

Kvantemekanikkens oprindelse (1925–1927)

Christian Joas, Niels Bohr Arkivet og Institut for Naturfagenes Didaktik, Københavns Universitet

Ved udgangen af 1927 så fysikernes verden anderledes ud end i begyndelsen af 1925: Kvantemekanikken var trådt ind på scenen, og den var kommet for at blive. Hvad der skete i denne varme fase af kvantemekanikkens oprindelse, er et af de mest fascinerende emner for videnskabshistorikere. Denne korte artikel fortæller historien om den tidlige kvantemekanik og om vores forsøg på at forstå, hvordan en af de mest indflydelsesrige forandringer i fysikernes opfattelse af verden kom til at ske.¹

Niels Bohrs Como-forelæsning i september 1927 kan betragtes som kulminationen på en hurtig udvikling, der var begyndt blot to år tidligere i juli 1925 med Werner Heisenbergs berømte *Umdeutung*-afhandling (tysk for "omfortolkning"): Oprindelsen til kvantemekanikken, som vi stadig bruger den i dag. Bohrs forelæsning, der blev offentliggjort i to af datidens førende videnskabelige tidsskrifter, *Naturwissenschaften* og *Nature*, kan også ses som den første fremstilling af hans komplementaritetsfortolkning, som siden 1950'erne ofte er blevet omtalt som "Københavnfortolkningen". En måned efter at Bohr havde holdt sin forelæsning ved Comosøen i Italien, skulle han holde det samme foredrag igen på det femte Solvay-møde i Bruxelles – et møde, der er berømt for de ophedede meningsudvekslinger mellem de to venner Albert Einstein og Bohr om kvantemekanikkens fortolkning.



Figur 1. Niels Bohr i 1927, sandsynligvis ved Comosøen. Alle billeder er fra Niels Bohr Arkivet, undtagen figur 9.

For videnskabshistorikere er denne "varme fase" af kvantemekanikkens oprindelse fra 1925–1927 en yderst interessant periode, ikke mindst fordi kvantemekanikken, i modsætning til andre berømte begrebsskift i fysik, ikke var et enkelt menneskes værk, men et resultat af mange forskellige forskeres arbejde i flere forskellige lande. Dette gør kvantemekanikkens oprindelse meget anderledes end fx den generelle relativitetsteoris oprindelse.

At mange aktører var involveret, undertiden i hektisk konkurrence, gør rekonstruktionen af begivenhederne til en sand detektivopgave, som mange videnskabshistorikere har bidraget til på grundlag af offentliggjorte og ikke-offentliggjorte historiske kilder [1-6]. Blandt disse kilder er især den overleverede korrespondance mellem mange af aktørerne, som i høj grad er bevaret takket være et tidligt forskningsprojekt om kvantefysikkens historie, som blev ledet af Thomas S. Kuhn i kontorlokaler, som Bohr selv havde stillet til rådighed på Gl. Carlsberg lige før sin død. En stor del af denne korrespondance, samt de omfattende mikrofilm fra projektet, findes på Niels Bohr Arkivet.



Figur 2. Arnold Sommerfeld og Niels Bohr i Lund i 1919.

Der er sket meget i de seneste årtier med vores forståelse af kvantemekanikkens tilblivelse baseret på dette væld af historiske kilder [7]. Denne lille artikel er en kort gennemgang ikke blot af selve kvantemekanikkens tilblivelse, men også af den nyere historiske forskning om den.

Den gamle kvanteteori og dens krise

Max Plancks introduktion af kvantehypotesen i 1900 i forbindelse med hans forsøg på at forklare sortlegemestråling samt Einsteins lyskvantehypotese fra 1905 – som af de fleste fysikere langt op i 1920'erne blev anset for at være en ukarakteristisk fejlslutning fra en ellers stor tænker – markerer virkningskvantets indtog i fysikken. Fysikerne begyndte først at tale om "kvanteteori" i tiden omkring den første Solvaykonference

¹Tak til Signe Strecker, Anja Skaar Jacobsen og Finn Aaserud for korrekturlæsning af artiklen.

i Bruxelles i 1911, og i stigende grad efter succesen med Niels Bohrs atommodel fra 1913, der forklarede brintatomets spektrum gennem en kvantebetingelse.

Denne såkaldte “gamle” kvanteteori var fuld af spektakulære succeser, især i den form, som den fik af “kvantepaven” Arnold Sommerfeld fra München i 1916, og gennem dens forbindelse med Hamilton-Jacobi-teorien, da Karl Schwarzschild og Paul Epstein uafhængigt af hinanden i 1916 indførte vinkel- og virkningsvariable, der oprindeligt blev udviklet i forbindelse med himmelmeknikken. Dette førte til forklaringen på Starkeffekten, en stor succes for den gamle kvanteteori. Det åbnede også for, at man i den gamle kvanteteori kunne anvende de kraftfulde metoder fra perturbationsteorien, hvilket Bohr i København måske som den første forstod fuldt ud i 1918. Brugen af de sofistikerede metoder i Hamilton-Jacobi-meknikken til at fremme kvanteteorien blev en fast bestanddel af Max Borns og hans kollegers arbejde i Göttingen i begyndelsen af 1920'erne. Det er ikke tilfældigt, at tre byer er nævnt i dette afsnit. Den gamle kvanteteori udviklede sig i vid udstrækning i en løbende udveksling mellem primært tre centre eller skoler: Sommerfelds skole i München, Bohrs skole på Niels Bohr Institutet i København og Borns skole i Göttingen.



Figur 3. Universitetets Institut for Teoretisk Fysik – i dag og siden 1965 kaldt Niels Bohr Institutet efter dets grundlægger Niels Bohr – i 1926.

Men den gamle kvanteteori var samtidig fuld af gåder og spektakulære fiaskoer [6]. Selv heliums spektrum kunne ikke forklares inden for rammerne af den gamle kvanteteori, skønt helium med sine to elektroner er det næstsimpleste atom efter brint. Mange andre problemer plagede den gamle kvanteteori, fx den anomale Zeemaneffekt, og teoriens logiske opbygning var utilfredsstillende, fordi den lappede den klassiske mekanik sammen med stort set *ad hoc* kvantebetingelser. Bohrs gentagne forsøg på at lave en opskrift til dette formål – hans berømte korrespondensprincip, der allerede var antydnet i tidligere værker og først blev formuleret eksplicit i 1918 – førte til mange nye indsigter, men ikke til en løsning på de uløselige problemer, i hvert fald ikke før 1925.

Problemerne og uoverensstemmelserne blev mere og mere forvirrende i årene op til 1925 – en fase, der

ofte kaldes den gamle kvanteteoris krise efter Kuhns klassiker *The Structure of Scientific Revolutions* fra 1962 [8]. I årene op til 1925 søgte aktørerne selv i stigende grad en kur mod den gamle kvanteteoris problemer i det, de kaldte en “skærpelse” af Bohrs korrespondensprincip: I stedet for på magisk vis at passe i nogle tilfælde og uforklarligt fejle i andre, skulle Bohrs opskrift omdannes til en veritabel kørselv-opskrift, der virkede uanset hvad, og som ville vise den rette vej fra den klassiske mekanik til en ægte “kvantemekanik”.



Figur 4. Carl Wilhelm Oseen, Niels Bohr, James Franck, Oskar Klein og Max Born (siddende) ved “Bohr-Festspiele” i Göttingen i 1922. Her mødtes Niels Bohr og den unge Werner Heisenberg for første gang.

Matrixmeknikken

Der blev gjort mange forsøg på at finde et sådant skærpet korrespondensprincip, og til sidst lykkedes det på ret usandsynlig vis: Ved at genfortolke de dynamiske størrelser i den klassiske mekaniks bevægelsesligninger – sted og impuls – i form af eksperimentelt observerbare størrelser – frekvenser og amplituder (sandsynligheder) for atomovergange – lykkedes det Heisenberg at løse knuden i den gamle kvanteteori.

Heisenberg hentede i sine unge dage erfaringer fra alle de tre store centre inden for den gamle kvanteteori: Fra 1920–1923 havde han været hos Sommerfeld i München, derefter blev han Borns assistent i Göttingen, hvor han allerede i 1922 havde mødt Niels Bohr for første gang, da sidstnævnte besøgte Göttingen i forbindelse med de såkaldte “Bohr-Festspiele”. I foråret 1924 besøgte Heisenberg Bohr i København og kom derefter tilbage på et længere ophold fra september 1924 til maj 1925. Ifølge Carl-Friedrich von Weizsäcker reflekterede Heisenberg engang over sin uddannelse på følgende måde: “Hos Sommerfeld lærte jeg optimisme, hos Göttingen-folkene matematik og hos Bohr fysik” [9].

I juli 1925, efter et efterhånden berømt ophold på Helgoland for at kurere et slemt høfeberanfald,

fremlagde Heisenberg sin *Umdeutung*-afhandling, som markerer begyndelsen på kvantemekanikken. Det var ikke Heisenberg, men Born og Pascual Jordan – begge uddannede inden for den matematisk-fysiske tradition fra Göttingen, der stammer fra Felix Klein og David Hilbert –, som kort efter indså, at det, Heisenberg havde fundet på, var en matrixalgebra for uendelige matricer. Heraf kommer også navnet på Heisenbergs nye kvantemekanik: matrixmekanikken.



Figur 5. Heisenbergs første besøg i København i foråret 1924 (Werner Heisenberg, Niels Bohr og Margrethe Bohr med Bohr-børnene Christian, Erik, Hans og Aage).

Hvordan nåede Heisenberg frem til sin kvantemekanik? Han fik det selv til at fremstå, som om det var positivisme à la Mach og Einstein, der havde gjort arbejdet – dvs. en modvilje mod at lade størrelser eller begreber, der i princippet ikke kunne observeres, indgå i en fysisk teori. Som bl.a. videnskabshistorikeren og videnskabsfilosoffen Mara Beller har vist, var det ikke nødvendigvis Heisenbergs positivistisk tænkemåde, der havde ført ham til *Umdeutung*, men snarere, at det forekom ham at være den bedste måde at præsentere sine resultater på [5].

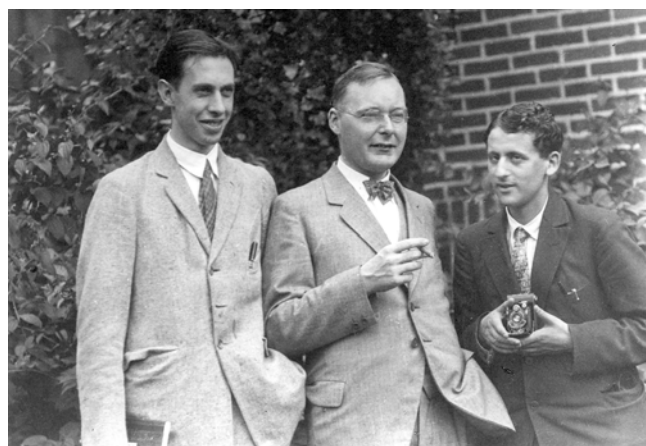
Hvordan nåede Heisenberg så dertil? Fysikhistorikere har undersøgt mange forskellige plausible ruter og er enige om ét væsentligt punkt, nemlig at det var Heisenbergs samarbejde med Kramers, Bohrs mangeårige assistent, om optisk dispersion, som bragte ham på rette spor og i sidste ende motiverede ham til at gå i gang med et forskningsprogram, der endeligt skulle gøre Bohrs korrespondensprincip skarpere [3, 10, 11].

Bohr, Kramers og John Slater havde i maj 1924 offentliggjort deres eget, kortlivede forsøg på en sådan skærpelse, den såkaldte BKS-afhandling, som efter en kort periode med ophedet debat (Pauli fordømte den som et “revolutionært kup”) hurtigt var blevet modtaget af Walther Bothes og Hans Geigers koincidensmålinger i juni 1924. I BKS-afhandlingen havde de tre mænd introduceret begrebet virtuelle oscillatorer, der mindede om Rudolf Ladenburgs tidligere idéer. Elektronbanerne i et Bohr-atom skulle erstattes af et ensemble af oscillatorer, hvis frekvenser svarede til frekvenserne for alle mulige optiske overgange i atomet.

Dette “orkester af virtuelle oscillatorer” (Alfred Landé) var et stort skridt fremad og spillede en afgørende rolle i Kramers’ og Heisenbergs arbejde med

optisk dispersion, som var grundlægget for Heisenbergs arbejde med kvantemekanikken. Den udgjorde den begrebsmæssige kim til de uendelige matricer, der skulle optræde i *Umdeutung*-afhandlingen og skulle erstatte de dynamiske variabler i den klassiske mekanik.

Heisenbergs artikel er notorisk vanskelig at læse for én, der er vant til moderne kvantemekanik, da forbindelsen ikke umiddelbart er tydelig. I stedet for at anvende sine idéer på brintatomet, valgte Heisenberg at studere den anharmoniske oscillator, da det gav ham mulighed for nemmest at komme til en forståelse af den situation, han befandt sig i. Efter at have omfortolket den klassiske mekaniks kinematik ved at erstatte dynamiske variabler som position $x(t)$ med en Fourierrække, der indeholdt amplituder og frekvenser af alle mulige overgange fra et givet atomniveau n , søgte han at forstå, hvordan man kunne komme frem til størrelser som $x^2(t)$ eller også $x^3(t)$. Det var her, han stødte på både to forskellige dynamiske variabelers ikke-kommutativitet og de udtryk, som Born og Jordan genkendte som værende regler for matrixmultiplikation.

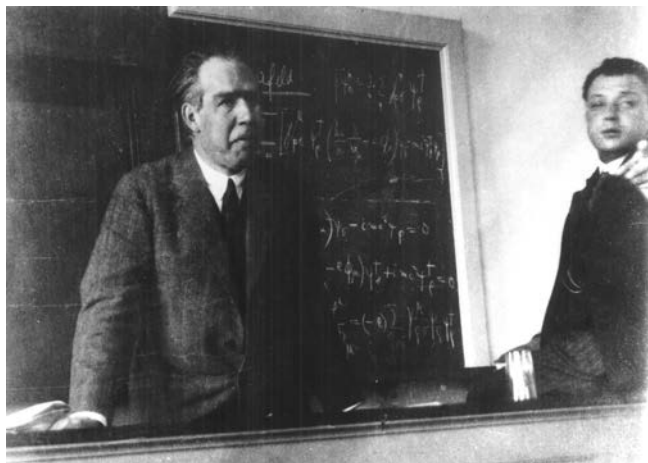


Figur 6. Hendrik Kramers og opdagere af spin, George Uhlenbeck (tv) og Samuel Goudsmit (th), i Ann Arbor, ca. 1928.

Born og Jordan indsendte deres afhandling i september 1925. Den udgjorde en første systematisering af Heisenbergs nye tilgang og introducerede matricer samt de nu velkendte kanoniske kommutationsrelationer mellem sted og impuls. Den er langt mere tilgængelig for moderne læsere, og det samme gælder den skelsættende “tremandsafhandling” om kvantemekanik, der blev fremlagt i november 1925 af Born, Heisenberg og Jordan, og som afsluttede den formelle udvikling af matrixmekanikken.

Andre bidrog også. Allerede i oktober var det lykkedes Pauli at udlede brintspektret ved hjælp af matrixmekanikken, hvilket var et stærkt argument til fordel for den nye formalisme. Også Paul Dirac i Cambridge, som havde fået en kopi af korrektoren på Heisenbergs *Umdeutung*-afhandling, bidrog tidligt og kom – uafhængigt af Born og Jordan, men kort efter dem – frem til kommutationsrelationerne ved at udnytte deres forbindelse til Poissonparenteserne i den klassiske mekanik [12]. Det lykkedes også Dirac at udlede brintspektret, og han kom her igen ind på en tæt andenplads, denne gang efter Pauli. Matrixmekanikken

havde således haft succes med at forklare brintspektret lige på det tidspunkt, hvor en helt anden beskrivelse af det samme fænomen kom på banen: Schrödingers bølgemekanik.



Figur 7. Niels Bohr og Wolfgang Pauli i Auditorium A på Bohrs institut i København i 1929.

Bølgemekanikken

I slutningen af 1925 og begyndelsen af 1926 udarbejdede Erwin Schrödinger det, man kunne kalde hans egen version af et skærpet korrespondensprincip: bølgemekanikken. I hurtig rækkefølge i første halvdel af 1926 indsendte han fire artikler til *Annalen der Physik*. I et brev til Pauli fra februar 1926 bemærkede Sommerfeld: "Schrödinger synes at finde præcis de samme resultater, som Heisenberg og dig, men på en helt anden, helt vanvittig måde: ingen matrixalgebra, men grænseværdiproblemer."

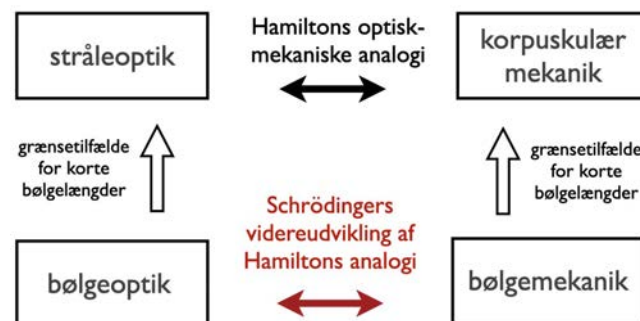
Schrödinger var knap to år yngre end Bohr og havde studeret fysik i Wien hos Boltzmanns efterfølger, Friedrich Hasenöhl. Schrödinger, der var velbevandret inden for mange forskellige områder af fysikken, havde fulgt udviklingen inden for den gamle kvanteteori og havde omkring 1920, stort set uden at offentliggøre noget, iværksat et ambitiøst og i sidste ende mislykket forskningsprogram, der havde til formål at generalisere den klassiske mekanik i lyset af både Einsteins generelle relativitetsteori og kvanteteorien.

I 1925 var Schrödinger stærkt optaget af gasteori, især Einsteins nylige arbejde med kvantestatistikken for idealgasser, herunder den nye Bose-Einstein-statistik. Som én, der var skolet i Boltzmanns tradition, havde han svært ved at acceptere, at der pludselig skulle være brug for en anden statistik end Boltzmanns for mikropartikler. Gennem Einstein fik han kendskab til Louis de Broglies arbejde med stofbølger. Ved at benytte sig af de Broglies idéer opdagede Schrödinger, at den nye Bose-Einstein-statistik for partikler lige så godt kunne fortolkes som en klassisk Boltzmann-statistik for stofbølge-svingninger. For ham var dette en stærk indikation af, at alt stof kunne opfattes som bølger og ikke partikler.

I sin afhandling henviste de Broglie til en analogi mellem Fermats princip og Maupertuis' princip som et argument for stofbølger. Schrödinger erkendte, at

denne analogi var et udtryk for en analogi mellem optik og mekanik, der oprindeligt skyldtes William Rowan Hamilton i 1830'erne: Både (stråle)optik og mekanik er underlagt det samme variationsprincip med hensyn til en særlig karakteristisk funktion, der er relateret til henholdsvis udbredelsestiden og virkningen. Indtil midten af 1920'erne og Schrödingers arbejde med bølgemekanikken havde denne nu velkendte analogi ikke været meget mere end en matematisk ejendommelighed.

Som det fremgår af hans upublicerede notesbøger, udnyttede Schrödinger Hamiltons analogi, og forsøgte at indføre en relativistisk bølgeligning til at beskrive de Broglies stofbølger (i dag kendt som Klein-Gordon-ligningen). Han indså, at kvantiseringsbetingelserne i den gamle kvanteteori i princippet kunne forklares som et egenværdiproblem i en partiel differentiaalligning. Men efter at have løst den resulterende bølgeligning for brintatomet uden at kunne genfinde Sommerfelds velkendte resultater for brintatomet, forkastede han dette første forsøg på en bølgeligning.



Figur 8. Erwin Schrödingers videreudvikling af William Rowan Hamiltons optisk-mekaniske analogi fra 1830'erne [9].

Frustreret over fiaskoen for hans ellers fascinerende idé forsøgte Schrödinger i begyndelsen af 1926 at formulere en ikke-relativistisk bølgeligning. Til hans overraskelse gav den ikke-relativistiske version de korrekte energiniveauer for brintatomet. At han offentliggjorde ikke én, men to forskellige udledninger af denne bølgeligning i sine to første artikler i *Annalen*, har i årtier undret både fysikere og historikere.

Grunden til, at der er tale om to forskellige udledninger, var en afgørende indsigt, som Schrödinger først fik efter at have sendt sin første artikel: I februar 1926 indså Schrödinger pludselig, at Hamiltons virkningsfunktion udelukkende beskriver hans bølgefronters fase (og ikke amplituden) [13]. Hvis amplituden varierer, fx i tilfælde af interferens, er bølgefunktionen ikke en simpel funktion af virkningen. Dette førte ham til en betydningsfuld erkendelse: Ligesom stråleoptik kun er et grænsetilfælde af en mere generel teori, bølgeoptik, kunne den klassiske korpuskulære mekanik have en underliggende, mere generel, teori, "bølgemekanikken".

Denne videreudvikling af Hamilton-analogien – som etablerede en fuldstændig korrespondens mellem optik og mekanik og ikke blot stråleoptik og korpuskulær mekanik – var det, Schrödinger havde været ude efter. Med hans egne ord: "Måske er vores klassiske mekanik den fulde analogi til stråleoptik, og som sådan

er den forkert og ikke i overensstemmelse med virkeligheden.” Den klassiske mekanik var således for Schrödinger kun et grænsetilfælde (for korte bølgelængder) af hans nye og mere generelle bølgemekanik. Den klassiske verdens korpuskulære struktur var intet andet end et epifænomen af verdens sande bølgestruktur.

Det var dette, der gjorde hans bølgemekanik til en meget speciel udgave af et skærpet korrespondensprincip, selv om det så meget anderledes ud end det, Heisenberg havde fundet frem til. Det forklarer også, hvorfor senere forsøg af fysikere fra Göttingen og København på at vende tilbage til en partikelontologi (som Borns sandsynlighedsfortolkning eller Heisenbergs ubestemthedsprincip) forekom Schrödinger absurde [13]. Tingene blev yderligere kompliceret af den erkendelse, at begge nye mekanikker, på trods af deres vidt forskellige intentioner, viste sig at være ækvivalente.



Figur 9. Paul Dirac og Werner Heisenberg ved den syvende Solvay konference i Bruxelles i 1933.

Ækvivalens

Hverken matrix- eller bølgemekanikken var fuldgældige teorier på det tidspunkt, hvor de oprindeligt blev formuleret, men foreløbige formalismer med oprindeligt snævre områder for succesfuld anvendelse. Allerede i marts 1926, lige efter Schrödingers anden artikel om bølgemekanikken, blev matrix- og bølgemekanikken anerkendt som ækvivalente på trods af de forskellige oprindelige motiver og ontologiske holdninger hos deres ophavsmænd og den stærke kontrast mellem de matematiske former, de antog (uendelig matrixalgebra versus differentialligninger).

Schrödingers, Eckarts og Paulis ækvivalensbeviser gjorde ikke opgaven med at finde en fortolkning af den nu tohovedede formalisme lettere. Tværtimod blev fortolkningen af kvantemekanikken i stigende grad en aktivitet, der havde til formål at fastslå den ene eller den anden formalismes epistemologiske overlegenhed – på trods af deres ækvivalens. Meget af det arbejde, som

Heisenberg og Schrödinger udførte i 1926–1927, og også meget af den tidlige fortolkningsdebat kan bedre forstås, når man har denne vinkel for øje.

En berømt episode i denne historie er Schrödingers besøg i København i begyndelsen af oktober 1926, hvor han mødte både Heisenberg og Bohr. Få dage inde i sit besøg blev Schrödinger forkølet og trak sig tilbage til sin seng, hvilket dog ikke forhindrede Bohr i at følge efter ham til hans værelse og fortsætte diskussionerne ved hans sengekant, hvilket dog var dømt til at mislykkes, fordi selv en udmattet Schrödinger ikke ville opgive den dybe indsigt, han havde opnået om stofs grundlæggende bølgenatur. Efter sin hjemkomst betegnede Schrödinger i sine håndskrevne private noter i stenografisk form Borns sandsynlighedsfortolkning som “det statistiske svineri fra Göttingen”.



Figur 10. Erwin Schrödinger foran bølger, ukendt år og sted. Tilladelse til brug givet af Ruth Braunizer(†), Alpbach i Tyrol, Østrig.

Fortolkning, udvidelse og anvendelse

Der skete mange flere ting i hurtig rækkefølge fra midten af 1926 og fremefter. Den vigtigste i sommeren 1926 var uden tvivl Borns allerede omtalte sandsynlighedsfortolkning, der blev udviklet som et biprodukt i forbindelse med hans forsøg på at anvende bølgemekanikken på aperiodiske fænomener (fx partikelspredning). Born identificerede kvadratmodulet i Schrödingers bølgefunktion som en sandsynlighedstæthed for position. I marts 1927 – angiveligt på et tidspunkt, hvor Bohr var blevet så træt af disse diskussioner, at han havde brug for en pause og tog på ferie i Norge – indsendte Heisenberg egenhændigt sin afhandling om ubestemthedsprincippet. Bohr, der ikke var begejstret for, at Heisenberg handlede på egenhånd, tvang Heisenberg til at medtage en note i korrektoren til hans artikel, og begyndte for alvor at arbejde på at redegøre for sin egen komplementaritetsfortolkning af kvantemekanik-

ken, som han præsenterede i Como i september samme år.

Men kvantemekanikkens fortolkning var ikke det eneste åbne spørgsmål for kvantefysikere efter midten af 1926. I hvert fald indtil efteråret 1927 så mange af aktørerne den nye mekanik i høj grad som et lovende, men i sidste ende åbent, projekt, som stadig manglede at demonstrere sin fulde almen gyldighed, og ikke som en teori, der nærmede sig sin afslutning. Fysikerne fortsatte derfor med at afprøve den nye mekaniks gyldighedsområde og udforske dens udvidelse i alle mulige retninger, idet de var fuldt ud klar over, eller endog håbede, at succesrige anvendelser kunne føre til en revision af kvantemekanikken eller til nye grundlæggende indsigter, der ville nødvendiggøre endnu en ny teoretisk ramme, der gik ud over kvantemekanikken: Relativitetsteori (som i Diracs arbejde fra 1927 om den relativistiske bølgeligning), aperiodiske fænomener (som i Borns arbejde) og det nye begreb elektronspinn krævede væsentlige udvidelser af formalismen.



Figur 11. Københavnerkonferencen i 1930 med bl.a. (fra venstre i første række) Oskar Klein, Niels Bohr, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli, George Gamow, Lev Landau og Hendrik Kramers. Dette billede tydeliggør den uformelle atmosfære på Bohrs institut. På bordet foran Heisenberg ligger en legetøjstrumpe til at give populære idéer en fanfare, mellem Pauli og Gamow står en kanon til at skyde upopulære idéer ned med, og foran Kramers står en legetøjstrømmeslager til at give applaus.

En udvidelse af kvantemekanikken til at omfatte mangelegemesystemer såsom komplekse atomer (begyndende med helium), molekyler, faste stoffer og kerner stod også meget højt på dagsordenen. En anden vigtig udvikling, der begyndte i midten af 1926, var Jordans og Diracs udarbejdelse af transformations-teorien, som lagde grunden til John von Neumanns senere Hilbertrum-aksiomatisering af kvantemekanikken. Endvidere stod det højt på dagsordenen at finde en kvanteelektrodynamik. Allerede i tremandsafhandlingen fra 1925 var Jordan begyndt at tænke over kvantiseringen af det elektromagnetiske felt, og mange teoretiske fysikere skulle komme til at bidrage til den videre udvikling af kvanteelektrodynamikken og kvantefeltteorien i de følgende årtier.

Den varme fase af kvantemekanikkens oprindelse var forbi i efteråret 1927, da der blev opnået enighed om

det, der senere blev kendt som Københavnerfortolkningen, blandt fysikerne i Göttingen og København (som bekendt uden Einstein og Schrödinger). Dette medførte en udbredt optimisme med hensyn til kvantemekanikkens anvendelse og videreudvikling. Det markerede også begyndelsen på et sandt "kvanteårhundrede", hvor teknologiske anvendelser af kvantemekanikken, bl.a. transistoren, laseren og ikke mindst atombomben, skulle forandre vores verden dybt på måder, som aktørerne i 1925–1927 ikke kunne have forudset [4].

Kvantehistoriografi

Selv om kvantemekanikkens oprindelse i dens varme fase fra 1925–1927 uden tvivl allerede er veludforsket, er der stadig mange fascinerende åbne spørgsmål, som vil optage videnskabshistorikere i årtier fremover. Mens mange tidligere har lagt vægt på det revolutionerende brud, som kvantemekanikken uden tvivl var, er historikere i de senere år begyndt at lægge større vægt på de mange fascinerende kontinuiteter. Meget af den viden, der blev skabt inden for både den klassiske fysik og den gamle kvanteteori, overlevede kvantemekanikkens tilblivelse, og hvordan den blev reintegreret i den nye mekanik, er i mange tilfælde stadig ikke blevet undersøgt i detaljer.

Der mangler også stadig meget forskning om kvantemekanikkens anvendelse inden for områder, som vi i dag betragter som selvstændige underdiscipliner af fysikken, fx faststoffysik, kernefysik, partikelfysik eller kvantegravitation og kvanteinformation, eller inden for andre fag som fx kemi og biologi. Indtil for ganske nylig blev sådanne anvendelser betragtet som stort set afledte og dermed i bedste fald som mindre spændende for historikere, der er interesseret i kvantefysikkens grundlag. Dette er ved at ændre sig, og det bliver tydeligt, at mange af disse anvendelser havde vigtige følger for selve kvantemekanikkens grundlag [14].

Historien om kvantemekanikkens mange forskellige fortolkninger giver også løfte om interessante nye veje for forskningen, især når man tænker på, at det, der ofte overfladisk (og oftest i nedsættende vendinger) omtales som "Københavnerfortolkningen" er en sammensmeltning af forskellige synspunkter (Heisenbergs og Bohrs til at begynde med), og også i lyset af den nyere udvikling inden for kvanteinformation og kvantecomputere.

En central udfordring for fremtidige historikere vil være at få adgang til de relevante historiske kilder, også med hensyn til den nyere udvikling inden for kvantefysikken – en opgave, der ikke bliver lettere i en tid, hvor fysikere kommunikerer elektronisk, og hvor noter og manuskripter fødes digitalt frem for på godt gammeldags papir. Måske er der brug for endnu et projekt som det, Kuhn og hans medarbejdere gik i gang med i 1960'erne, for at bevare kvantefysikkens nyere kulturarv.

Litteratur

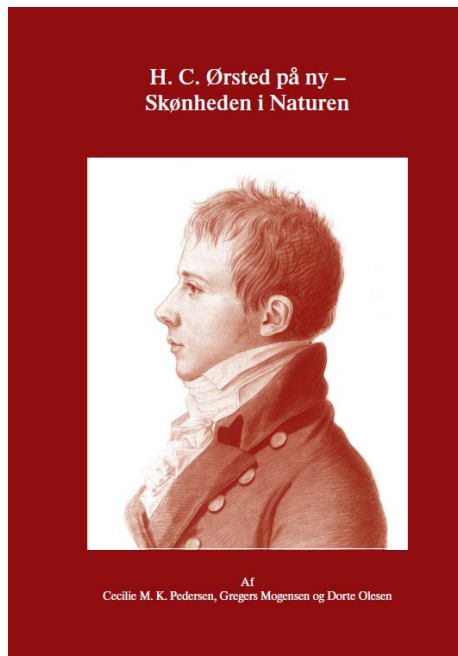
- [1] M. Jammer (1966) *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*. McGraw-Hill.
- [2] B.L. van der Waerden (1967) *Sources of Quantum Mechanics*. North Holland.

- [3] O. Darrigol (1992) From c-Numbers to q-Numbers: The Classical Analogy in the History of Quantum Theory. University of California Press.
- [4] H. Kragh (1999) Quantum Generations: A History of Physics in the Twentieth Century. Princeton University Press.
- [5] M. Beller (2001) Quantum Dialogue: The Making of a Revolution. University of Chicago Press.
- [6] A. Duncan og M. Janssen (2019) Constructing Quantum Mechanics. Vol. 1: The Scaffold, 1900–1923. Oxford University Press; Vol. 2: The Arch, 1923–1927 (forv. 2023).
- [7] M. Badino (2016) What Have the Historians of Quantum Physics Ever Done for Us?, *Centaurus*, bind **58**, nr. 4, side 327–346.
- [8] T.S. Kuhn (1962) The Structure of Scientific Revolutions. University of Chicago Press.
- [9] C.F. von Weizsäcker (1985) Niels Bohr, *Physikalische Blätter*, bind **41**, nr. 9, side 308–314.
- [10] A. Duncan og M. Janssen (2007) On the Verge of Umdeutung in Minnesota: Van Vleck and the Correspondence Principle, *Archive for History of Exact Sciences*, bind **61**, nr. 6, side 553–624; 625–671.
- [11] A. Blum, M. Jähnert, C. Lehner og J. Renn (2017) Translation as Heuristics: Heisenberg's Turn to Matrix Mechanics, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, bind **60**, side 3–22.
- [12] H. Kragh (1990) Dirac: A Scientific Biography. Cambridge University Press.
- [13] C. Joas og C. Lehner (2009) The Classical Roots of Wave Mechanics: Schrödinger's Transformations of the Optical-Mechanical Analogy, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, bind **40**, nr. 4, side 338–351.
- [14] J. James og C. Joas (2015) Subsequent and Subsidiary? Rethinking the Role of Applications in Establishing Quantum Mechanics, *Historical Studies in the Natural Sciences*, bind **45**, nr. 5, side 641–702.



Christian Joas er ph.d. i fysik, leder af Niels Bohr Arkivet og lektor i videnskabshistorie ved Institut for Naturfagenes Didaktik, KU. Hans forskning fokuserer på fysikkens historie i det 20. århundrede, især kvantefysikkens oprindelse og anvendelse. I foråret 2022 underviser han i kvantemekanikkens historie sammen med Ricardo Karam og Helge Kragh.

Nyt fra foreningerne



Ny bog om H.C. Ørsted og ny webshop hos SNU

I anledning af 200-året for H.C. Ørsteds opdagelse af elektromagnetismen skabte Selskabet for Naturlærens Udbredelse (SNU) en udstilling om Ørsted, som nu er nået til Steno Museet i Aarhus. Selskabet ejer en del af hans oprindelige ejendele, mange som ikke ofte bliver vist frem, og disse skabte grundlag for udstillingen.

SNU har fået mange rosende ord for udstillingen “H.C. Ørsted på ny – Skønheden i Naturen”, og har derfor valgt at udgive en bog, der tager udgangspunkt i udstillingen og SNUs samling af Ørsteds ejendele. Bogen kan læses både som et supplement til udstillingen, men også som en god lille all-round introduktion til Ørsted som både forsker og kulturperson.

Bogen er skrevet af Dorte Olesen (SNUs præsident), Cecilie Pedersen (SNUs sekretær) og Gregers Mogensen (projektleder for udstillingen) baseret på input fra hele SNUs direktion og andre eksperter.

Den kan købes i SNUs nye webshop på naturlæren.dk, som netop er gået i luften. Bogen koster 75 kr. + fragt. Den sælges også på Steno Museet.

Årsmøde i Dansk Fysisk Selskab



Dansk Fysisk Selskab (DFS) måtte i 2020 aflyse årsmødet i på grund af corona-pandemien, men i år har DFS holdt årsmøde på Brogaarden i Middelfart den 21.-22. juni. På årsmødet var der mulighed for at se de nyeste resultater indenfor en bred vifte af fysiske discipliner, fra superkølede væsker og katalyse til kvantedevices, og høre om bedre rekruttering og læring i fysik.

Du kan se nyheder fra DFS på hjemmesiden www.danskfysiskselskab.dk.