

[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

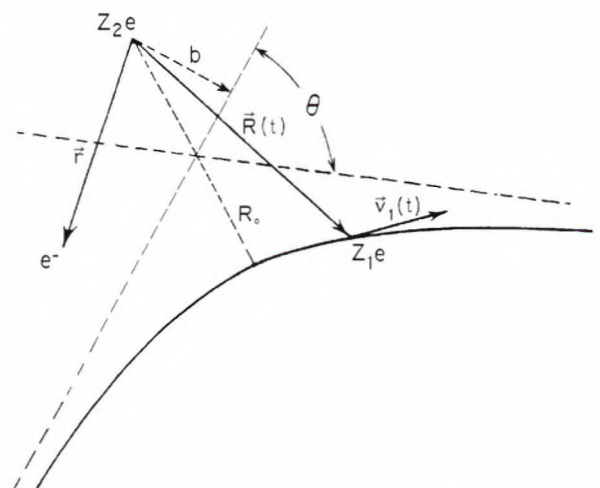
Innledning

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

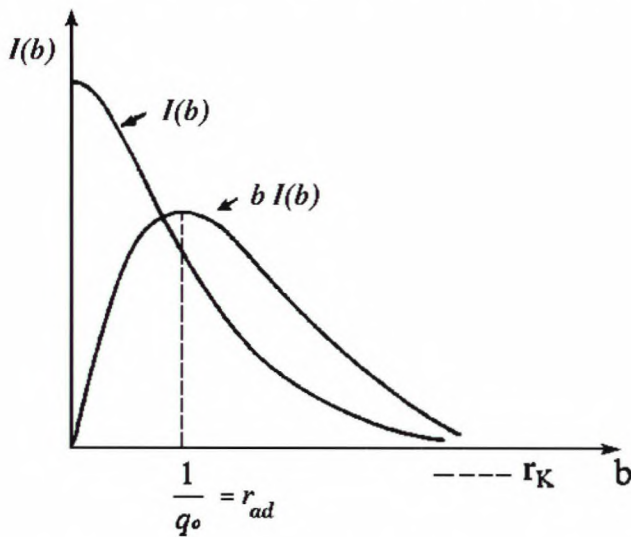
Som et biprodukt av studiene av Coulomb-eksitasjon av atomkjerne [3] ble det skapt fornyet interesse for atomære kollisjoner i 1950-årene. Man trengte å kjenne bedre den atomære bakgrunn for kjerneprosessene.

Dette gjaldt særlig tverrsnittene for K-skallionisasjonen fremkalt ved bombardement av forskjellige targets med ladete prosjektiler [4]. Kvantiske forutsetninger (Born-approksimasjonen) av det totale ionisasjonstverrsnitt passet dårlig med utførte eksperimenter [5].

Vi betrakter spredning av et prosjektil med ladning $Z_1 e$ på en targetkjerne med ladning $Z_2 e$. Bruken av et klassisk banebilde for denne Coulombspredningen krever at følgende ulikhet må være oppfylt:

$$\kappa = \frac{2Z_1 Z_2 e^2}{\hbar v_1} \gg 1 \quad (4)$$

Her er v_1 hastigheten til den innfallende partikkel. Denne ulikheten kalles ofte for Bohr-Sommerfeld kriteriet [1] eller man taler om "den Bohrske kappa". Ulikheten er en konsekvens av kravet om at uskarpheten som følge av diffraksjonen skal være meget mindre enn spredningsvinkelen. Under forutsetning av at ulikheten (1) er oppfylt, kan vi visualisere den nevnte K-skallionisasjonsprosess slik som illustrert i Figur 1.



Figur 2. Sannsynligheten for Coulomb-ionisasjon $I(b)$ for utsendelse av et K-skall elektron som funksjon av støtparameteren b for rettlinjede prosjektilbaner. Størrelsen r_K betegner radien av K-skallet. Beregning gyldig bare for $b \ll r_K$.

Den relative bevegelse $\vec{R}(t)$ av de kolliderende prosjektil-target-kjerner kan nå beskrives ved klassiske baner, altså hyperbelbaner i vårt tilfelle med positive kjerner. Det bundne elektronet beskrives derimot kvantemekanisk. Det tidsvarierende Coulombfelt fra prosjektilkjernen vil indusere elektroniske prosesser, såsom eksitasjon, ionisasjon, elektronoverføring til prosjektilet og videre eksempelvis e^+e^- pardannelse. Selv med denne enkle modell har vi for oss et trelegemesproblem som bare lar seg løse ved hjelp av approksimasjonsmetoder. Én metode går ut på å betrakte Coulombvekselvirkningen mellom det ene aktive

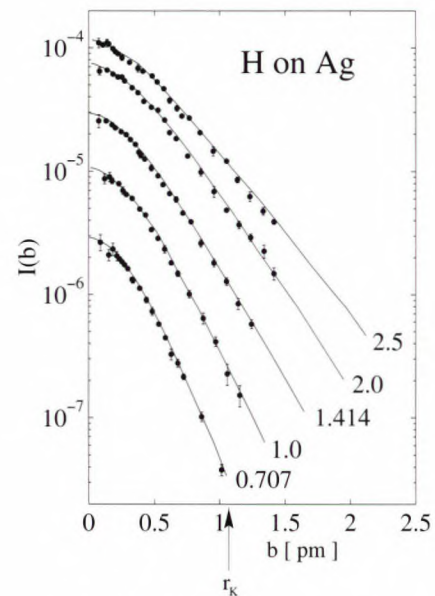
elektronet og prosjektilet som en svak forstyrrelse av systemet, hvilket under bestemte forutsetninger har ført til instruktive resultater [6].

I de senere år er det blitt vanlig innen atomær kollisjonsfysikk å bruke akronymet SCA (semiclassical approximation) for alle atomære kollisjonsmodeller som involverer bruken av klassiske prosjektilbaner [7].

Noen resultater basert på SCA-beskrivelsen

Med utgangspunkt i Niels Bohrs grunnleggende undersøkelse [1] ble den direkte Coulomb-ionisasjon av K-skallet, fremkalt av ladete prosjektiler som protoner, deuteroner eller α -partikler, gjenstand for en tidlig teoretisk behandling [6]. Basert på støtparameterformuleringen av SCA-modellen ble det påpekt at ved tilstrekkelig små prosjektilenergi er det den såkalte adiabatiske radius, r_{ad} , som er den avgjørende størrelse ved Coulombinduserte prosesser.

$$r_{ad} = \frac{1}{q_0} = \frac{\hbar v_1}{\Delta E} \quad (5)$$



Figur 3. Eksperimentell sannsynlighet $I(b)$ for K-skall ionisasjon av Ag med protoner som en funksjon av støtparameteren. Data basert på koinisidensmålinger [8] og med protonenergiene angitt i MeV.

Her betegner $\hbar q_0$ den klassisk minste impuls-overføring som er nødvendig for å overføre en energimengde ΔE til elektronet i kollisjonen. I det tilfellet at elektronet er bundet, altså tilfellet med ionisasjon, vil den resiproke lengde ha minimalverdien

$$q_0(\Delta E = E_B) = \frac{1}{r_{ad}} = \frac{E_B}{\hbar v_1} \quad (6)$$

hvor E_B er elektronets bindingsenergi. Det viser seg således at det dominerende bidrag til det differensielle ionisasjonsvernsnittet kommer fra støtparametre som tilnærmet er lik den adiabatisk radius eller mindre (men antallet av baner med små støtparametre er i seg selv lite). Den SCA-baserte forutsigelse er illustrert i Figur 2. Arealet under kurven $bI(b)$ er proporsjonalt med totalvernsnittet. Man skulle egentlig ha ventet at K-skall radien her skulle ha spilt en avgjørende rolle. Denne egenskap til r_{ad} er karakteristisk for Coulombfeltet ved tilstrekkelig lave prosjektilenergi. Egenskapen vil ikke være gyldig for potensialer som for eksempel den harmoniske oscillator.

Dette resultatet var lenge omstridt, men fikk sin bekreftelse ved koincidensmålinger mellom det spredte prosjektilet og den karakteristiske K-strålingen fra target. Målingene ble utført i Århus [8] og gav resultater som er skissert i Figur 3.

Parameteren κ er her av størrelsesorden 10, og kurvene har en form i forhold til r_K som forutsagt av den semiklassiske teori. Dette er en meget strengere test for modellen enn sammenligning med målinger av totalvernsnittene. Dog er det slik at nyere målinger av totalvernsnittene gir utmerket overensstemmelse med mer raffinerte SCA-regninger hvor det blant annet er brukt relativistiske bølgefunksjoner for targetelektronene [9].

En nyttig skaleringslov

Den semiklassiske kollisjonsmodell som er skissert ovenfor egner seg godt til ekstrahering av skaleringslover [6], [10]. Således lar det seg vise at for Coulombinduserte prosesser og for støtparametre som er tilstrekkelig store i forhold til den adiabatisk radius, vil følgende uttrykk gjelde for sannsynligheten av prosessene:

$$I(b) = \text{const} \exp[-2q_0(\Delta E)R_0(\theta)] \\ \rightarrow \text{const} \exp[-2q_0(\Delta E)b(\theta)] \quad (7)$$

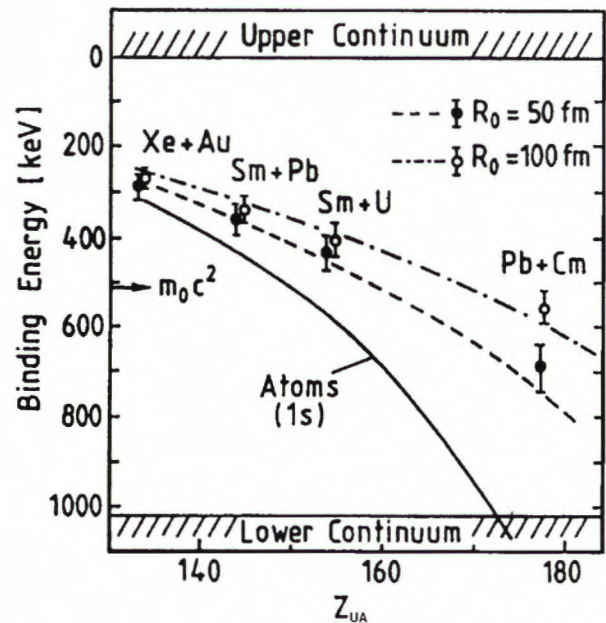
for

$$b \gg r_{ad} = \frac{1}{q_0}$$

Her er R_0 den minste avstand mellom de kolliderende kjerner slik som indikert i Figur 1. Dette er blitt kalt den kinematiske skaleringslov for Coulombprosesser fordi de kinematiske variable er konsentrert i eksponensialfunksjonen. Loven har funnet stor anvendelse, blant annet som redskap for spektroskopien av de super-tunge kvasiatomer [11] hvor $Z_1 + Z_2 = Z_{UA} > 137$. (UA: united atom). Et eksempel på bruk av loven er ekstrahering av de laveste bindingsenergiene for de transiente kvasiatomer som antas dannet ved kollisjoner mellom tunge ioner og atomer. Man kan eksperimentelt innrette seg slik at man opererer med like R_0 -verdier ved forskjellige verdier av prosjektilhastigheten. Fra

ligningene (4) lar det seg da utlede følgende uttrykk for den søkte bindingsenergi:

$$E_{1S\sigma}(R_0, Z_{UA}) = \frac{\hbar v_1}{2R_0(v_1 - v_1')} \ln \left(\frac{I_{1S\sigma}(b)}{I_{1S\sigma}(b')} \right) \quad (8)$$



Figur 4. K-bindingsenergi for transiente kvasiatomer som funksjon av $Z_{UA} = Z_1 + Z_2$ for minsteavstander $R_0=50$ fm og 100 fm. Eksperimentelle verdier ekstrahert fra målinger [12] ved bruk av den kinematiske skaleringslov og sammenlignet med teoretiske verdier [13].

I Figur 4 er vist resultater fra Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) i Darmstadt [12].

De eksperimentelle energiene er ekstrahert ved hjelp av formelen i (5) idet man har målt $I_{1S\sigma}(b)$ og $I_{1S\sigma}(b')$. De teoretiske kurvene er resultatet av kompliserte beregninger basert på løsningen av den relativistiske tosender Dirac ligning [13]. Den kinematiske skaleringslov gir således på en enkel og direkte måte opphav til tankevekkende resultater som er direkte sammenlignbare med utfallet av tidskrevende numeriske beregninger. Det er derfor ikke underlig at de semiklassiske modeller stadig utnyttes ved detaljstudiet av ione-atom kollisjoner [14].

Konklusjon

Sammenhengen mellom kvanteteorien og den klassiske fysikk var en av de viktigste problemstillinger i Niels Bohrs livsverk. De dyptpløyende teoretiske studier fra Bohrs hånd innen dette forskningsfelt har helt opp til dagen i dag ledet til mange nye og fruktbringende undersøkelser, både teoretisk og eksperimentelt. Vi tror at dette er en utvikling som vil fortsette. I denne artikkel har vi bare redegjort for et lite, spesialisert område innen feltet. Men vi konkluderer med å understreke at

Niels Bohrs skapende ideer har vært u-unnværlige redskaper under hele analysen, utviklingen og anvendelsen av de semiklassiske metoder.

Referencer:

- [1] N. Bohr: The Penetration of Atomic Particles Through Matter. Kgl. Dan. Vidensk.Selsk. Mat.-Fys. Medd. **18**, No. 8 (1948) og referanser gitt der. Se også Jens Thorsens artikkel i dette nummer av Kvant.
- [2] Semiclassical Descriptions of Atomic and Nuclear Collisions. Niels Bohr Centennial Conferences 1985. (Eds. J. Bang and J. De Boer) North-Holland, Amsterdam (1985).
- [3] K. Alder, A. Bohr, T. Huus, B. Mottelson and A. Winter: Study of Nuclear Structure by Electromagnetic Excitation with Accelerated Ions. Rev.Mod. Phys. **28**, 432 (1956).
- [4] T. Huus, J. H. Bjerregaard and B. Elbek: Measurements of Conversion Electrons from Coulomb Excitation of the Elements in the Rare Earth Region. Kgl.Dan.Vidensk.Selsk. Mat.- Fys. Medd. **30**, No. 17 (1956).
- [5] S. Messelt: K-Shell Ionization by Protons. Nucl.Phys. **5**, 435 (1958).
- [6] J. Bang and J.M. Hansteen: Coulomb Deflection Effects on Ionization and Pair-Production Phenomena. Kgl.Dan.Vidensk.Selsk.Mat.-Fys. Medd. **31**, No.13 (1959).
- [7] J. M. Hansteen and O. P. Mosebekk: Simultaneous Coulomb Ejection of K- and L-Shell Electrons by Heavy Charged Projectiles. Phys. Rev. Letters **29**, 1361 (1972).
- [8] J. U. Andersen, E. Lægsgaard and M. Lund: Impact-Parameter Dependence of K-Shell Ionization. Nucl. Instrum. Methods **192**, 79 (1982).
- [9] J. M. Hansteen, L. Kocbach and A. Graue: Total K-Shell Coulomb Ionization Cross Sections at Very Low Projectile Energies. Phys.Scripta **31**, 63 (1985).
- [10] J. Bang and J. M. Hansteen: Considerations on a Scaling Law Related to Ionization and Pair-Production Phenomena in Ion-Atom Collisions. Phys.Scripta **22**, 609 (1981).
- [11] P. Armbruster, H.-H. Behncke, S. Hagmann, D. Liesen, F. Folkmann, and P. H. Mokler: A Tool for Spectroscopy of Super-Heavy Quasimolecules ($Z_1+Z_2 > 137$). The Bang-Hansteen Scaling Rule. Z. Physik **A288**, 277 (1978).
- [12] P. Armbruster: Heavy Ion Collision Induced Characteristic X-Ray Production. - Cross Section Experiments, i: Quantum Electrodynamics of Strong Fields. (Ed. W. Greiner) p. 135 Plenum Press, New York (1983).
- [13] G. Soff, J. Reinhardt, W. Betz, and J. Rafelski: Systematic Investigations of Binding Energies of Inner-Shell Electrons in Superheavy Quasimolecules. Phys. Scripta **17**, 417 (1978).
- [14] J. M. Hansteen, J. P. Hansen, S. E. Nielsen and A. Dubois: On the Use of Semiclassical Theories for Differential Scattering in Inelastic Heavy Particle Collisions. Comments At.Mol.Phys. **32**, 57 (1995).

Vår beste takk til Ladislav Kocbach for råd og hjelp under utarbeidelsen av denne teksten.



Jens M. Bang er docent ved Niels Bohr Institutet for Astronomi, Fysik og Geofysik.



Johannes M. Hansteen er professor emeritus ved Fysisk institutt, Universitetet i Bergen.