

Bohrs første hit i

Einstein publicerede fire afhandlinger i 1905. Kun én af dem blev belønnet med nobelprisen. Niels Bohr publicerede fire afhandlinger i 1913. Her er historien om den, han *ikke* fik nobelprisen for, men som ikke desto mindre har stor gennemslagskraft den dag i dag.

Forfatter



Peter Sigmund,
professor
Institut for

Fysik, Kemi og Farmaci,
Syddansk Universitet
E-mail: sigmund@sdu.dk

Øverste foto: Bohrs portræt pryder 500 kr-sedler, næsten som et symbolsk udtryk for den store værdi af hans videnskabelige arbejde.

Foto: Colorbox.

Man siger, at halvdelen af alle videnskabelige publikationer aldrig bliver citeret, og at hovedparten af resten er glemt efter ti år.

Niels Bohrs publikationer finder derimod uformindsket interesse blandt forskerne. Det kan ses ved opslag i Web of Science, der viser over hundrede citater pr år i faglitteraturen til Bohrs videnskabelige artikler. De tre arbejder fra 1913, som blev belønnet med nobelprisen, står som nr. 5, 7 og 9 ordnet efter antallet af citater. Som nr. 1 står et arbejde om kernesplætning fra 1939 med John Wheeler, og som nr. 3 ses en afhandling fra 1913 med den noget nørdede titel *On the Theory of the Decrease of Velocity of Moving Electrified Particles on passing through Matter*, fulgt op som nr. 4 af endnu en afhandling med næsten samme titel fra 1915.

At de tre arbejder, der præsenterer atommodellen, ikke topper listen, er næppe overraskende, fordi de for længst er blevet til almenviden og en fast bestanddel af lærebøgerne i fysik. Men hvad skyldes den store interesse for bevægelsen af elektrificerede partikler, hundrede år efter at afhandlingen er udkommet? Vel, det vil jeg prøve at svare på i denne artikel.

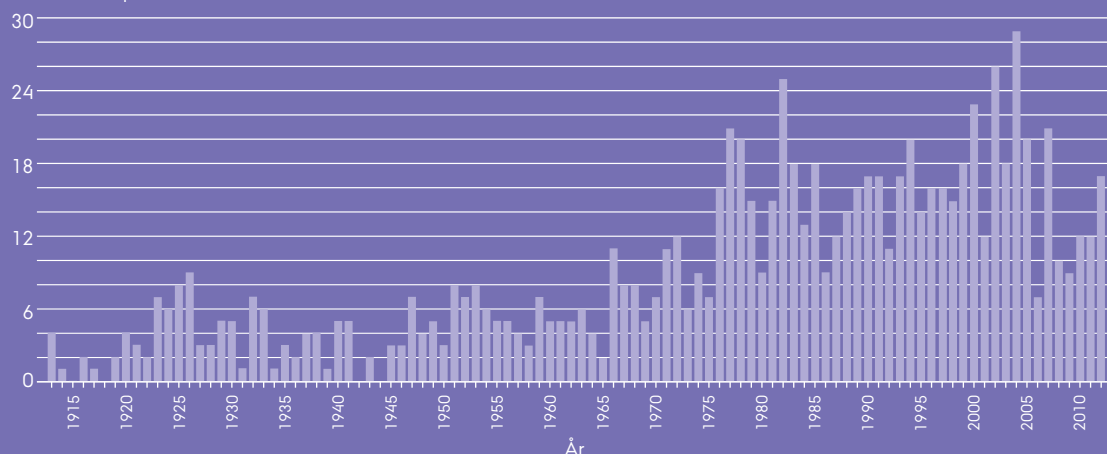
På sporet af elektrificerede partikler

Lad mig foreløbigt nøjes med at forklare, at "elektrificerede partikler" for Bohr stod for α - og β -partikler, der spillede en central rolle i udviklingen af atom- og kernefysikken. Man bruger ikke betegnelsen længere. Til gengæld har de begreber og teknikker, Bohr udviklede her, betydning for alle grene af acceleratorfysikken og dens viden-

Figur 1

Antal årlige citater til de to omtalte afhandlinger fra 1913 og 1915 over hundrede år, ekstraheret fra Web of Science. Selv om antallet formentlig er undervurderet i de tidlige år, er det slående, at det har været støt stigende.

Antal citater per år



1913

skabelige og teknologiske anvendelser (figur 1). For eksempel er det her, det videnskabelige grundlag blev skabt for det nye strålebehandlingscentrum, der skal bygges på Skejby Sygehus ifølge Sundhedsstyrelsens anbefaling.

Men først noget om baggrunden: Da Niels Bohr kom til Manchester i 1912, var Ernest Rutherford og hans medarbejdere i fuld gang med at udforske egenskaberne af de nyligt opdagede atomkerner. Et vigtigt redskab var tågekammeret, der viste sporene af α - og β -partikler i luft mættet med vanddamp (figur 2). I den sammenhæng havde man brug for at kunne forstå længden af disse spor. En teoretiker, C. G. Darwin, barnebarn af "den rigtige Darwin", som Bohr udtrykte det, havde lige skrevet en afhandling om emnet, som Bohr syntes indeholdt en alvorlig fejl. Han tog selv problematikken op, og resultatet af hans overvejelser var en teori, som blev retningsvisende for alt fremtidigt arbejde på området.

Ionisering og energitab

Sporene i et tågekammer fremkommer ved ionisering, dvs. ved at luftmolekyler omdannes til ioner af den indkommende stråling. Ionernes elektriske ladning tiltrækker vandmolekyler, hvilket indebærer at vanddamp kondenseres til synlige dråber, der markerer partiklens bane.

Ioniseringen koster energi. Derved bremses partiklen ned, og den stopper, når energien er brugt op. Det er derfor nærliggende at antage, som Darwin gjorde, at det er ioniseringen, der bestemmer banens længde. Han bestemte derfor energitabet ved kun at medregne begivenheder til energitabet, hvor α -partiklen trænger ind i et atom.

Det er her, Bohr tog fat: En ting er, at ioniseringen giver anledning til et synligt spor, men sporets længde bestemmes af hele energitabet, ikke kun den del, der giver anledning til dannelse af ioner. Men hvad ellers kan energi bruges til? Jo, fra teorien for optisk dispersion og absorption, som Bohr kendte, vidste man, at elektronerne i et atom kan sættes i bevægelse af en lysbølge, uden at elektronen forlader atomet. Det elektriske felt af en lysbølge er langt mindre end en α -partikels på en atomafstand.

Nedbremsningsevnen

Bohrs første afhandling fra 1913 omhandler denne proces (figur 3). Resultatet af hans beregning var, at luftens "nedbremsningsevne" var op til det dobbelte af hvad Darwin havde beregnet, og at afhængigheden af partiklens hastighed var en anden. En væsentlig del af teorien var opdelingen i to grupper af sammenstød: Dem, hvor elektronerne får så megen energi, at de kan forlade atomet, og dem hvor de bare eksciteres (i nutidens sprogbrug).

Vekselvirkningen mellem den indkommende stråling og elektronerne blev beskrevet teoretisk ved Newtons ligninger. Det gjaldt både for optisk dispersion og absorption og for nedbremsningen af ladede partikler, idet kvantemekanikken ikke var opfundet endnu (boks).

Nedbremsningen

I klassisk teori for optisk dispersion og absorption kan elektronen udføre harmoniske svingninger. En lysbølge, der gennemtrænger mediet med denne frekvens, absorberes. Niels Bohr viste, at en α -partikel, der rammer et atom, kan overføre energi til en af atomets elektroner, hvis stødet er kortvarigt, mens der ikke overføres energi for stød på stor afstand. Den kritiske stødafstand, der markerer overgangen mellem hurtige og langsomme stød, kaldes adiabatafstanden og er bestemt ved absorptionsfrekvensen. Selve opdagelsen af sammenhængen mellem optik og atomare stødprocesser er en erkendelse med vidtrækkende konsekvenser. Se også figur 3.



Figur 2

Klassisk tågekammerbillede af Meitner og Freitag, som viser spor af α -partikler, dvs. heliumkerner fra radioaktive henfald i luft mættet med vanddamp. Kilden, et radioaktivt præparat, er nederst i billedet. Hovedparten af sporene er retlinede og næsten lige lange.

Bohr erkendte, at partiklernes hastighed kunne være så høj, at Einsteins dengang nye relativitetsteori kunne påvirke resultatet af hans regning. Han udvidede teorien i afhandlingen fra 1915, hvor han i øvrigt præsenterede en smuk teori for fluktuationen i partiklers energitab. Den teori er den dag i dag udgangspunkt for enhver beregning af energitabsfluktuationer.

Bohrs nedbremsningsteori har sit eget anvendelsesområde

I 1925 blev Bohrs atomteori afløst af kvantemekanikken. Det havde også konsekvenser for Bohrs nedbremsningsteori, og i 1930 skabte Hans Bethe (figur 4) den tilsvarende kvanteteori. Ved første øjekast har de to teorier ikke meget tilfælles, men et nærmere studium viser hurtigt, at Bethe lændede sig op ad Bohrs arbejde så meget som det kan lade sig gøre. Specielt har Bethe lige som Bohr opdelt sammenstødene i en blød og en hård gruppe.

Bethes teori blev, sammen med en relativistisk udvidelse, som ikke mindst Christian Møller i København havde en væsentlig andel i, hurtigt accepteret som den nye standard. Den er da fortsat uundværlig i hele højenergifysikken. Men i modsætning til Bohrs atomteori, der nutildags mest har didaktisk og historisk betydning, er der områder, hvor Bohrs nedbremsningsteori giver en bedre beskrivelse end Bethes kvanteteori.

Hvordan kan det nu være? Kvanteteorien indeholder da den klassiske mekanik som et grænsetilfælde. Jo, det er lige præcist pointen. Det er velkendt, at den makroskopiske verden, der har at gøre med store masser, er særdeles velbeskrevet ved Newtons mekanik. Det samme gælder til en vis grad i den mikroskopiske verden: En tung atomkernes bevægelse følger Newtons love et langt stykke hen ad vejen. Det er ikke mindst kvantekemikerne glade for, når de beskriver molekylspektre ved kun at anvende kvantemekanik på elektronernes bevægelse, mens atomkernen beskrives klassisk.

Det er nu vigtigt at gøre sig klart, at selv om Bethes teori er baseret på de grundlæggende kvantemekaniske ligninger, så er den ikke eksakt, men en såkaldt perturbationsteori, der forudsætter, at vekselvirkningen mellem partiklen og elektronerne er blid. Det er den netop for hurtige partikler med en lille elektrisk ladning som elektroner, protoner og α -partikler.

Tunge ioner

Dette fik praktisk betydning efter opdagelsen af kernespaltningen i 1938. Som resultat af en kernespaltning finder man ud over neutroner to tunge kerner med en betydelig energi. Ved Bohrs institut på Blegdamsvej i København brugtes den nyligt byggede cyklotron til at undersøge spor af spaltningsfragmenter i et tågekammer. I to korte men vægtige arbejder fra 1940 og 1941 påpegede Niels Bohr betydningen af klassisk teori for nedbremsningen af disse partikler. Hurtige partikler kan både tabe og indfange elektroner på vej gennem et medium. Bohr konkluderede, at spaltningsfragmenters elektriske ladning afhang af hastigheden og derfor måtte variere langs banen.

Undersøgelsen af kernespaltningen spillede en vigtig rolle på Blegdamsvej i mange år, men i nærværende sammenhæng er det først og fremmest N. O. Lassens arbejde, der skabte et nyt forskningsområde, atomfysikken for hurtige, tunge ioner, som nutildags praktiseres ved nogle kæmpe-acceleratorer i USA, Tyskland, Japan, Kina og Rusland. Bl.a. opdagede Lassen, at spaltningsfragmenternes ladning var signifikant højere i et kompakt materiale end i en luftart. Det gav anledning til, at Niels Bohr sammen med Jens Lindhard som sin sidste videnskabelige publikation udgav en artikel, der skulle forklare dette fænomen. Det gjorde den faktisk, men det er man først blevet sikker på i de seneste år. En af vanskelighederne bestod i at forklare, hvorfor den nævnte forskel i ionladningen ikke syntes at medføre en tilsvarende forskel i nedbremsningen.

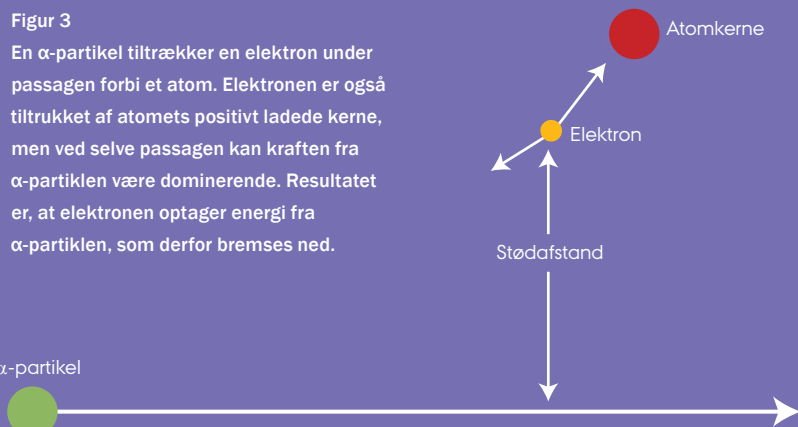
Videre læsning

Processen med at udvikle en nedbremsningsteori for tunge ioner er beskrevet i:
P. Sigmund: Niels Bohrs teori for α -partiklers nedbremsning i stof i et moderne perspektiv. KVANT 12, 1321-1324 (2001)

Figur 3

En α -partikel tiltrækker en elektron under passagen forbi et atom. Elektronen er også tiltrukket af atomets positivt ladede kerne, men ved selve passagen kan kraften fra α -partiklen være dominerende. Resultatet er, at elektronen optager energi fra α -partiklen, som derfor bremses ned.

α -partikel



Figur 4

Ligesom Bohr fik Bethe nobelprisen, men ikke for sin nedbremsningsteori fra 1930, som han endnu i en høj alder anså som sin bedste publikation. Han fik derimod prisen for at have opdaget, hvordan Solen producerer energi.

Foto: Los Alamos National Laboratory

Aarhus-skolen

Målingerne af spaltningsfragmenternes nedbremsning inspirerede to unge fysikere på instituttet på Blegdamsvej, Jens Lindhard, der siden blev professor ved Aarhus Universitet, og Morten Scharff, til at starte forfra med en teori, der skulle gælde specielt for tunge ioner med energier svarende til spaltningsfragmenternes og derunder. Det tog nogle år at få resultaterne publiceret, da Scharff døde alt for tidligt.

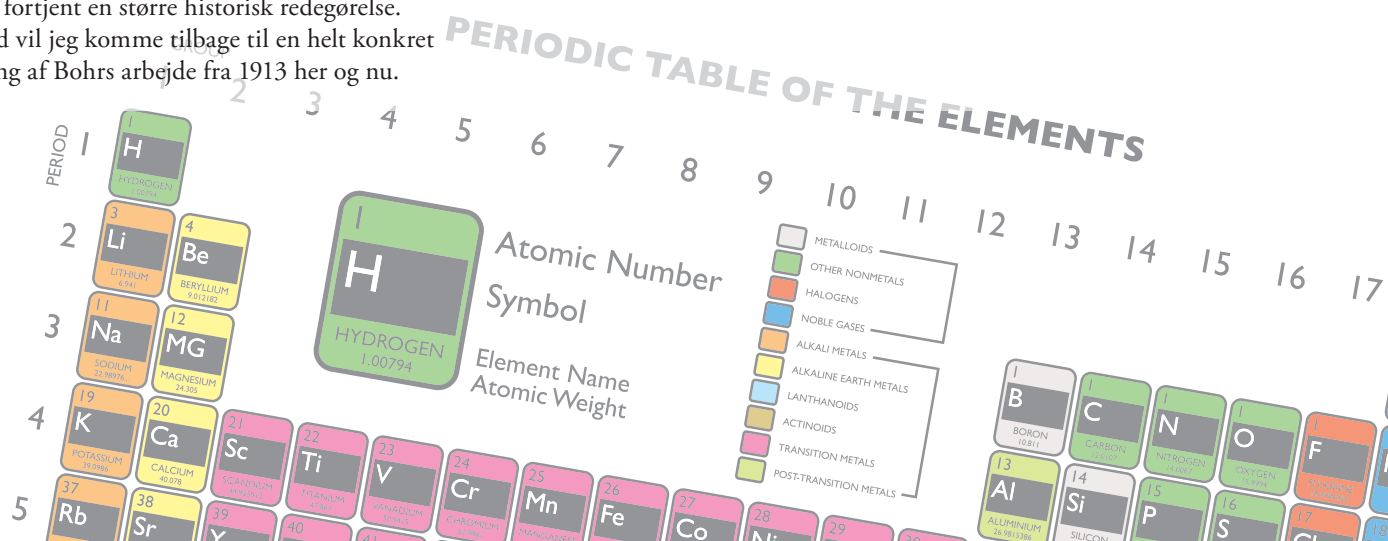
De tre arbejder mellem 1963 og 1968, skrevet sammen med Hans E. Schiøtt, Poul V. Thomsen og Vibeke Nielsen, hører til de højest citerede inden for dansk fysik. De udkom på det helt rigtige tidspunkt, hvor man fandt ud af, at forholdsvis små acceleratører, som man havde udviklet for at studere atomkerner, var blevet uinteressante til det oprindelige formål, men udmærket kunne bruges i mikroelektronikken og en hel stribe andre højteknologiske områder.

Lindhards virke i Aarhus gav anledning til en meget frugtbar periode for både den eksperimentelle og den teoretiske fysik, som også havde udløbere til København, Risø og Odense. Det ville føre alt for vidt at komme nærmere ind på det område, som har fortjent en større historisk redegørelse. Derimod vil jeg komme tilbage til en helt konkret betydning af Bohrs arbejde fra 1913 her og nu.

Et bidrag fra Odense

Jeg blev på et tidspunkt kontaktet af den internationale strålekommission ICRU, som var interesseret i at udgive en certificeret tabel over tunge ioners nedbremsningsevne. Jeg overbeviste mig hurtigt om at eksisterende tabeller var baseret på utilstrækkelig teori, og at en brugbar teori måtte udvikles, hvilket ville kræve tid. Problemet var, at Bethes kvanteteori havde været så overvældende en succes for lette partiklers vedkommende, at de fleste ikke kunne forestille sig at den ikke også gjalt for tunge ioner.

Jobbet indebar to hovedopgaver. Den ene var udviklingen af en nedbremsningsteori, der gav brugbare forudsigelser for ioner og materialer, der dækker over hele det periodiske system. Denne opgave blev løst over en årrække. Den anden opgave var at overbevise eksperter og brugere om, at Bohrs klassiske teori fra 1913 var et bedre udgangspunkt end Bethes kvanteteori fra 1930. Det var ikke et problem over for fysikere i Danmark, hvor først Niels Bohr og siden Jens Lindhard havde gjort forarbejdet. Men forskere og brugere ude i verden måtte overbevises ved teoriens resultater. Det lykkedes ved at producere et stort antal figurer af den type, der er vist i figur 5.



Figur 5

Energitab pr vejtlængde over et meget stort energi-interval, illustreret for ilt-ioner i aluminium. Punkterne repræsenterer målepunkter fra 16 forskellige laboratorier.

Linjen repræsenterer Niels Bohrs nedbremsningsteori, suppleret med korrektioner, som ikke var kendt ved Bohrs tid og ej heller var væsentlige i de anvendelser, teorien var udviklet til.

Figur fra P. Sigmund & A. Schinner, Nucl. Instrum. Methods B 195, 64-90 (2002).

Målepunkter fra 16 laboratorier
S [10^{-15} eVcm²]

