagelser, tænkte jeg mig, at man simpelthen ved en konsekvent videreudvikling af disse antagelser tvangfrit ville nå til den rigtige generelle fortolkning, at man altså ikke skulle stille sig i yderligere gæld til anskuelige forestillinger. Takket være denne forskel i synspunkter blev de genstridige problemer belyst og undersøgt fra alle sider, men paradokserne lod sig dog ikke så let rydde af vejen.

Jeg boede dengang i tagetagen i Institutet på Blegdamsvej, og Bohr kom ofte op på mit værelse sent om aftenen for at tale med mig om de vanskeligheder i kvanteteorien, der pinte os begge. På den ene side havde vi den følelse, at løsningen lå snublende nær, da man jo besad en åbenbart modsigelsesfri matematisk beskrivelse, på den anden side stod det os slet ikke klart, hvorledes man med denne matematik skulle beskrive selv de simpleste eksperimentelle situationer som f. eks. en elektrons bane i et tågekammer. I kvantemekanikken var man jo netop gået ud fra, at der slet ikke fandtes sådanne elektronbaner, og med bølgemeknikken kunne man ikke forstå,

hvorfor en nogenlunde lokaliseret bølgeproces, noget i retning af en bølgepakke, ikke efter kort tid ville sprede sig ud igen.

På denne tid udviklede Dirac og Jordan transformationsteorien, til hvilken Born og Jordan ved tidligere undersøgelser allerede havde ydet vigtige forarbejder og også denne fuldstændiggørelse af den matematiske formalisme bekræftede for os, at der vel ikke var mere at ændre ved kvanteteorien formelle bygning, at det nu kun kom an på at udtrykke forbindelsen mellem matematikken og eksperimenterne på en modsigelsesfri måde. Men hvorledes dette skulle ske, forblev som før dunkelt. Således varede vore aftenlige diskussioner ikke sjældent til over midnat, og vi skiltes i reglen noget utilfredse, fordi forskellen i de retninger, hvori vi søgte løsningen, ofte syntes at gøre opklaringen vanskeligere. Efter en af disse sene samtaler gik jeg endnu dybt forurolet ned i Fælledparken, der ligger bag Instituttet, for ved en spadseretur i den friske luft at falde lidt til ro, inden jeg gik i seng. På denne vandring under den natlige stjernehimmel, kom jeg på den nærliggende tanke, at man dog måske simpelthen skulle postulere, at naturen kun tillod forekomsten af sådanne eksperimentelle situationer, der lod sig beskrive inden for den kvantemekaniske formalisme. Det ville åbenbart betyde, at man ud fra den matematiske formalisme kunne slutte, at man ikke samtidigt kunne kende en partikels sted og dens hastighed. Der var foreløbig ingen lejlighed til at tale nøjere med Bohr om denne mulighed, da han netop i de dage (slutningen af februar 1927) rejste på skiferie til Norge. Sandsynligvis var Bohr også glad for i nogle uger at kunne hengive sig fuldstændig uforstyrret til sine egne tanker om fortolkningen af kvanteteorien.

Efterladt alene i København kunne også jeg give mine tanker friere løb og besluttede at gøre den nævnte ubestemthedsrelation til fortolkningens centrale punkt. Ved at huske på en samtale, som jeg for lang tid siden havde haft i Göttingen med en studiekammerat, faldt den tanke mig ind at undersøge mulighederne for stedsbestemmelse ved hjælp af et  $\gamma$ -stråle-mikroskop, og på den måde fremstod der snart en tydning af kvanteteorien, der forekom mig at være sammenhængende og modsigelsesfri. Jeg skrev derefter et langt brev til Pauli, så at sige et udkast til en afhandling, og Paulis svar var udtalt positivt og opmuntrende. Da Bohr kom tilbage fra Norge, kunne jeg allerede forelægge ham den første version af en afhandling sammen med brevet fra Pauli. I begyndelsen var Bohr temmelig utilfreds. Han gjorde mig opmærksom på, at nogle påstande i denne første version endnu var



forkert begrundet, og da han som altid med rette insisterede på ubønhørlig klarhed i alle enkeltheder, stødte disse punkter ham meget. Desuden havde han vel allerede i Norge levet sig ind i komplementaritetsbegrebet, der skulle gøre det muligt at tage dualismen mellem bølge- og partikelbillede til udgangspunkt for fortolkningen. Dette komplementaritetsbegreb passede nøje til den filosofiske grundindstilling, som han egentlig altid havde haft, og hvori begrænsningen i vore udtryksmidler indgik som et centralt filosofisk problem. Det stødte ham derfor, at jeg ikke gik ud fra dualismen mellem bølger og partikler. Efter nogle ugers diskussion, der ikke forløb helt uden spændinger, erkendte vi imidlertid snart, ikke mindst takket være Oskar Kleins medvirken, at vi i grunden mente det samme, og at ubestemthedsrelationerne blot var et specialtilfælde af det almindelige komplementaritetsforhold. Jeg sendte altså min forbedrede afhandling til trykning, og Bohr forberedte en udførlig publikation om komplementaritetsbegrebet.

Hvor nøje fortolkningen ved komplementaritetsbegrebet stemte overens med Bohrs gamle filosofiske ideer, blev mig især klart ved en episode, som, hvis jeg husker ret, fandt sted på en sejltur fra København til Svendborg på Fyn. Bohr ejede dengang sammen med en kollega og ven en sejlbåd, hvis kaptajn var den dygtige og som menneske meget indtagende kemiker Bjerrum. Den fremragende kirurg Chievitz sørgede for morskaben selv i stormfuldt vejr, og de andre venner bidrog hver på sin måde til denne lykkelige og ubesværede tilværelse. Bohr var opfyldt af den nye fortolkning af kvanteteorien, og da båden uden megen hjælp fra vor side i solskin og for fulde sejl førte os mod syd, var der rig lejlighed til at fortælle om denne videnskabelige begivenhed og til filosofiske betragtninger over atomteoriens væsen. Bohr begyndte at tale om vanskelighederne ved sproget, om alle vore udtryksmidlers begrænsning, som man fra første færd må tage med i købet, hvis man overhovedet vil drive videnskab, og han forklarede, hvor tilfredsstillende det var, at denne begrænsning allerede var kommet til udtryk i atomteoriens grundlag på en matematisk gennemskuelig måde. Til slut bemærkede en af vennerne tørt: »Men Niels, det er dog virkelig ikke nyt, det har du allerede fortalt os nøjagtigt sådan for ti år siden.«

Solvay-konferencen i Brüssel i efteråret 1927 dannede afslutningen på denne eventyrlige epoke i atomteoriens historie. Her samledes Planck, Einstein, Lorentz, Bohr, de Broglie, Born og Schrödinger, og fra den yngre generation Kramers, Pauli og Dirac, og diskussionen tilspidsedes snart til

en duel mellem Einstein og Bohr angående spørgsmålet om, hvorvidt kvanteteorien i dens nuværende form ville kunne betragtes som en endelig løsning af de gennem flere årtier diskuterede vanskeligheder. Vi mødtes for det meste allerede ved morgenbordet på hotellet, og Einstein begyndte så at beskrive et tankeeksperiment, hvorved efter hans mening den indre modstrid i københavner-interpretationen tydeligt trådte frem. Einstein, Bohr og jeg gik så sammen fra hotellet til kongresbygningen, og jeg lyttede til den livlige diskussion mellem de to mennesker, der adskilte sig så dybt i deres filosofiske indstilling, og indflettede af og til en bemærkning om strukturen af den matematiske formalisme. Under mødet og især i pauserne forsøgte vi yngre, især Pauli og jeg, at analysere Einsteins eksperiment, og ved middagstid fortsattes diskussionerne mellem Bohr og de andre københavnere. For det meste havde Bohr den fuldstændige analyse af tankeeksperimentet færdigt sent på eftermiddagen og viste den til Einstein ved aftensbordet. Rent sagligt kunne Einstein ganske vist ikke indvende noget mod analysen, men i sit hjerte var han ikke overbevist. Bohrs hollandske ven Ehrenfest, der også var en så nær ven af Einstein, sagde til ham: »Jeg skammer mig over dig, Einstein. Du stiller dig her ganske på samme måde som modstanderne af relativitetsteorien med deres forgæves forsøg på at tilbagevise din relativitetsteori.« Disse diskussioner fortsattes endda ved det næste Solvay-møde i 1930, og det var sandsynligvis ved den lejlighed, at Einstein ved morgenmaden foreslog det berømte eksperiment (der er diskuteret i Bohrs artikel til Einsteins 70 års fødselsdag), hvori lyskvantets farve søges bestemt ved vejning af lyskilden før og efter kvantets udsendelse. Da tyngdekraften her var bragt ind i billedet, måtte man inddrage gravitationsteorien, altså den almene relativitetsteori, i analysen. Det var en særlig triumf, at Bohr om aftenen netop ved benyttelse af Einsteins formler fra den almene relativitetsteori kunne vise, at ubestemthedsrelationerne holder stik også i dette eksperiment, og at Einsteins indvendinger altså var uberettigede. Dermed syntes også københavner-fortolkningen af kvanteteorien fra nu af at stå fast.

Sent på efteråret 1927 måtte jeg forlade København, da jeg havde taget imod et professorat ved universitetet i Leipzig. Jeg vendte dog næsten hvert år tilbage til København i nogle uger og talte med Bohr om de problemer, der optog os begge, men det snævre samarbejdes tid, der havde være fyldt til randen med spændende, videnskabelige fremskridt, og hvor jeg lærte så uendelig meget af Bohr, var dermed desværre forbi.