

# Disertační práce Nielse Bohra o elektronové teorii kovů

Kateřina Šraitrová

Fakulta chemicko-technologická, Univerzita Pardubice, Studentská 573, 532 10 Pardubice

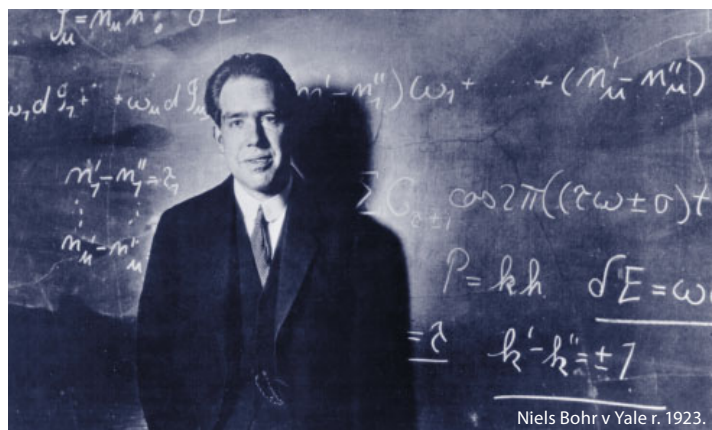
Článek se zabývá disertační prací Nielse Bohra, kterou obhájil roku 1911. V první části je nastíněn vývoj Bohrovy disertační práce a jeho snahy práci přeložit do angličtiny. Dále Bohrův pobyt v Cambridge u J. J. Thomsona a důvody, proč se nakonec rozhodl strávit zbytek svého zahraničního studijního pobytu v Manchesteru u E. Rutherforda. Druhá část příspěvku shrnuje historii vývoje elektronové teorie kovů. Nakonec jsou uvedeny závěry, ke kterým Bohr došel a ze kterých můžeme vyzdvihnout ten, že klasická mechanika je pro objekty na atomární úrovni nedostatečná.

Problematikou elektronové teorie kovů se Niels Henrik David Bohr začal zabývat již v absolventské práci pro získání titulu M.Sc. (Master of Science). Součástí zkoušek bylo sepsání práce na zadané téma a na její vypracování měli studenti přesně šest týdnů. Bohr byl potěšen, když mu profesor Christian Christianesen zadal: „Referuj o použití elektronové teorie k vysvětlení fyzikálních vlastností kovů.“ [1, s. 94] Během sepsování práce se Bohr do tématu opravdu ponořil, prostudoval řadu publikací zabývajících se touto problematikou a také v nich našel chyby. Téma jej zaujalo natolik, že se v něm rozhodl pokračovat i ve své disertační práci.

Svou disertační práci *Studie o elektronové teorii kovů* (Studier over metallernes elektrontheori) obhájil Niels Bohr dne 13. května roku 1911 na Kodaňské univerzitě. Jednalo se o čistě teoretickou práci, která představovala více než dva roky soustředěného úsilí. Z každé stránky na nás dýchá autorova pečlivost a erudovanost. To je také důvod, proč Bohrovi oponenti měli při obhajobě jen velmi málo otázek, takže obhajoba skončila již za devadesát minut, i když mohla trvat až šest hodin [2, s. 213–214].

Nicméně obhajobou pro získání titulu „doktora filosofie“ (Dr. Phil.) práce nekončila. Bohr vlastnil vydání se spoustou čistých stran, na které zaznamenával stále další a další revize textu. Neustále přepisoval věty a odstavec. Některé dodal, jiné naopak smazal. Těmto úpravám se věnoval především během léta roku 1911, kdy s pomocí svého přítele Carla Christiana Lautrupa připravoval překlad práce do angličtiny. V září téhož roku měl odcestovat na studia do Cambridge a svoji práci chtěl předložit Josephu Johnu Thomsonovi, objeviteli elektronu a autorovi tzv. Thomsonova modelu atomu, který se problematikou elektronové teorie kovů také zabýval. Překlad byl ovšem i přes usilovné snahy obou překladatelů jazykově velmi nedokonalý [1, s. 293].

Vzhledem k tomu, že se práci nepodařilo vydat v angličtině, a to ani za pobytu v Cambridge či Manchesteru, došlo k situaci, kterou shrnuje Jeans Rud Nielsen slovy: „Tak je jeho důležitý výsledek, který můžeme najít

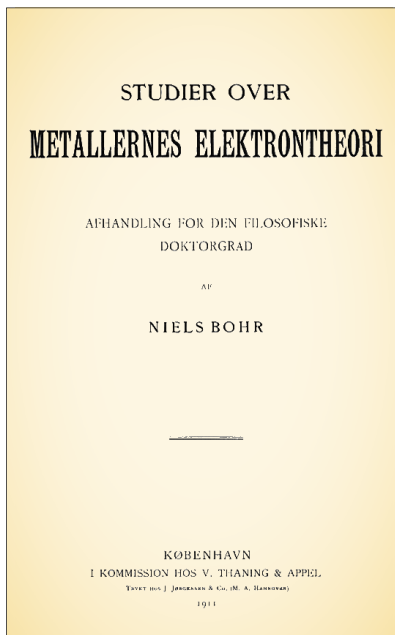


už v jeho absolventské práci, že klasická statistická fyzika nemůže vysvětlit magnetické vlastnosti látek, často připisován slečně van Leeuwen, která ho nezávisle objevila o nějakých deset let později.“ [1, s. 93]

## Pobyt v Cambridge

Po příjezdu do Cambridge Thomson Bohra zdvořile přijal a přislíbil mu, že si jeho práci přečte. Bohr byl nadšen. V dopise ze dne 29. září 1911 bratru Haraldovi napsal: „Právě jsem mluvil s J. J. Thomsonem a vysvětlil jsem mu, jak nejlépe jsem mohl, můj pohled na radiaci, magnetismus atd. Můžeš si představit, co pro mě znamenalo mluvit s takovýmto mužem. Byl ke mně velmi laskav, mluvili jsme o spoustě věcí a snad si myslím, že na tom, co jsem řekl, něco je. Slíbil mi, že si přečte moji disertaci a pozval mě, abych s ním příští neděli povečeřel v Trinity College, kde se mnou o práci promluví. [...] Nemohu Ti říci, jak jsem šťastný a vděčný, že je překlad mé disertace hotov a mohl jsem jej předat Thomsonovi.“ [3, s. 27] Bohr měl ale pravděpodobně od Thomsonova zájmu o jeho disertaci moc velká očekávání a později nebyl schopen přimět profesora promluvit si o jiných věcech než o byrokratických formalitách [3, s. 29].

Bohr neustával v překladu disertace ani v Cambridge, kde našel pomocníky: „Strávil jsem nádherný večer,



**Obr. 1** Úvodní strana Bohrovy disertační práce. (Převzato z [9].)

*kdy jsem seděl a povídal si s výjimečným anglickým fyzikem, který mi pomáhá projít moji disertací,*“ napsal dne 13. října 1911 své snoubence Marghrete Nørlund [3, s. 32]. Z dopisu jeho bratřovi ze dne 23. října 1911 se dozvídáme, že jeho novým známým byl Edward Augustine Owen, který se brzy stal jeho nejbližším přítelem v Cambridge. V tom samém dopisu se dozvídáme, že „Thomson ještě neměl čas přečíst si moji disertaci a stále nevím, zda bude souhlasit s mojí kritikou. Povídal si se mnou o tom jen párkrát na několik minut a pouze o mé kritice jeho výpočtu absorpce tepelného záření. Možná si vzpomínáš, že jsem poznamenal, že v jeho výpočtu absorpce (na rozdíl od emise) nevzal v úvahu čas, který zabírají kolize, a proto dostává hodnotu poměru emise a absorpce, který je řádově špatně pro vysoké frekvence. Thomson řekl, že si nemyslel, že by čas kolizí mohl mít tak velký vliv na absorpci; snažil jsem se o vysvětlení a další den jsem mu dal velmi jednoduchý příklad (korespondující s jeho výpočtem emise), který to ukázal velmi jasně. Od té doby jsem s ním mluvil jen na moment a to před týdnem. Myslím, že si myslí, že je můj výpočet správný, ale nejsem si jist, zda nevěří, že můžeme navrhnout mechanický model, abychom vysvětlili zákon tepelného záření na obvyklých elektromagnetických principech.“ [1, s. 526–533]

Na začátku listopadu se Bohr vydal do Londýna navštívit svého přítele Lautrupa. Z Londýna pokračoval do Manchesteru, kde se setkal s Lorrainem Smithem, který strávil nějaký čas v Kodani v laboratoři Bohrova otce Christiana. Bohr se evidentně cítil více doma v Londýně a v Manchesteru, než v Cambridge [3, s. 34]. V dopisu své matce Ellen Bohrové ze dne 8. ledna 1912 píše, že během svého pobytu v Manchesteru byl Lorrainem představen Ernestu Rutherfordovi, profesovi experimentální fyziky na tamní univerzitě, který se právě vrátil ze Solvayské konference [3, s. 34]. Opět se setkali v prosinci na každoroční večeři výzkumných studentů v Cavendishově laboratoři. Bohr byl uchváten Rutherfordovou řečí a jeho osobností a začal zvažovat možnost strávit část svého postgraduálního pobytu v Manchesteru [2, s. 233].

Přesto, že Joseph J. Thomson přislíbil Bohrovi, že si jeho disertaci přečte, pravděpodobně si práci nikdy nepřečetl a Bohr se rozhodl odejít do Manchesteru

k Rutherfordovi. Podle Moora někteří toto rozhodnutí označují jako „uvědomělou volbu mezi hořkým zklamáním v Cambridge a jasným příslibem v Manchesteru, mezi zastaralou viktoriánskou fyzikou nedostupného Thomsona a odvážnými myšlenkami otevřeného a zemitého Rutherforda“ [4, s. 31–39]. Sám Bohr se o obou fyzicích v dopise své snoubence ze dne 26. února 1912 vyjadřuje následovně: „Rutherford je opravdu mužem první třídy a je extrémně schopný, v mnoha ohledech schopnější než Thomson, i když je možná méně nadaný. J. J. Thomson je ohromný muž a naučil jsem se toho spoustu z jeho přednášek; mám jej moc rád a více Ti o něm povím, než opustím Cambridge.“ [3, s. 66] Jisté je, že toto rozhodnutí ovlivnilo Bohrovu vědeckou dráhu tak, že o rok později mohl přijít se svou *Konstitucí atomů a molekul* [5, 6, 7, 8].

### Elektronová teorie kovů

Kovy tvoří speciální skupinu látek schopných vést elektrický proud a jsou označovány jako vodiče I. řádu. Mezi jejich výjimečné vlastnosti, které je odlišují od jiných látek, patří vysoká vodivost, ale také fakt, že průchod elektrického proudu kovy není doprovázen žádným viditelným přenosem hmoty, jako je tomu v případě jiných dobrých vodičů. Tento jev je vysvětlován existencí elektronů – malých elektricky nabitých částic, které se uvnitř kovu chaoticky pohybují od jednoho atomu k druhému.

Kořeny elektronové teorie kovů sahají hluboko do devatenáctého století. Ve svých pracích se jí zabýval například André-Marie Ampér nebo Wilhelm Eduard Weber. Hlavní rozvoj nicméně nastal až po objevu elektronu, který učinil roku 1897 J. J. Thomson. Jak píše John Lewis Heilbron a Thomas Samuel Kuhn: „Tehdy se z ní stalo jedno z nejméně vzrušujících, slibných, a populárních odvětví fyziky.“ [2, s. 214]

Velký pokrok nastal roku 1900 díky Paulu Drudemu, který ve svém článku *O elektronové teorii kovů* (Zur Elektronentheorie der Metalle) pro časopis *Annalen der Physik* jako první aplikoval výsledky kinetické teorie plynů na pohyb volných elektronů v kovech. První detailní a systematický popis této teorie podal roku 1905 Henrik A. Lorentz ve své publikaci *Pohyb elektronů v kovových tělesech* (The Motion of Electrons in Metallic Bodies). Lorentzova teorie spočívala na dvou základních principech: 1. Při absenci vnějších polí či rozdílů teplot zůstává elektronový plyn a stacionární molekuly kovu v mechanické a teplotní rovnováze. 2. Ať je či není předmět vystaven vnějšími silami, molekuly izotropně působí na elektrony [2, s. 214].

Bohr považoval Lorentzovu teorii za stěžejní a ve své práci vycházel z jejích poznatků. Na rozdíl od Lorentze se však snažil o co největší obecnost: „[...] zatímco je Lorentzova teorie matematicky perfektní, fyzikální předpoklady, na kterých je založena, mohou být stěžejní považovány za platné, dokonce i jen přibližně, pro reálný kov. Navíc v mnoha základních bodech je shoda mezi teorií a experimentálními výsledky neuspokojivá. Bylo by zajímavé vytvořit elektronovou teorii kovů založenou na obecnějších předpokladech a prošetřit, které výsledky teorie jsou spojeny se speciálními předpoklady a které výsledky zůstanou nezměněny, pokud se přijmou obecnější předpoklady.“ [1, s. 299] V samotném úvodu své práce nás seznamuje se svým záměrem: „Cílem předložené práce je pokusit se v co největší obecnosti provést výpočty pro různé jevy, které jsou vysvětleny přítomností



**Obr. 2** Zpráva z obhajoby Bohrovy disertace publikované v kodaňských novinách Dagbladet. (Převzato z [1, s. 99].)

volných elektronů v kovech s tím, aby byla zachována základní hlediska podírající Lorentzovu teorii. [...]“ [1, s. 299–300] V úvodu Bohr také shrnuje předpoklady, ze kterých ve své práci vychází: „[...] dále budeme předpokládat, že volné elektrony jsou přítomny v každé části kovu, jejich počet závisí na druhu a teplotě kovu, ale jejich druh je stejný ve všech kovech. Budeme dále předpokládat, že mechanická tepelná rovnováha bude existovat mezi volnými elektrony a atomy v homogenním kusu kovu o jednotné teplotě a nebude podléhat vnějším silám. [...] Navíc k těmto obecným předpokladům budeme v následujícím předpokládat, že vlastnosti jednotlivých atomů kovu jsou v průměru stejné ve všech směrech a že tato isotropie zůstane zachována nezávisle na přítomnosti vnějších sil [...]“ [1, s. 300]

**Vlastní práce**

Samotná disertační práce je rozdělena do čtyř částí. V první části *Odvození rovnic pro pohyb elektronů* Bohr vyzvojuje rovnice pro kolektivní pohyb elektronů. Rozlišuje mezi případy, v rámci nichž jsou předpokládány samostatné srážky elektronů nebo atomů, a mezi případy, kdy tyto srážky předpokládány nejsou. Část *Zpracování stacionárních stavů* se zabývá především tokem elektřiny a energie, elektrickou a tepelnou vodivostí a také termoelektrickými jevy. Na tyto problémy jsou aplikovány rovnice pro pohyb elektronů z předchozí kapitoly. Bohr zde poukazuje na zjištění, že „obecnější teorie může vysvětlit rozpor mezi pozorovanými hodnotami pro poměr mezi elektrickou a tepelnou vodivostí a hodnotou pro tento poměr vypočtenou Lorentzem“ [1, s. 393]. Onen rozpor mezi naměřenými daty a Lorentzovými výpočty se pohybuje kolem 40 %.

Z hlediska svých závěrů je velmi zajímavá kapitola třetí *Zpracování nestacionárních stavů*. Řeší se zde absorpce a emise tepelného záření. Lorentz odvodil výraz pro poměr koeficientu absorpce a emise, který je však platný pouze pro dlouhé vlny. Problém nastává u vln krátkých. Bohr jej vysvětluje takto: „[...] zdá se nemožné vysvětlit zákon tepelného záření, pokud budeme trvat na udržení základních předpokladů podepírajících elektromagnetickou teorii. Je to dáno pravděpodobně tím, že elektromagnetická teorie není v souladu s reálnými podmínkami a můžeme dosáhnout správných výsledků pouze tehdy, pokud je aplikována na velké množství elektronů (jak je tomu v běžných předmětech), nebo pro stanovení průměrné rychlosti jediného elektronu přes poměrně dlouhé časové intervaly (jako ve výpočtu pohybu katodových paprsků), ale nemohou být použity na studování pohybu jediného elektronu během krátkých časových intervalů.“ [1, s. 378]

V poslední části *Vliv magnetického pole* jsou diskutovány účinky magnetického pole na pohyb volných elektronů v kovu. Zatímco Joseph J. Thomson předpokládal, že volné elektrony mohou zapříčinit diamagnetické vlastnosti, tak Bohr tvrdí, že „přítomnost volných elektronů v kovu nezapříčiní vznik diamagnetických ani paramagnetických vlastností. Dále je ukázáno, že výpočty galvanomagnetického efektu založené na obecnějších předpokladech jsou v lepším souladu s experimenty, než výpočty založené na předpokladech použitých Lorentzem.“ [1, s. 393]

**Závěr**

Již ve své disertační práci tak Niels Bohr naznačuje neúčinnost klasické mechaniky pro popis objektů na atomární úrovni. Tyto myšlenky dále rozvinul v Manchesteru pod vedením Ernesta Rutherforda. Vše pak vyvrcholilo jeho zmíněným stěžejním dílem z roku 1913 *O konstituci atomů a molekul*.

**Literatura**

- [1] J. R. Nielsen: *Niels Bohr: Collected Works I*. North-Holland, Amsterdam 1972.
- [2] J. L. Heilbron, T. S. Kuhn: „The genesis of the Bohr atom“, *Historical Studies in the Physical Sciences* 1, 211 (1969). Dostupné z WWW: <http://www.jstor.org/stable/27757291>.
- [3] F. Aaserund, J. L. Heilbron: *Love, Literature and the Quantum Atom: Niels Bohr's 1913 Trilogy Revisited*. Oxford: Oxford University Press, 2013.
- [4] R. Moore: *Niels Bohr: The Man, his Science and the World They Changed*. New York, 1966.
- [5] N. Bohr: „On the constitution of atoms and molecules, Parts I.–III.“, *Philosophical Magazine*, 6th Ser., 26, 1, 476 a 857 (1913). Přetištěno v: L. Rosenfeld, U. Hoyer (eds.): *Niels Bohr, Collected Works, Volume 2: Work on Atomic Physics (1912–1917)*. Elsevier, Amsterdam – New York – Oxford 1981, s. 160–234.
- [6] P. Čermák: *O struktuře atomů a molekul Nielse Bohra*. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Fakulta chemicko-technologická, Pardubice 2013. Dostupné z WWW: [www.nielsbohr.webnode.cz](http://www.nielsbohr.webnode.cz).
- [7] F. Grygar: „Historická, filosofická a fyzikální reflexe Bohrova převratného kroku z roku 1913“, *DVT – Dějiny věd a techniky* 46, 3 (2013). Dostupné z WWW: <http://issuu.com/sdvt/docs/dvt131>.
- [8] H. Kragh: *Niels Bohr and the Quantum Atom: The Bohr Model of Atomic Structure, 1913–1925*. Oxford University Press, Oxford 2012.
- [9] Niels Bohr Archive. *Niels Bohr Institute* [online]. 2014 [cit 2014-01-12]. Dostupné z WWW: <http://www.nba.nbi.dk>.

» Bohrova disertace o teorii kovů ukazuje limity klasické fyziky při popisu vlastností daných mikroskopickou strukturou studované soustavy. «