

# Niels Bohrs vei til en kvanteteori for atomets struktur

Af Reidun Renstrøm, Fakultet for teknologi og realfag, Universitetet i Agder, Norge

2013 markerer 100 års jubileum for Niels Bohrs kvanteteori for atomet. I denne artikkelen følger vi Bohr fra han reiser til Cambridge for å studere metallenes elektronteori under ledelse av Thomson til han i mars 1913 sender første kapittel av trilogien “On the Constitution of Atoms and Molecules” til Rutherford for gjennomlesning. Denne artikkelen er tidligere publisert i det norske tidsskrift *Fra Fysikkens Verden* nr. 2, 2013.

## Innledning

Omtrent alle fysikkklærebøker på universitetsnivå introduserer atomfysikk i en historisk sammenheng. Hovedpunktene i denne versjonen er at Rutherford i 1911 foreslo, på bakgrunn av eksperimentelle resultater, en planetmodell for atomet; elektroner i sirkelbevegelse rundt en positivt ladd kjerne. Rutherfords modell skapte en krise i fysikken fordi klassisk fysikk forutsier at elektroner i sirkelbevegelse vil emitte stråling kontinuerlig, mens de følger en spiralbane inn mot kjernen! Denne motsetningen mellom teori og eksperimentelle fakta motiverte Bohr til å reise til Rutherford i Manchester for å utarbeide sine ideer sammen med han. Bohr løste problemet fordi han mente at nøkkelen til å forstå atomets indre struktur var å tolke atomenes linjespektre i lys av Einsteins nye fototeori. Hver linje, sa Bohr, representerer en bestemt energi og dermed en bestemt energiforskjell i atomet, altså må atomets energi være kvantisert. Denne historien er feil, likevel er den blitt en standard versjon om Bohrs atommodell [1].

100-års jubileet for Bohrs atommodell er en fin anledning til å gjøre en virkelig historie om Bohrs vei til kvantemodellen for atomet kjent for fysikere, studenter og lærere. Hovedkildene til denne fremstillingen er brev skrevet av Bohr til sin bror Harald og Ernest Rutherford og et notat som han skrev til Rutherford i juni-juli 1912. Disse finnes i Niels Bohr, *Collected Works* [2].

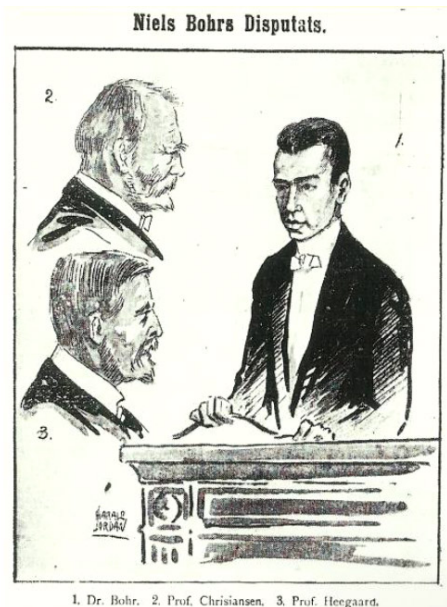


Figur 1. Niels Bohr (1885-1962) [3].

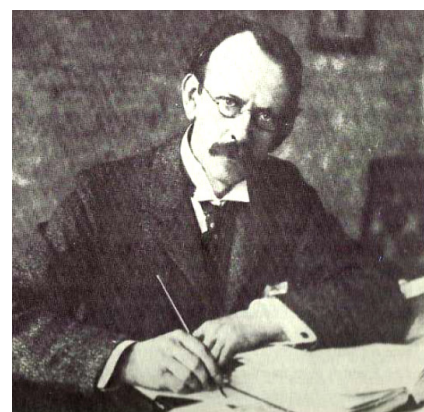
## Til Cambridge for å diskutere metallenes elektronteori

13. mai 1911 forsvarte Bohr med stor suksess sin doktoravhandling, “Studier over metallernes Elektrontheori”, som var en grundig gjennomgang og kritisk analyse av andre fysikers elektronteorier for egenskaper til metaller. Bohr fant feil i noen av teoriene, blant annet påpekte han at det teoretiske grunnlaget for John J. Thomsons beregninger av metallenes absorpsjonsevne ikke er riktig. Det var naturlig for Bohr å fortsette

studiet av elektronteorier for metaller, og da han fikk stipend fra Carlsbergfondet for et utenlandsopphold, valgte han å reise til Cambridge for å studere under ledelse av Thomson.



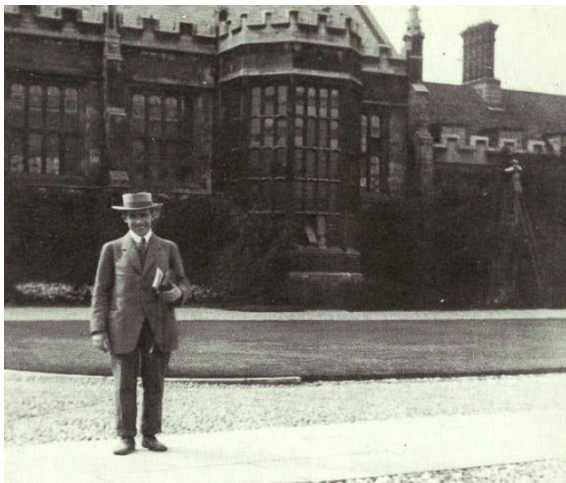
Figur 2. Bohr forsvare sin avhandling ved København universitet i mai 1911 [3].



Figur 3. John J. Thomson lederen av Cavendish Laboratory i Cambridge.

Seint i september 1911 satt han på fergen over Storebælt på vei til England og skrev til sin forlovede: “Jeg rejser ud med alt mit dumme vilde mod”. Den 26 år gamle post-doc- studenten håpet inderlig at Thomson ville lese avhandlingen (som hadde fått en røff

engelsk oversettelse) og innse hvor viktig det var å få den publisert. Det første møtet med Thomson svarte til forventningene, og Bohr skrev til broren Harald: "Aa Harald! Det gaar mig saa storartet. Jeg har lige talt med J J Thomson og forklaret ham saa godt jeg kunde min Mening om Strålingen, Magnetismen osv. Du skulle vide hvad det var for mig at tale med en saadan Mand...Han vil nu læse bogen (afhandlingen), og han indbød mig til at spise sammen med sig i Trinity College paa Søndag; saa vil han tale med mig herom." Bohr avslutter brevet med å skrive: "Men først og sidst er jeg saa glad og taknemmelig, at jeg ikke kan sige det, fordi min Afhandling er færdig og at jeg kunde give Thomson den."



**Figur 4.** En optimistisk og nyankommet Bohr foran universitetet i Cambridge [3].

Men direktøren for Cavendish Laboratories var ikke interessert i å lese avhandlingen eller diskutere gamle feil i en teori han ikke lenger var opptatt av, med en entusiastisk dansk student han nesten ikke forstod hva sa. Bohrs entusiasme blir etter hvert erstattet av en voksende skuffelse. I oktober skriver han til Harald: "Jeg har det så udmærket,... men han [Thomson] er meget vanskelig at komme til at snakke med. Han har endnu ikke haft Tid til at læse min Afhandling, og jeg ved endnu ikke om han vil gaa ind på min Kritik...naar man har talt et Øjeblik med ham, kommer han til at tænke paa et eller andet af hans egne Ting, og saa gaar han fra en midt i en Sætning." Bohr forteller at han kun en gang i et par minutter for en ukes tid siden fikk anledning til å påpeke sin kritikk av Thomsons beregninger for metallenes absorpsjonsevne, men at Thomson ikke har nevnt det siden. Bohrs dårlige engelsk skapte vanskeligheter for ham også i laboratoriet. "En stakkels udlænding, der ikke engang kender ordene for de ting, han ikke kan finde, er virkelig dårligt stillet" [4]. På tross av problemene med å få Thomson interessert i å diskutere metallenes elektronteori, skriver Bohr at han har det storartet og at han har meldt seg inn i en fotballklubb.

Thomson sørget for at avhandlingen ble sendt til tidsskriftet "Transactions of the Cambridge Philosophical Society" for mulig publikasjon. Nå var det bare for Bohr å vente på komiteens avgjørelse.

## Til Manchester for å lære om radioaktivitet

I november 1911 var Bohr i et selskap i Manchester hos en venn av sin avdøde far. En annen gjest var Ernest Rutherford, som ledet verdens førende senter for eksperimentell forskning i radioaktivitet i Manchester. I samtalen med Rutherford uttrykte Bohr at han var interessert å lære noe om radioaktivitet, og Rutherford svarte med å ønske han velkommen til Manchester.



**Figur 5.** Ernest Rutherford lederen for den eksperimentelle forskningen i radioaktivitet ved universitetet i Manchester.

I midten av mars 1912 reiste Bohr til Manchester hvor han straks gikk i gang med å ta laboratoriekurs i radioaktivitet. I et intervju i 1962 sa Bohr: "Da jeg kom til Manchester, tenkte jeg på, hvor deilig det ville blive at komme ind i radioaktivitetens teknik...Og jeg gik i et par uger til det kursus, de havde." Det var altså ikke fordi han var opptatt av Rutherfords kjernemodell for atomet at Bohr i mars 1912 reiste til Manchester.

Etter noen uker i Manchester mistet Bohr imidlertid interessen for laboratoriearbeidet Rutherford hadde satt han til, og han brukte mer tid til teoretisk arbeid. Det var fortsatt metallenes elektronteori som var i fokus for hans tanker, og han oppdaget stadig feil i nye artikler og det var derfor av stor betydning for Bohr at hans avhandling ble publisert. I mai 1912 kom brevet Bohr spent hadde ventet på i et halvt år, avgjørelsen fra bedømmelseskomiteen. Svaret var nedslående; i følge komiteen måtte avhandlingen kortes ned til det halve om den skulle være interessant for publikasjon! Bohr ble fortvilet og usikker på hva han burde gjøre. Skulle han sørge for en bedre engelsk oversettelse og imøtekomme komiteens krav om å korte den ned til det halve? Bohrs tid i England var snart over, uten at han hadde oppnådd det viktigste med oppholdet, nemlig å få avhandlingen offentliggjort. Arbeidene Thomson og Rutherford hadde satt han til, kom det heller ikke til å bli noen publikasjoner av. I et brev datert 27. mai skriver Bohr til Harald: "Jeg må desværre straks sige, at jeg endnu ikke er sikker paa hvor meget der vil komme ud af det, Rutherford har satt mig til. Jeg mener med Hensyn til Offentliggørelse." I dette brevet skriver Bohr om sin kritikk av eksisterende metallteorier med større entusiasme enn noen gang. Det er ingenting som tyder på at han etter to måneder i Manchester hadde blitt interessert i Rutherfords kjernemodell for atomet. Men så

skjedde det noe som fikk Bohr til å legge avhandlingen på hylla. Denne hendelsen fikk avgjørende betydning for Bohrs vitenskapelige liv og fysikkens utvikling. I begynnelsen av juni skriver Bohr begeistret til Harald om et arbeid hans venn og kollega Charles Darwin hadde utført og skrevet en artikkel om. Darwin hadde beregnet fartstapet til heliumkjerner ( $\alpha$ -partikler) når de passerer gjennom tynne gullfolier.

Grunnlaget, eller modellen, Darwin hadde gjort sine beregninger ut fra var Rutherfords kjernemodell. Eksperimenter med  $\alpha$ -spredning utført av fysikerne Hans Geiger og Ernest Marsden fra 1909 under ledelse av Rutherford viste at noen  $\alpha$ -partikler som passerte gjennom tynne gullfolier fikk banen sin avbøyd med  $90^\circ$  og mer. I artikkelen, "The Scattering of  $\alpha$  and  $\beta$  Particles by Matter and the Structure of the Atom" forklarer Rutherford de store spredningsvinklene ved å anta at atomer har en ladd kjerne. Han skriver: "Consider an atom which contains a charge  $\pm Ne$  at its centre surrounded by a sphere of electrification containing a charge  $\pm Ne$  supposed uniformly distributed throughout a sphere of radius  $R$ ...It will be shown that the main deductions from the theory are independent of whether the central charge is supposed to be positive or negative. For convenience, the sign will be assumed to be positive" [5]. Hovedpoenget i Rutherfords artikkel er at hvis atomets positive ladning er konsentrert i sentrum, slik den japanske fysikeren H. Nagaoka hadde foreslått allerede i 1904, kan  $\alpha$ -partiklenes avbøyning forklares. Kollisjoner med elektronene i atomet kunne ikke være årsaken til de store avbøyningsvinklene. I Rutherfords "modell" er elektronene *jevnt fordelt* omkring den positive ladde kjerna, og han sier ingenting om deres bevegelse. I alle tidligere atommodeller med elektroner, Jean Perrins planetmodell fra 1901, Thomsons modell fra 1904 og H. Nagaokas planetmodell fra 1904 beveger elektronene seg i sirkelbaner, men Rutherford sier altså *ingenting* om elektronenes bevegelse og derfor ble hans kjernemodell heller ikke betraktet som en fullstendig atommodell. Rutherfords modell fikk svært *liten* oppmerksomhet, og på Solvay-konferansen høsten 1911 der atomets struktur ble diskutert, nevnte ikke Rutherford sin egen modell. Bohr har fortalt at Rutherfords modell ikke ble nevnt noen steder. Forklaringen på dette kan være at Rutherfords artikkel først og fremst handlet om en modell som kunne begrunne resultatene fra  $\alpha$ -sprednings eksperimentene.

### Darwins artikkel om $\alpha$ -partiklenes fartstap

Darwin hadde utledet en teori for  $\alpha$ -partiklers fartstap når de passerer gjennom tynne metallfolier. Det er atomkjernen som forårsaker spredning av  $\alpha$ -partiklene, men det er kollisjoner med atomets elektroner som forårsaker  $\alpha$ -partiklenes fartstap. I Rutherfords modell er elektronene homogent fordelt rundt kjernen, og ut fra Darwins beregninger skulle det være mulig å avgjøre om elektronene var jevnt fordelt over atomets overflate eller volum.

En viktig antakelse i Darwins beregninger var at  $\alpha$ -

partiklene kolliderer med *frie* elektroner. Resultatene av hans beregninger viste at atomenes radius avtok med økende atomvekt og han fikk en altfor stor radius for de letteste atomene. Da Bohr leste artikkelen, forsto han med det samme hvorfor Darwins teoretiske beregninger viste disse svakhetene. Elektronene er *ikke* frie, men bundet til atomkjerna og elektronenes bevegelse har betydning for  $\alpha$ -partiklenes fartstap! Han skriver om dette til Harald 12. juni: "Det gaar mig ikke saa helt daarligt i Øieblikket, jeg havde for et Par Dage siden en lille Ide med Hensyn til Forstaaelsen af Absorption af  $\alpha$ -Straaler. Det gik til paa den Maade, at en Matematiker her, C.G. Darwin, (Sønnesønn af den rigtige Darwin) lige har offentliggjort en Theori om dette Spørmaal, og jeg syntes, at den ikke alene ikke var rigtig i det matematiske (det var kun temmelig lidt) men noget utilfredsstillende i Grundopfattelsen, og har udarbejdet en lille Theori derom, der selv om den er lille, maaske dog kan kaste lidt Lys over nogle Ting med Hensyn til Atomers Bygning. [...] Du kan tro at det er morsomt at være her, her er så mange at tale med."

### En travel ung mann

Bohr var overbevist om at elektronenes fart og binding til kjernen har betydning for energitapet  $\alpha$ -partiklene får i sammenstøtene. I sin egen beregning tar han hensyn til dette ved å betrakte atomet som en harmonisk oscillator, der elektronene er elastisk bundet til kjernen. Krefter utenfra vil sette systemet i vibrerende bevegelser. Langt viktigere enn å utarbeide en forbedret teori for  $\alpha$ -partiklers fartstap gjennom atomer er at Bohr blir opptatt av å utforske "Atomets Bygning" og legger doktoravhandlingen til side. I det neste brevet til Harald, datert 19. juni, skriver Bohr om atomets indre struktur med en entusiasme som tidligere var forbeholdt metallenes elektronteori. "Det kunde være at jeg maaske har fundet ud af en lille Smule om Atomernes Bygning. Du må ikke tale om det til nogen, for ellers kunde jeg jo ikke skrive saa tidligt til Dig om det... Det er altsammen vokset ud af en lille Oplysning jeg fik fra  $\alpha$ -Straalernes Absorption...Du kan tro, at jeg er ivrig efter hurtigt at gøre det helt færdigt, og derfor har jeg taget fri fra Laboratoriet for et Par Dage (det er ogsaa en Hemmelighed)." Bohr har altså fått det veldig travelt, han skulker laboratoriearbeidet og det neste brevet til Harald blir først sendt 17. juli: "Det går mig temmelig godt, for jeg tror jo, jeg har fundet ud af nogle forskellige Ting; men det er rigtignok ikke gaaet saa hurtig med at udarbejde dem, som jeg straks var saa dum at tro. Jeg haaber at faa en lille Afhandling færdig og at vise Rutherford den førend jeg rejser, og jeg har derfor så travlt, saa travlt."

### Rutherfordnotatet

Bohrs første ideer om atomstrukturen kjenner vi fra denne avhandlingen, kalt Rutherfordnotatet, kalt "On the Constitution of Atoms and Molecules". Bohr leverte notatet til Rutherford i juli 1912 for at han skulle lese gjennom det.

Bohr innleder notatet med å slå fast at for å kunne forklare de store spredningsvinklene til  $\alpha$ -partiklene, må atomet ha en kjerne, men at det i et slikt atom umulig kan forekomme likevektskonfigurasjoner hvis elektronene ikke er i bevegelse. Det første Bohr gjorde var derfor å diskutere rotasjonen av  $n$  elektroner i en ring rundt kjerna. Sentripetalkraften på et elektron er i følge klassisk fysikk

$$X \frac{e^2}{r^2} = m \frac{v^2}{r} = m\omega^2 r \quad (1)$$

der  $X = 1$  når det kun er ett elektron i ringen og større enn 1 for flere elektroner,  $m$  er massen til elektronet og  $e$  er ladningen,  $r$  er ringens radius og  $\omega$  elektronets omløpsfrekvens. Bohr konkluderer at denne ringen ikke er stabil ut fra klassisk fysikk, "it can very simple be shown, that a ring as the one in question possesses no stability in the ordinary mechanical sense...the question of stability may therefore be treated from a quite different point of view." Elektronene i ringen er ikke stabile mot små forstyrrelser. Modellen Bohr har valgt, er altså mekanisk ustabil. I tillegg til å være mekanisk ustabil hadde Bohrs modell enda et paradoks å by på: Det er umulig å beregne atomets størrelse ut fra denne modellen. I stedet for å gi opp modellen, innførte Bohr en hypotese som ikke kunne forklares innenfor klassisk fysikk: "for any stable ring (any ring occurring in the natural atom) there will be a definite ratio between the kinetic energy of an electron in the ring and the frequency of rotation. This hypothesis for which there will be given no attempt of a mechanical foundation (as it seems hopeless) is chosen as the only one which seems to offer a possibility to an explanation of the whole group of experimental results."

Hypotesen er altså at den kinetiske energien til et elektron i en ring er gitt ved  $E = K\omega$ , der  $K$  er en konstant og  $\omega$  er elektronets omløpsfrekvens. Ut fra denne hypotesen (som minner om Plancks uttrykk for energien til grunntilstanden til en oscillerende ladning) og klassisk mekanikk var det mulig å utlede et uttrykk for sirkelbanens radius, elektronets totale energi  $W$  og omløpsfrekvensen. Den totale energien til et elektron er gitt ved:

$$W = X^2 \frac{me^2\pi^2}{2K^2} \quad (2)$$

Konstanten  $K$  gir Bohr ingen bestemt verdi i dette notatet. Ut fra disse likningene kunne Bohr forklare mange eksperimentelt bestemte egenskaper til atomer. Det viktigste i dette notatet er at atomets mekaniske stabilitet ikke kunne forklares innenfor klassisk fysikk. Bohr introduserte en betingelse for stabilitet utenfor den klassiske fysikken, en sammenheng mellom elektronets kinetiske energi og omløpsfrekvensen. Bohr nevner imidlertid ikke problemet med strålingsustabilitet på grunn av elektroner i sirkelbevegelser i dette notatet. Atomenes linjespekter er han ikke interessert i å forklare. Det er egenskaper til atomene i normaltilstanden (grunntilstanden) som opptar han.

## Bohr i København

24. juli 1912 reiste Bohr fra Manchester tilbake til København. Han giftet seg 1. august med Margrethe og bryllupsreisen gikk først til Cambridge hvor Bohr gjorde ferdig artikkelen om absorpsjon av  $\alpha$ -partikler (som ble publisert i januar 1913), og deretter videre til Manchester. I september reiste paret tilbake til København (figur 6), og Bohr ble vitenskapelig assistent i fysikk ved Universitetet i København. Arbeidet på laboratoriet tok mye av Bohrs tid, og problemene med atomstrukturen fikk han lite tid til å gruble over.



Figur 6. Bohr på vei hjem til København 1912 [3].

Han skriver til Rutherford 4. november: "I am sorry not yet having been able to finish my paper on the atoms and send it to you, but till now I have had so much to do with some lecturing and laboratory work that I have had only little time left...I hope to be able to finish the paper in a few weeks." I det neste brevet til Rutherford, datert 31. januar 1913, understreker Bohr at han ikke er opptatt av å forklare atomenes linjespekter. "I do not at all deal with the question of calculation of the frequencies corresponding to the lines in the visible spectrum, I have only tried, on the basis of the simple hypothesis, which I used from the beginning, to discuss the constitution of the atoms and the molecules in their 'permanent' state; it means, I have tried to deduce simple general properties of the system in question, without – according to your advise – going into details calculations of any special system apart from the most simple."

I et brev skrevet 7. februar til George Hevesy, som Bohr ble kjent med i Manchester, forteller Bohr om innholdet i det arbeidet det haster med å få publisert. Fra innholdet i dette brevet er det mye som tyder på at Bohr nå har antatt at konstanten  $K$  er lik  $\frac{1}{2}h$  (Plancks konstant) og dermed er energiuttrykket for et elektron i en ring med ett elektron, altså hydrogenatomet er gitt ved:

$$W = X^2 \frac{2me^2\pi^2}{h^2} \quad (3)$$

Bohr hadde på dette tidspunktet en klassisk forestilling om mekanismen bak emisjon fra atomet. Han tenkte seg at spektrallinjene fremkom ved at et fritt elektron falt på plass i en bane, roterte om kjernen med en bestemt frekvens og vibrerte med karakteristiske frekvenser vinkelrett på banen. Spekterets linjer hadde samme frekvenser som vibrasjonsfrekvensene. Når strålingen var utsendt, falt elektronet til ro i en enkel sirkulær bevegelse om kjerne. Thomson og Nagaoga forklarte emisjon av stråling på samme måte i sine modeller. Bohr var ikke opptatt av å undersøke frekvensene i strålingen fra atomene, hans arbeid gikk ut på å forklare



egenskaper til atomene i deres permanente tilstand. Kvantefysikeren Leon Rosenfeld spurte Bohr i et intervju i 1962 hvordan han oppfattet spektrere før han ble klar over informasjonen de gav om atomstrukturen. Bohr svarte: "Man mente at spektrere var herlige, men at det var umulig å komme videre her. Ligesom når man har med en sommerfugls vinge at gjøre er den meget regelmessig med farver og så videre, men ingen troede, at man kunne nå ind i biologiens kerne ved hjelp av farverne på en sommerfugls vinge." Helt siden midten av 1800-tallet hadde mange fysikere utforsket egenskaper ved lyset som blir emittert fra atomer. Det mest interessante resultatet var at det emitterte lyset består av et sett med frekvenser, som enkelte linjer i et spekter og som er karakteristisk for det enkelte atomet. Men Bohr var altså ikke opptatt av å prøve å forklare denne egenskapen til atomene, først og fremst fordi han ikke trodde linjene i spektrere hadde noe å fortelle om atomets oppbygning.

### Balmers formel

6. mars sendte Bohr et utkast til Rutherford av første kapittel av artikkelen han så lenge hadde lovet. Tittelen var "On the Constitution of Atoms and Molecules". Rutherford må ha blitt svært overrasket da han leste artikkelen for den handlet nesten utelukkende om en forklaring på linjespektrere! Bohr hadde jo understreket flere ganger at han overhodet ikke var opptatt av å forklare frekvensene i strålingen fra atomene. Men Bohr hadde altså plutselig endret oppfatning. Hva hadde fått Bohr til å bli interessert i linjespektrere? I februar hadde Hans Marius Hansen kommet på besøk. Han var ekspert på atomspektrere og i samtalen spurte han Bohr om hans teori stemte overens med Balmers formel for frekvensene til linjene i hydrogenspekteret. Bohr, som ikke hadde vært opptatt av spektrere og ikke gjort noen beregninger for frekvensene i spektrere, måtte innrømme at han ikke kjente til denne formelen, men han lovet å finne ut av det. I 1885 hadde Balmer kommet frem til en matematisk formel for de empirisk bestemte frekvensene. Bohr hadde helt sikkert lært formelen på skolen, men altså glemt den. Balmers formel kan skrives på formen:

$$f = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (4)$$

der  $f$  er en linjes frekvens,  $R = 3,29025 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$  og kalles Rydbergs konstant og  $n$  er et naturlig tall større enn 2. Her svarer  $R$  til den moderne Rydberg konstant ganget med lysets hastighet!

Bohr har fortalt at straks han så Balmers formel forsto han mekanismen bak utsendelsen av stråling fra atomer. Det er sannsynlig at Bohr så likheten mellom Balmers formel og hans uttrykk for energien til elektronet i hydrogenatomet, ligning (3). Differansen mellom to energiuttrykk vil få samme form som Balmers formel! Ved å innføre flere baner med økende kinetisk energi gitt ved  $E_n = n(1/2)h\omega$ , der  $n = 1, 2, 3, 4, 5$  beregnet Bohr differansen mellom energien til to baner,

$n_2$  og  $n_1$ , til å bli:

$$W_{n_2} - W_{n_1} = \frac{2me^4\pi^2}{h^2} \left( \frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right) \quad (5)$$

Energitapet til atomet må være like stort som energien til strålingen. Bohr var nå et lite, men revolusjonerende skritt fra en formel for frekvensen i strålingen fra hydrogenatomet: Å løsrive strålingens frekvens fra mekaniske frekvenser i atomet! Han lot frekvensen til strålingen være gitt ved energiforskjellen mellom to tilstander dividert med Plancks konstant:

$$f = \frac{W_{n_2} - W_{n_1}}{h} = \frac{2me^4\pi^2}{h^3} \left( \frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right) \quad (6)$$

Bohr må ha vært spent da han regnet ut konstantleddet, og svært lykkelig da det viste seg at det var  $3,1 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$  omtrent lik Rydbergs konstant i Balmers formel.

Kapittelet Rutherford fikk tilsendt i begynnelsen av mars handlet nesten utelukkende om en kvanteteori for atomenes linjespekter. Bohr forklarte frekvensene i linjespekteret ut fra en revolusjonerende idé som innebar at strålingens frekvens er løst fra mekaniske frekvenser i atomet. I Plancks teori for oscillerende ladninger er energien kvantisert, men strålingen som emitteres har samme frekvens som ladningens oscillasjonsfrekvens. I Bohrs teori for atomet er frekvensen gitt ved forskjellen mellom to energitilstander. Det var vanskelig for Rutherford å akseptere. Bohr begrunner sin radikale antakelse i kapittelet på flere ulike måter, og Rutherford kommenterte i sitt svarbrev at Bohr burde forkorte artikkelen. Han minner Bohr på at lange artikler kan virke avskrekkende på mange, og at de ikke har tid til å lese dem. Rutherford skriver videre at han ser frem til å lese de neste kapitlene, men ber Bohr ta til seg hans råd om å fatte seg i korthet. Det hører med til historien at Bohr reiste til Rutherford og kjempet for hvert ord i artikkelen, som ble publisert i juli 1913.

### Korrespondanseprinsippet

Bohr begrunnet at konstanten  $K$  i uttrykket for kinetisk energi må være  $\frac{1}{2}h$  ut fra et prinsipp som senere ble kalt for korrespondanseprinsippet; at kvanteteorien må ha klassisk teori som et grensetilfelle. Han setter uttrykket for kinetisk energi:  $W = f(n)h\omega_n$  der  $f$  er en ukjent funksjon og  $\omega_n$  er omløpsfrekvensen i bane  $n$ . Men skal Bohr få noe som minner om Balmers formel, må han la  $f(n) = Cn$ , der  $C$  er en konstant. En overgang fra en tilstand hvor  $n = N$  til en tilstand  $n = (N - 1)$  gir stråling med frekvens:

$$\begin{aligned} f &= \frac{\pi^2 m e^4}{2C^3 h^3} \left( \frac{1}{(N-1)^2} - \frac{1}{N^2} \right) \\ &= \frac{\pi^2 m e^4}{2C^3 h^3} \left( \frac{2N-1}{N^2(N-1)^2} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

De tilsvarende omløpsfrekvensene for elektronet i banene med  $n = N$  og  $N - 1$  er:

$$\omega_N = \frac{m e^4 \pi^2}{2C^2 N^3 h^3} \quad (8)$$

og

$$\omega_{N-1} = \frac{me^4\pi^2}{2C^2(N-1)^3h^3} \quad (9)$$

Hvis  $N$  er stor, skriver Bohr, vil forholdet mellom elektronets omløpsfrekvens før og etter emisjonen være omtrent lik 1, og i følge klassisk fysikk skulle vil forvente at forholdet mellom frekvensen til emittert stråling og omløpsfrekvensen til elektronet også skulle bli svært nær 1.

$$\frac{f}{\omega_N} = \frac{CN^3(2N-1)}{N^2(N-1)^2} \quad (10)$$

går mot  $2C$  for store  $N$  og er lik 1 dersom  $C = \frac{1}{2}$ . Dette prinsippet, altså at kvanteteorien skal ha klassisk fysikk som et grensetilfelle, fikk stor betydning for kvantefysikkens utvikling.

### Mottakelse

For noen fysikere var det utenkelig at Bohrs forklaring på atomenes linjespekter kunne være riktig. Stråling fra atomer burde i følge Maxwells teori komme fra elektronenes vibrasjoner, men Bohrs idé innebærer at strålingen fra atomene har en helt annen forklaring. Blant fysikerne som ganske tidlig trodde på Bohrs forklaring var Albert Einstein. Han reaksjon var: "Så avhenger altså ikke frekvensen i lyset som sendes ut fra et atom med frekvensen til elektronet i atomet. Dette er et enormt fremskritt". Den unge fysikeren Henry Moseley skrev om Bohrs nye atommodell: "Deres teori har en storartet innflytelse på fysikken, og jeg tror at når

vi virkelig vet hva et atom er, hvilket vi utvilsomt gjør om et par år, vil Deres teori ha en stor del av æren, selv om den måtte være feil i sine detaljer."

Bohrs modell viste seg ganske snart å være feil i sine detaljer, men den revolusjonerende ideen om at frekvensen til strålingen fra et atom er gitt ved energidifferansen mellom to energitilstander i atomet gjelder ennå.

### Litteratur

- [1] Renstrøm, R. (2011), Kvantefysikkens utvikling. Avhandling for graden PhD. Universitetet I Oslo
- [2] Niels Bohr, *Collected Works* (Vol 1 og 2). Amsterdam: North-Holland Publishing Company (1972) og (1974)
- [3] Niels Bohr Arkivet, København, <http://www.nba.nbi.dk>
- [4] Pais, A. (1996), Niels Bohr og hans tid i fysik, filosofi og samfundet: Spektrum. p. 138
- [5] Rutherford, E. J. (1911), The Scattering of  $\alpha$  and  $\beta$  Particles by Matter and The Structure of the Atom. *Philosophical Magazine*, **21**, 669.



Reidun Renstrøm er førsteamanuensis ved universitetet i Agder, hvor hun underviser i klassisk mekanikk og kvantefysikkens historiske utvikling. Hennes doktorgradsarbeid handler om hvordan kvantefysikkens utvikling blir feil fremstilt i lærebøkene.