

Udviklingen af Bohrs stødteori i perioden 1912-1948

Jens Thorsen, Europaskolen, Luxembourg.

Niels Bohrs afhandling "The Penetration of Atomic Particles through Matter" fra 1948 [1] har spillet en meget betydende rolle for udviklingen inden for atomare kollisioner, strålings- og materialefysik, og det er den af alle hans afhandlinger, som i dag oftest citeres. Bohrs første afhandling om stødproblemer blev publiceret allerede i 1913, og han bevarede hele livet igennem en stærk interesse for dette område af fysikken. Jeg vil her beskrive, hvorledes mange af de emner, som behandles i 1948-afhandlingen, faktisk var fundet af Bohr mange år tidligere, og hvorledes forskellige omstændigheder forpurrede en tidligere offentliggørelse. Afhandlingen er blevet betragtet som en bibel for området, idet den giver en udtømmende beskrivelse af det stade, som forskningen af atomare kollisioner befandt sig på i midten af 40'erne. Ydermere er den interessant på grund af Bohrs egen beskrivelse af den historiske udvikling, i hvilken han jo selv spillede en meget stor rolle.

Manchester 1912

Bohrs første afhandling om stødteori [2] kom til verden i Manchester i juni 1912. Bohr havde året før forsvaret sin doktorafhandling om metallernes elektron-teori og valgte derefter at rejse til Cambridge, hvor elektronens "fader" J. J. Thomson var leder af Cavendish-laboratoriet. Han så frem til diskussioner med Thomson om indholdet af disputatsen, men det blev ikke rigtigt til noget, og i marts 1912 rejste han videre til Manchester for at arbejde hos Ernest Rutherford. Her blev han til slutningen af juli, og disse måneder skulle vise sig at blive yderst frugtbare.

Som sædvane var i Manchester blev Bohr sat i gang med en række eksperimentelle øvelser i radioaktivitet, hvilke blandt andet omhandlede absorption af α - og β -partikler ved passage gennem stof og variationen af β -strålers aktivitet med tiden. I slutningen af maj 1912 måtte Bohr holde fri fra laboratoriet, da han ventede på en sending radium til sine forsøg. Derved fik han tid til at beskæftige sig med en artikel af C. G. Darwin om α -partiklers stopning i stof, som netop var publiceret i Philosophical Magazine [3]. Bohr skrev til sin forlovede Margrethe Nørlund den 4. juni, at han havde travlt, for "jeg venter nemlig Fremmede i Aften, ...en ung, meget dygtig Matematiker C. G. Darwin (Sønnesøn af den rigtige Darwin), ...men det kan maaske dog komme til at gaa varmt til, for jeg er ikke sikker paa, at vi er enige (Tys!!)". En uge senere skrev han til sin bror Harald, at "Det gaar mig ikke saa helt daarligt i Øjeblikket, jeg havde for et Par Dage siden en lille Ide med Hensyn til Forstaaelsen af Absorption af

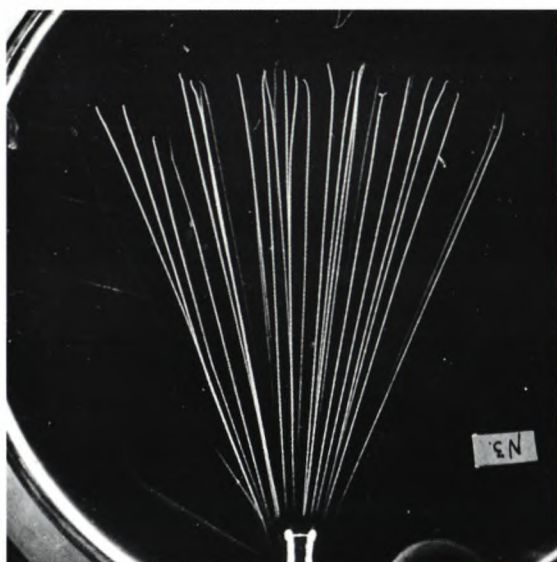


Figur 1. Bohr forelæser om sin stødteori. Foto: Niels Bohr Arkivet.

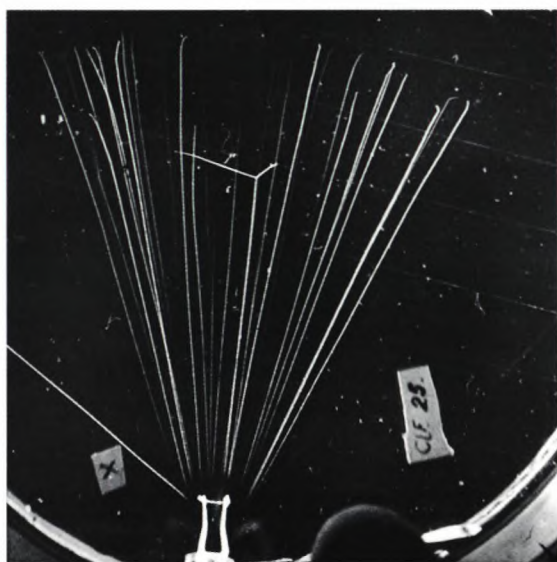
α -Straaler... C. G. Darwin har lige offentliggjort en Theori om dette Spørgsmaal, og jeg syntes, at den ikke alene ikke var helt rigtig i det mere matematiske (det var dog kun temmelig lidt), men meget utilfredsstillende i Grundopfattelsen, og har udarbejdet en lille Theori derover, der selv om den er meget lille, maaske dog kan kaste lidt Lys over nogle Ting med Hensyn til Atomernes Bygning. Jeg tænker meget snart at offentliggøre en lille Afhandling derom". Og igen til Harald den 19. juni: "Det kunde være, at jeg maaske har fundet ud af en lille Smule om Atomernes Bygning. Du maa ikke tale om det til nogen, for ellers kunde jeg jo ikke skrive saa tidlig til Dig om det... Det er altsammen vokset ud af en lille Oplysning jeg fik fra α -Straalernes Absorption. Du forstaar jo at jeg endnu kunde tage Fejl, for det er ikke helt arbejdet ud endnu (jeg tror det dog ikke); jeg tror heller ikke, at Rutherford mener, at det er helt vildt."

Bohrs "lille Theori" om stopning af ladede partikler ved gennemtrængning af stof var færdigskrevet i løbet af juni måned, men blev først publiceret i januar 1913, da Bohr afventede en række nye målinger

af α -partiklers hastighed. Men hvad er det for en lille oplysning fra α -strålernes absorption, som har fået ham til at kaste sig over spørgsmålet om atomernes bygning?



Figur 2. Spor efter α -partikler. Tågekammerbillede taget af J. K. Bøggild. Foto: Niels Bohr Arkivet.



Figur 3. En α -partikel kolliderer med en atomkerne. Tågekammerbillede taget af J. K. Bøggild. Foto: Niels Bohr Arkivet.

Darwin havde brugt to grundlæggende antagelser. For det første betragtede han en atomar elektron som fri under stødet, da α -partiklens hastighed er så stor, at atomets bindingskræfter ikke når at komme i spil, før α -partiklen er væk. For det andet antog han, at en α -partikel kun mister energi, når den trænger igennem et atom. Den sidste antagelse er nødvendig, da man ellers ved udregningen af en α -partikels middelenegitab vil få et uendeligt stort energitab. Darwins resultat var en formel, som kvalitativt gav gode resultater, men ikke kvantitativt.

Bohrs uenighed med Darwin gik netop på disse

to antagelser. Det kunne ikke være rigtigt at se bort fra elektronernes bindingskræfter i atomet under stødet og at vælge atomets radius som grænse for, hvornår der sker en energioverførsel fra α -partikel til elektron. Derfor forkastede Bohr disse to antagelser, men måtte nødvendigvis indføre en ny grænseafstand for at få en endelig energioverførsel. Bohr gav den 26. september 1912 et foredrag i Fysisk Forening i København med titlen "Om Absorption af α - og β -Straaler", hvor han på fremragende pædagogisk vis gjorde rede for sine antagelser.

Det væsentlige nye punkt i Bohrs behandling af stødproblemer var indførelsen af en perturbationsbehandling af fjerne stød, som tillod ham at betragte atomare elektroner som harmoniske oscillatorer, og som igen betød en simpel håndtering af bindingskræfterne i atomet. Herved kunne han indføre en dynamisk cut-off afstand i modsætning til Darwins brug af atomradius. I sit foredrag siger Bohr:

"Jeg skal nu vise, hvorledes man paa simpel Maade kan finde en naturlig Grændse for Virkningen af Elektronerne paa de bevægede Partiklers Hastighed ved at tage de Kræfter, hvormed Elektronerne holdes paa deres Plads indenfor Atomet, i Betragtning.

Under Indflydelse af disse Kræfter vil Elektronerne faa en Art svingende Bevægelse, dersom de bringes ud af deres Ligevægtsstilling (eller deres Baner) ved en Paavirkning udefra. Til denne svingende Bevægelse vil svare en bestemt Svingningstid, der imidlertid kan være meget forskellig for Elektronerne i de forskellige Atomer, ja endda for de forskellige Elektroner indenfor samme Atom. Ved de Sammenstød mellem Partiklerne og Elektronerne, ved hvilke Partiklerne kommer meget nær til Elektronerne, vil Tiden for Sammenstødet være meget kort. Ved Tiden for Sammenstødet skal forstaas den Tid, i hvilken Kræfterne mellem Partiklerne og Elektronen er af samme Størrelsesorden som i det Øjeblik, i hvilket Partiklen og Elektronen er hinanden nærmest.

Er Sammenstød tiden nu ringe i Sammenligning med den pågældende Elektrons Svingningstid, vil Energioverføringen mellem Partiklen og Elektronen meget nær være den samme som om Elektronen var fri paa samme Maade som den Bevægelsesenergi, der tilføres et Pendul ved et Hammerslag kan beregnes som om Pendulet var fri, idet de Kræfter, hvormed Pendulet søger tilbage til sin Ligevægtsstilling, slet ikke vil have Tid til at virke før det korte Stød er forbi.

Betrakter man saadanne Sammenstød, ved hvilke Partiklen er saa langt borte fra Elektronen, at Sammenstød tiden er meget lang i Sammenligning med Svingningstiden, vil Energioverføringen til Elektronen være overordentlig ringe, svarende til, at det ikke er muligt at sætte en Stemmegaffel i Sving ved et jævnt Tryk med en Finger, hvor haardt man end vilde trykke."

Energioverførslen afhænger derfor af de bundne elektroners svingningsfrekvenser, og Bohr kunne udlede

sit velkendte udtryk for energitabet pr. længdeenhed:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{4\pi e^2 E^2 N}{mV^2} \sum_{s=1}^n \log \frac{V^3 k m M}{2\pi v_s e E (M + m)} \quad (1)$$

Her betegner V partiklens hastighed, M og E dens masse og ladning, m og e elektronens masse og ladning, N antallet af targetatomer pr. volumenenhed, v_s frekvensen af elektron nummer s i et atom med i alt n elektroner, og k er en konstant, som Bohr fandt til at have værdien 1,123.

Det er nu muligt at se, hvilken oplysning Bohr kan bruge i spørgsmålet om atomernes bygning. Ved sammenligning med eksperimentelle resultater skal han bruge frekvensen v_s , og den hentede han fra dispersionsteorien, der beskriver, hvorledes lys afbøjes ved gennemgang af stof. Bohr forklarede i sit foredrag:

"Det viser sig nu ogsaa virkeligt, at man udfra de Oplysninger, som Theorien for Dispersion giver om Antallet af Elektroner i Atomerne og om deres Frekvenser teoretisk kan beregne Absorptionen af α -partikler i meget nær Overensstemmelse med Forsøgsresultaterne for de Stoffers Vedkommende, der har de laveste Atomvægte, nemlig Brint og Helium.

At en saadan Overensstemmelse ikke finder Sted for de højere Atomvægtes Vedkommende hidrører fra, at den Ligning, der udtrykker Dispersionens Afhængighed af Frekvensen og den der udtrykker Partiklernes Hastighedstabs Afhængighed af denne, paa grund af Fænomenernes i saa mange Henseender vidt forskellige Karakter er meget forskellig. Medens saaledes Elektronernes Indflydelse paa saavel Refractionen (for alm. Lys) som paa Absorptionen af α -Straaler aftager med voksende Frekvens, er Aftagningen uhyre meget hurtigere for Refractionens Vedkommende. Elektroner med høj Frekvens vil derfor saa godt som ingen Indflydelse have paa Refractionen, og Forsøgene giver os derfor kun Oplysninger om Frekvenserne for et ringe Antal af de langsomst svingende Elektroner i hvert Atom.

For α -Straalernes Vedkommende vil derimod Elektroner med langt højere Frekvenser endnu have betydelig Indflydelse paa Straalernes Absorption. Studiet af denne Absorption vil derfor i højere Grad end Studiet af de optiske Fænomener være i Stand til at oplyse os om de hurtige Svingningstider for Elektronerne i det Indre af Atomerne og derigennem maaske give os Oplysninger om Atomernes indre Bygning."

Bohr fandt for de lettere stoffer en overensstemmelse inden for ganske få procent, men var klar over, at en diskussion af sammenhæng mellem frekvenser og dimensioner af elektronbaner for elektronerne i det indre af atomerne var nødvendig for at komme videre: "Dette og lignende Spørgsmaal, som jeg er kommet ind paa gennem Theorien for α -Straalernes Absorption, har ledet mig ind paa Undersøgelser over Atomers og Molekylers Opbygning. Jeg haaber om ikke for lang Tid at være i Stand til her i Foreningen at forelægge

Dem nogle Resultater." Vi ser, at det var stødteorien, der banede vej for hans berømte Trilogi om atomernes bygning, som blev færdiggjort på mindre end et år.

Bohr havde i sit foredrag også givet følgende beskrivelse af energitab: *"Partiklernes Hastighedstab kan imidlertid ogsaa forklares simpelt derigennem at Elektronerne paa grund af de fra Partiklen udgaaende tiltrækkende Kræfter vil nærme sig Partiklens Bane, og i Middel være nærmere denne Bane efter Sammenstødene end umiddelbart før disse. Elektronerne vil saa at sige samle sig i Hælene paa Partiklerne og vil derfor paa Grund af deres Tiltrækning udøve bremsende Kræfter paa dem."*

Manchester 1915

Det var vanskeligt for Bohr at finde en stilling i København, og i oktober 1914 vendte han tilbage til Rutherford i Manchester, hvor han blev i næsten 2 år. Han kom hurtigt ind i de gamle tanker om stødteori, og i maj 1915 havde han afsluttet en ny, stor artikel om absorption af α - og β -stråler [4]. Sammenligning mellem eksperiment og teori havde stemt fint for α -stråler i 1912, men ikke så godt for β -stråler. En β -partikels ringe masse betyder, at den ved gennemtrængning af stoffer bliver spredt i alle mulige retninger. Derfor er den faktiske vejlængde ikke lig med den målte vejlængde i modsætning til α -partiklerne, der på grund af deres store masse stort set har den samme rækkevidde. Bohr behandlede derfor partiklernes stragling, dvs. den statistiske fluktuation i rækkevidde og energitab for de enkelte partikler. Resultatet var, at β -partiklernes energitab udgøres af en Gaussfordeling med en hale mod større energitab. Dette skyldes, at en β -partikel ved et sammenstød med en elektron kan miste hele sin energi i et enkelt stød, og derfor er betingelsen for en ren Gaussfordeling ikke opfyldt. Bohr beregnede den korrektion, som var nødvendig at indføre for at gøre rede for relativistiske partiklers energitab, og han prøvede også at give en forklaring af ionisation. Problemet var, at den beregnede ionisation var betydelig mindre end den målte ionisation, og Bohr prøvede at forbedre teorien ved at tage sekundær ionisation i betragtning. Det hjalp ikke meget, og Bohr var klar over, at indførelsen af stationære tilstande i hans atommodel fra 1913 medførte alvorlige problemer for stoppeteorien. En nærmere beskrivelse af denne problemstilling blev udeladt for ikke at gøre artiklen for lang, men i et kollokvium givet i Manchester den 19. februar 1915 nævnte Bohr problemet, men håbede, at problemet kun var tilsyneladende.

1925-1940

Med fremkomsten af den nye kvantemekanik i 20'erne måtte der naturligvis også ske noget inden for stødteorier. Bohr havde i 1925 publiceret en artikel om atomers opførsel i sammenstød, baseret på de

ideer, som var fremsat i en afhandling af Bohr, Kramers og Slater i 1924 [5], herunder blandt andet opgivelse af streng impuls- og energibevarelse. Da disse ideer ret hurtigt blev gendrevet, var Bohr mest stemt for at trække sin artikel tilbage, man blev dog overtalt til at lade være og publicerede den i et tilskrift [6]. Heri gør han gang på gang opmærksom på, at man på grund af de stationære tilstande er nødt til at opgive enhver beskrivelse af sammenstød i rum og tid baseret på de sædvanligvis accepterede ideer i teorien om atomernes bygning.

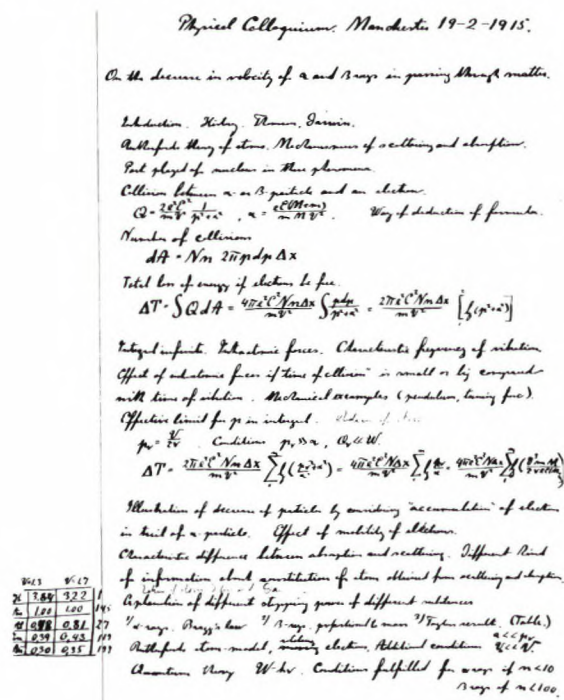


Figure 4. Side af Bohrs manuskript fra kollokviet i Manchester 19. februar 1915.

Born publicerede sin velkendte approksimationsmetode for stød i sommeren 1926, og Wentzel viste i november 1926, at den fører til Rutherford's spredningslov. Hans Bethe publicerede i 1930 sin artikel om stødteori, og heri fandt han et udtryk for energitabet, der simplificeret til det tilfælde, hvor alle elektroner har den samme frekvens, ser således ud:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{4\pi e^2 E^2 N Z}{m V^2} \log \frac{2m V^2}{h\nu}, \quad (2)$$

og som afviger fra Bohrs klassiske formel i logaritmeleddet. Den svejtsiske fysiker Felix Bloch kom i oktober 1931 til København på et seks-måneders ophold. I følge eget udsagn havde han ikke interesseret sig nævneværdigt for stødteori, inden han kom til København, men gennem mange diskussioner med Bohr om anvendeligheden af klassiske billeder til beskrivelse af stødfænomener blev han så interesseret, at han udledte en formel, der som to grænsetilfælde indeholdt hhv. Bohrs og Bethes formler. Den afgørende

parameter, senere kaldt κ af Bohr, var størrelsen

$$\kappa = \frac{2Ee}{h\nu}. \quad (3)$$

Hvis $\kappa \gg 1$ gælder Bohr, hvis $\kappa \ll 1$ gælder Bethe, og for $\kappa = 1$ går de to formler over i hinanden. Blochs artikel blev publiceret i 1933 [7], og han henviste til en artikel af Bohr, der snart ville blive publiceret. Som Bloch senere bemærkede, betød snart i denne sammenhæng 16 år! I Bohrarkivet finder man udkast til en sådan artikel, hvori anvendeligheden af hhv. en klassisk og en kvantemekanisk behandling som funktion af parameteren κ behandles.

En ny gæst dukkede op i september 1933 og blev i godt et år. Det var den walisiske fysiker E. J. Williams, som siden sit første studium i 1926 af Bohrs klassiske afhandlinger fra 1912 og 1915 havde arbejdet videre inden for området. Williams var især interesseret i grænseområdet, hvor den klassiske mekanik stadig har sin gyldighed, men hvor den kvantemekaniske beskrivelse langsomt begynder at spille ind. Bohr planlagde sammen med Williams en fælles artikel med titlen: "Application and Limitation of Space-Time Considerations in Collisions", og i et udkast til artiklen gøres der specielt opmærksom på den kendsgerning, at Rutherford-formlen er nøjagtig ens i både den klassiske og den kvantemekaniske version, et faktum som i lang tid skjulte de virkelige begrænsninger af en klassisk behandling af stød.

Denne artikel blev heller aldrig publiceret, men Bohr talte ofte om emnet i forelæsninger og på rejser. En hindring var naturligvis, at man overvejende kun havde α - og β -partikler til rådighed som partikler, og det var derfor vanskeligt at undersøge det klassiske tilfælde med $\kappa \gg 1$, som Bohr allerede i 1932 gjorde opmærksom på. Men med fissionens opdagelse i slutningen af 1938 opstod der pludselig en ny situation. Fissionsfragmenterne havde nemlig store ladninger, som gjorde κ større end 1, og man havde derfor pludselig en ny mulighed for at undersøge dettes betydning for stødprocesser. De første tågekammerbilleder af fragmenter viste da også en tydelig forskel fra α - og β -partiklernes baner. Sporene var mere eller mindre krumme, og man kan se et stort antal forgreninger, som udgår forskellige steder fra sporet, nemlig som et resultat af et sammenstød med en kerne i den gas, som var i tågekammeret. De to fissionfragmenters spor var også af forskellig længde på grund af de to fragmenters forskellige energier.

1940-1948

Bøggild, Brostrøm og Lauritzen arbejdede på Bohr-Instituttet med studier af fissionfragmenters spor i et tågekammer, og de publicerede resultatet af deres arbejde i sommeren 1940 [8]. Samtidig skrev Bohr den første af i alt tre artikler til Physical Review i 1940 [9], hvori han gjorde rede for de resultater, som Bøggild,

Brostrøm og Lauritzen havde fundet. Den afgørende forskel fra forsøgene med α - og β -partiklerne er den rolle, som kernerstød nu indtager, og den afskærmende virkning, som de bundne elektroner har for den effektive ladning. I de klassiske afhandlinger havde Bohr negligeret bidraget til energitabet fra partiklernes sammenstød med targetkernerne, men nu bidrager de med et ekstra led i stoppeformlen. Disse ideer blev beskrevet mere detaljeret i de næste to artikler til *Physical Review*, og Bohr refererede til en mere udtømmende forklaring, som snart ville blive bragt i en afhandling i *Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskabs Meddelelser*. Bohr reserverede derfor plads i det kommende bind, men da den som bekendt først blev publiceret i 1948, bærer bind 18 årstallet 1940-48, medens bind 19 har 1941-42!

Bohr arbejdede ihærdigt med at færdiggøre artiklen, men de ydre rammer på grund af tyskernes besættelse af Danmark gjorde hverdagen besværlig. Da en højspændingstransformator på Institutet brød sammen, måtte den sendes til Odense til reparation, men Storebælt var frosset til i den strenge vinter i 1941, og det varede adskillige måneder, før man kunne genoptage arbejdet. Ligeledes var det et problem at skaffe råfilm til optagelserne af stødprocesserne i tågekammeret, men her lykkedes det Rozental og Bøggild at skaffe flere tusinde meter kinofilm ved snedigt at bruge tyskernes clearingkonto.

Bohr havde startet arbejdet med den store afhandling i juli 1940, og i Bohrarkivet finder man omkring 2000 sider, som har med den at gøre. Rozental hjalp Bohr med arbejdet, og han har i sin erindringsbog [10] fortalt om, hvorledes arbejdet skred frem. Det var begyndt med en forklaring af de nye tågekammerbilleder af fissionsfragmenternes spor, men var blevet til en meget mere generel behandling af stødproblemer. Der var utallige kladder, koncepter og renskrifter, som Rozental forsynede med dato og nummer for at kunne holde rede på dem, og ofte blev der på en og samme dag skrevet flere forskellige udkast. Afhandlingen var stort set færdig i september 1943 og svulmet op i omfang til næsten 150 sider.

Men situationen strammede til i Danmark, og Bohr fik midt i september 43 oplysninger om, at Rozental var i fare for at blive arresteret af tyskerne. Der blev derfor sørget for, at Rozental kunne komme til Sverige, og overfarten fandt sted om natten den 25. september fra Vedbæk. Bohr havde bedt Rozental om at tage den store afhandling med, således at den kunne komme i sikkerhed. I forvirringen glemte Rozental sin mappe med manuskriptet på stranden, men den blev næste morgen fundet af modstandsfolk, som var på stranden for at slette sporene efter nattens flugt. Mappen blev sendt til Sverige med en ny flygtningetransport, men dukkede aldrig op. Rozental fortæller, at den sikkert blev stjålet, fordi den også indeholdt nogle dengang sjældne beklædningsgenstande som en regnfrakke og varme vanter. Bohr selv måtte flygte til Sverige den 29. septem-

ber, og da han der traf Rozental, spurgte han straks til afhandlingen. Heldigvis var der stadig en kopi på Bohrs kontor i København, men uden formler og rettelser, og ved hjælp af det svenske gesandtskab i København blev manuskriptet sendt med kurerpost til Stockholm, hvor Rozental så efter hukommelsen indføjede de manglende elementer.

Da Bohr vendte tilbage til København i slutningen af august 1945, varede det ikke længe, før han atter begyndte at beskæftige sig med stoppeafhandlingen. Han havde i den mellemliggende tid tænkt over problemerne og meddelte Rozental, at nu var det tid at starte forfra og skrive det hele om! Det gik dog forholdsvis hurtigt, men trykningen viste sig at tage betydelig længere tid end beregnet, og afhandlingen var først færdigtrykt den 17. december 1948.

I dette nummer af *Kvant* diskuterer Preben Hvelplund, Jens Bang og Johannes M. Hansteen afhandlingen og gør nærmere rede for dens betydning for udviklingen inden for atomare kollisioner. Den er blevet en standard reference inden for dette område, og dens store styrke ligger i den grundige analyse som den giver af grundlæggende problemer i et område, som stod Bohrs hjerte meget nær.

Referencer:

- [1] N. Bohr (1948), "The Penetration of Atomic Particles through Matter", *Mat.-Fys. Medd. Dan. Vidensk. Selsk.*, bind **18**, nr. 8.
- [2] N. Bohr (1913), "On the Theory of the Decrease of Velocity of Moving Electrified Particles on passing through Matter", *Phil. Mag.*, bind **25**, side 10–31.
- [3] C. G. Darwin (1912), "A Theory of the Absorption and Scattering of the α Rays", *Phil. Mag.*, bind **23**, side 901–920.
- [4] N. Bohr (1915), "On the Theory of the Decrease of Velocity of Swiftly Moving Electrified Particles in passing through Matter", *Phil. Mag.*, bind **30**, side 581–612.
- [5] N. Bohr, H. A. Kramers og J.C. Slater (1924), "The Quantum Theory of Radiation", *Phil. Mag.*, bind **47**, side 785–802.
- [6] N. Bohr (1925), "Über die Wirkung von Atomen bei Stößen", *Zs. Phys.*, bind **34**, side 142–157.
- [7] F. Bloch (1933), "Zur Bremsung rasch bewegter Teilchen beim Durchgang durch Materie", *Ann. D. Physik*, bind **16**, side 285–320.
- [8] J. K. Bøggild, K. J. Brostrøm og T. Lauritsen (1940), "Cloud Chamber Studies of Fission Fragment Tracks", *Mat.-Fys. Medd. Dan. Vidensk. Selsk.*, bind **18**, nr. 4.

[9] N. Bohr (1940), "Scattering and Stopping of Fission Fragments", Phys. Rev., bind 58, side 654–655; "Velocity–Range Relation for Fission Fragments", ibid., side 839–840; samt N. Bohr (1941), "Velocity–Range Relation for Fission Fragments", Phys. Rev., bind 59, side 270–275.

[10] S. Rozental (1985), "NB. Erindringer om Niels Bohr", Gyldendal.

Bohrs publicerede afhandlinger om stødteori er givet i Niels Bohr Collected Works, bind 8, North-Holland, Amsterdam (1987), red. af Jens Thorsen. Her finder man også en introduktion til emnet såvel som gengivelser af nogle af de upublicerede manuskripter

og breve inden for området, som findes i Bohrarkivet.



Jens Thorsen er lic. scient. i fysik og arbejder som lektor ved Europaskolen i Luxembourg.

Niels Bohr og semiklassisk kollisjonsfysikk

Jens M. Bang, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet, og Johannes M. Hansteen, Fysisk institutt, Universitetet i Bergen

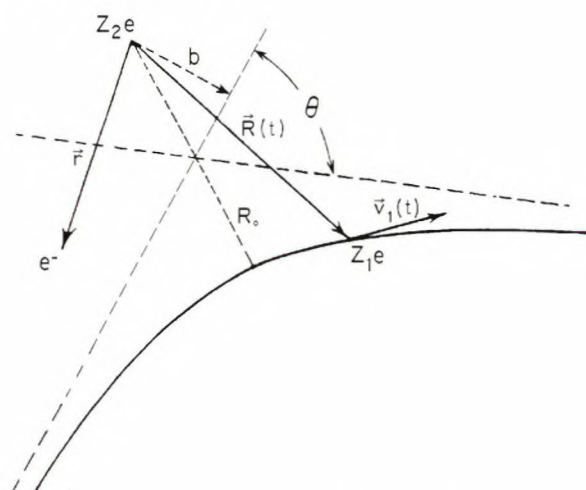
Innledning

Denne artikkel er ment å være en kortfattet beretning om et spesielt felt innen fysikken hvor Niels Bohrs ideer og forfinede analyse har vist seg å være av helt spesiell betydning. Vi tenker her på semiklassisk kollisjonsfysikk. Det kan med adskillig rett hevdes at det var Bohr selv som grunnla dette forskningsfelt, ikke minst gjennom sin dyptpløyende avhandling som etter mange forhindringer først ble publisert i 1948 [1].

Klassiske og semiklassiske approksimasjoner til kvantemekanikken er blitt mer og mer vanlig i de siste årtier. Dette gjelder for atom- og kjernefysikk så vel som for beskrivelsen av kjemiske reaksjoner. Det er således typisk at en av de konferanser som ble holdt i anledning av 100 års markeringen i 1985 av Niels Bohrs fødsel, var viet til semiklassiske metoder for studiet av atom- og kjernefysikk [2].

Niels Bohr har ved flere anledninger uttalt seg omtrent som følger: Vi mennesker har en sterk tilbøyelighet til å bruke klassiske bilder når vi skal tolke fysiske fenomener. De senere års utvikling har til fulle vist riktigheten av dette utsagn. Således er det grunner til å anta at semiklassiske teorier i den bredeste betydning av ordene vil finne økende anvendelse i fremtiden. Én årsak til dette er åpenbart at de semiklassiske modeller har en sterk appell til vår visualiserings- evne og fysiske intuisjon. Hertil kommer at de semiklassiske beskrivelser medfører en enklere matematisk behandling enn de fullstendig kvantemekaniske beregninger som ofte er plagsomt kompliserte. Vi skal i det

følgende skissere effektiviteten og anskueligheten av en semiklassisk modell i forbindelse med analysen av K-skallionisasjon og beslektede prosesser som opptrer ved ione-atom kollisjoner.



Figur 1. Klassisk bilde av et ladet prosjektil som kolliderer med en targetkjerne med ett bundet elektron. Symbolet θ betegner spredningsvinkelen og b den tilsvarende støtparameter.

Motivering og modell

Som et biprodukt av studiene av Coulomb-eksitasjon av atomkjerne [3] ble det skapt fornyet interesse for atomære kollisjoner i 1950-årene. Man trengte å kjenne bedre den atomære bakgrunn for kjerneprosessene.