

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Juraj Šebesta; Rudolf Zajac

Storočnica Nielsa Bohra. I. Bohrov model atómu

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 30 (1985), No. 3, 121--130

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/138973>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1985

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

Storočnica Nielsa Bohra

I. Bohrov model atómu

Rudolf Zajac a Juraj Šebesta, Bratislava

Rozvoj fyziky prvej polovice dvadsiateho storočia je spätý s dvoma osobnosťami: Albertom Einsteinom, ktorého storočnicu sme si nedávno pripomenuli, a Nielsom Henrikom Davidom Bohrom. Ak by dramatik pre svoju hru o rodiacej sa novej vede sledoval zámer vykresliť diametrálne odlišné postavy, vybral by si Einsteina a Bohra. Prvý prežíval búrlivú mladosť, nezmaturoval, neurobil na prvý raz prijímaciu skúšku na vysokú školu, bol dvakrát ženatý. Bol autsajder medzi fyzikmi, pri odchode z Úradu pre patenty a vynálezy mu ani nenapísali do posudku, že popri povinnostiach experta tretej a potom druhej triedy sa zaoberal vedou (hoci v jednom roku stvoril tri epochálne práce).

Druhý pochádzal z harmonicky žijúcej rodiny univerzitného profesora, bol vynikajúci študent, družný športovec, ktorý po úspešnom dovŕšení vysokoškolského štúdia stážoval v Mekke rodiacej sa atómovej fyziky, v Cambridgei, u laureáta Nobelovej ceny J. J. Thomsona. Zaradil sa do školy druhého laureáta Nobelovej ceny Ernesta Rutherforda, šťastne sa oženil a dožil sa zlatej svadby v kruhu svojich detí a vnúčat.

Aj spôsob, ktorým obaja ovplyvnili nastupujúcu generáciu tvorcov modernej fyziky, bol odlišný. Einstein – samotár, ktorý tvoril dakde v odlúčenosti – fascinoval napísaným slovom. Vari nebolo v prvých desaťročiach nášho storočia významného fyzika, ktorý by sa nenaučil pozerat' sa na svet cez okuliare Einsteinovej teórie relativity.*)

Ak Einstein aj v neskorších rokoch iba sporadicky spolupracoval a publikoval s inými**), Niels Bohr založil školu. Kodanská škola je pojem, ktorý vošiel do dejín. Popísalo sa o nej veľa papiera z pera zasvätených aj nezasvätených, z pera vedeného duchom tejto školy, aj z pera namočeného do žlče. Na tomto mieste uvedieme, ako ju videli a vnímali detské oči. Hans Bohr [2] napísal o tom, že spomienky detí Nielsa Bohra sa spájajú s mnohými „ujami“ rôznych národností, ktorí k nim chodili do domu alebo do chalupy v Tisvilde, kde sa cez pracovné prestávky s nimi spolu hrali a športovali. Deti Nielsa Bohra dobre poznali uja Kramersa, uja Kleina, uja Hevesyho, uja Nishinu

*) Spomeňme spomedzi mnohých M. BORNA, M. VON LAUEHO, L. DE BROGLIEHO, W. PAULIHO, P. A. M. DIRACA i E. FERMIHO alebo E. SCHRÖDINGERA.

**) Výpočet Einsteinových spoluautorov (aj s krátkymi životopisnými údajmi) uvádza A. PAIS [1]. Pravda, Einstein mal viacero dôverných a blízkych priateľov z radov fyzikov aj nefyzikov, o čom svedčí tiež bohatá korešpondencia, ale pracoval zväčša sám.

a uja Heisenberga. Prvý bol Holanďan, druhý Švéd, tretí Maďar, štvrtý Japonec a posledný Nemeč. Z Bohrovej školy vyšli viacerí neskorší nositelia Nobelovej ceny. Okrem už spomínaného laureáta Nobelovej ceny W. Heisenberga (o dva mesiace starší Bohrov vrstovník Hevesy bol skôr kolegom ako žiakom N. Bohra) boli to najmä W. Pauli, P. A. M. Dirac, F. Bloch, L. D. Landau a napokon aj jeho syn Aage Bohr.

A tak Einstein aj Bohr, každý svojím spôsobom postavili stĺpy, na ktorých stojí stavba súčasnej fyziky.

Bohrove začiatky

Niels Henrik David Bohr sa narodil 7. októbra 1885 v Kodani v rodine univerzitného profesora fyziológie Christiana Bohra (1855 – 1911) a jeho bývalej žiačky Ellen, rodenej Adlerovej (1861 – 1932). Bola to harmonicky žijúca rodina, v ktorej otec i matka, ale aj stará mama Adlerová a slobodná teta – učiteľka, urobili všetko pre rozvoj schopností detí. Niels Bohr mal staršiu sestru Jenny a mladšieho brata Harald*) , s ktorým spolu rástol. Z korešpondencie medzi bratmi vidno, že Harald**) bol najbližším dôverníkom N. Bohra. Jeho otec, profesor Christian Bohr, sa priklonil k fyziológom, ktorí zavrhlí staršie vitalistické názory a hľadali fyzikálne vysvetlenie pre procesy prebiehajúce v živých organizmoch. Mal dobre vybudované laboratórium, ktoré mal mladý Niels ako vysokoškolák k dispozícii. Otec tiež vedel vycítiť, kedy mal syn už dostatok nazbieraného experimentálneho materiálu a podnietil ho v pravý čas, aby dal výsledky svojich výskumov na papier. Všetko to, čo charakterizovalo N. Bohra v neskorších rokoch, si priniesol z domu, včítane záujmu o turistiku a športy. Christian Bohr založil v Kodani futbalový klub Akademisk Bold Klub a jeho synovia Harald a Niels sa zaradili medzi futbalových reprezentantov krajiny.***) Rutherford potom v Manchestri hovorieval o Nielsovi Bohrovi ako o „našom futbalistovi“. Záľubu riešiť problémy v diskusiách a v oponentúre tiež prevzal Niels Bohr z otcovho pracovného štýlu. Napokon v rodičovskom dome si Niels a Harald Bohrovci osvojili humanistický pohľad na národné a medzinárodné, svetonázorové a spoločenské problémy.

Niels Bohr úspešne absolvoval v r. 1903 strednú školu a zapísal sa na štúdium matematiky, filozofie a fyziky****) na univerzite v Kodani. Prvá jeho práca bola experimentálna, podujal sa na ňu ako poslucháč tretieho ročníka, keď Akadémia vied a umení v Kodani vypísala súťaž na určenie povrchového napätia kvapalín.

*) HARALD BOHR sa narodil 22. 4. 1887 v Kodani. Bol profesorom a vedúcim Matematického ústavu na univerzite v Kodani. Zomrel 22. 1. 1951 v Kodani.

***) Blížšie o tom v [3].

****) Harald Bohr získal striebornú medailu na olympiáde v Londýne v r. 1908 ako člen dánskeho futbalového mužstva, ktoré skončilo v súťaži na druhom mieste.

*****) Filozofiu na univerzite v Kodani vtedy prednášal HARALD HØFFDING, ktorý upriamil pozornosť svojich poslucháčov na dve protichodné postavy v dejinách filozofie: Barucha Spinozu a Sørensa Kierkegaarda. Vedúcim katedry fyziky bol profesor CHRISTIAN CHRISTIANSEN (1843–1917), ktorý nezávisle od iných objavil anomálnu disperziu svetla. Zapísal sa tiež do histórie čierneho žiarenia. V r. 1884, teda ešte pred Wienom a Lummerom, skúmal absorpciu viditeľného svetla pomocou dutiny s malým otvorom, ktorým simuloval čierne teleso [4].

Lord Rayleigh v r. 1879 ukázal, že povrchové napätie kvapalín možno určiť z vibrácií kvapiek kvapaliny. N. Bohr upresnil Rayleighovu metódu, vyhotovil si dômyselné experimentálne zariadenie a uskutočnil presné merania. Prácu, odovzdanú vo februári 1905, odmenila Akadémia zlatou medailou.*) K tejto práci sa N. Bohr vrátil v r. 1936, keď vypracoval kvapkový model atómového jadra, takže aj v tomto prípade sa uplatnila zásada: „Čo sa v mladosti naučíš, po rokoch ako keby si našiel“.

N. Bohr sa vo vyšších ročníkoch venoval už iba teoretickým otázkam, a to predovšetkým klasickej elektrónovej teórii, ktorej základy položil H. A. Lorentz. Po absolutoriu na kodanskej univerzite v r. 1907 začal pracovať na dizertácii pre získanie hodnosti magistra vied. Riešil v nej problémy elektrickej a tepelnej vodivosti kovov, ich magnetické a termoelektrické vlastnosti na základe klasickej elektrónovej teórie. Hodnosť magistra vied získal po skvelej obhajobe v lete r. 1909. Bohr pokračoval potom v práci na tej istej problematike a 13. mája 1911 obhájil dizertačnú prácu pre hodnosť doktora filozofie na tému *Výskumy o elektrónovej teórii kovov.***) Bohr svojou prácou vzbudil takú pozornosť, že o jej obhajobe priniesla správu denná tlač [5]. V tejto práci sa opieral o najnovšiu literatúru a miestami polemizoval s klasikom fyziky elektrónov J. J. Thomsonom, a to s jeho staťou z r. 1907. Bohrova práca bola prínosom aj pre jeho examinátorov a oponentov. Ukázalo sa, že Kodaň je pre Nielsa Bohra už priúzkou.

V septembri 1911 odišiel N. Bohr ako štipendista Carlsbergskej nadácie na ročný pobyt do Cambridgea, kde kráľoval J. J. Thomson. Pobyt v Cambridgei bol pre Bohra poučným, navštevoval prednášky J. J. Thomsona, J. Larmora, oboznámil sa s prácou v Cavendishovom laboratóriu. Thomsona si veľmi vážil, ale očakávania, ktoré vkladal do svojho pobytu v Cambridgei sa mu nespĺnili, ako vyplýva z korešpondencie s jeho neskoršou manželkou Margrethou Nørlundovou***) a s bratom Haraldom. Príčiny odcudzenia Bohra a J. J. Thomsona rozoberajú Bohrovi životopisci, okrem iných aj J. M. Klaus v prístupnej veľmi peknej knihe [6]. Na tomto mieste spomenieme iba jednu z príčin – nie s úmyslom zjednodušiť problematiku, ale preto, lebo zrejme ovplyvnila v ďalších rokoch Bohrov štýl práce a spolupráce. Bohr totiž už pri prvých rozhovoroch s J. J. Thomsonom mal pripomienky k jeho (Thomsonovej) práci****) a upozornil na príslušné kritické miesta vo svojej doktorskej dizertácii. Thomson sa zachoval ku kritike rezervovane a bol čoraz chladnejší. N. Bohr bol od tých čias zdvorilejší voči iným, starším aj mladším, ale na druhej strane prístupný voči všetkým pripomienkam, ktoré sa týkali jeho vlastnej práce.

*) Práca bola uverejnená v Phil. Trans. Roy. Soc. (London) A209 (1909) a v skrátenom znení v Proc. Roy. Soc. (London) A84 (1910). Obe znenia sú reprodukované v [5], a to na s. 29–80 a na s. 395–403.

**) *Studier over Metallernes Elektrontheori*, Copenhagen, Thaning and Appel, 1911. Práca bola preložená do angličtiny a Bohr sa nádejal, že ju J. J. Thomson odporúča na uverejnenie. To sa však nestalo. Anglický text bol prvý raz uverejnený v [5] na s. 291–395.

***) N. Bohr sa oženil 1. augusta 1912. Manželia Bohrovci mali šiestich synov, z ktorých dvaja zomreli. Štyria, ktorí dorástli, dosiahli významné úspechy, a to Hans Henrik ako doktor medicíny, Erik ako chemický inžinier, Aage ako otcov nástupca v Ústave teoretickej fyziky v Kodani a Ernest ako právnik.

****) THOMSON, J. J.: *On the electrical origin of radiation from hot bodies (O elektrickom pôvode vyžarovania z horúcich telies)* Phil. Mag. 14 (1907) s. 217–231.

Situácia z r. 1911 v Cambridgei sa doslova opakovala v r. 1922 v Göttingene. Lenže teraz bol Bohr tým slávnym mužom, ktorého si všetci vážili (bolo to v roku, keď dostal Nobelovu cenu), a Heisenberg poslucháčom tretieho ročníka a v diskusii si dovoľil pripomienky k istej Kramersovej práci, napísanej pod Bohrovým vplyvom. Bohr to riešil tak, že po svojej prednáške vyzval Heisenberga na spoločnú prechádzku, na ktorej mu hovoril o problémoch, ktoré jeho – Bohra trápia [7]. Tak sa začalo nerozlučné priateľstvo Bohra a Heisenberga, skalené vari iba počas druhej svetovej vojny.*)

Pri svojej poslednej návšteve v Sovietskom zväze v máji 1961 na Landauovu otázku, v čom je jeho úspech v práci s mládežou, Bohr medzi iným povedal: „Nebáli sme sa ukázať mladému človeku, že sme sami hlúpi. Nikdy sme sa nevyhýbali vyhroteniu rôznych rozporov a protirečení. Pritom som bol vždy proti tomu, aby sa vyslovovali dajaké „definitívne a určité“ sudy.“ [9]

Čo vedel Bohr o stavbe atómu v r. 1912—1913

Počas svojho pobytu v Cambridgei napísal N. Bohr jediný článok *Poznámka o elektrónovej teórii termoelektrických javov.***) V tom čase pôsobil v Manchestri Ernest Rutherford, vtedy už známy objavom lúčov alfa a beta, teóriou rádioaktívnych rozpadov (objavil radón ako rozpadový produkt rádia), určením náboja častíc alfa a dôkazom, že ide o dvakrát ionizované atómy hélia. Rutherford založil neskoršie školu jadrovej fyziky. V marci 1912 po krátkej výmene listov odišiel Bohr k Rutherfordovi do Manchestru. Zotrval tam iba do leta, ale za ten krátky čas nadviazali Rutherford a Bohr srdečné kontakty, ktoré trvali až do konca Rutherfordovho života (1937). Už v jednom z prvých listov z Manchestru N. Bohr písal bratovi Haraldovi: „Rutherford je muž, na ktorého sa môžeš spoľahnúť. Prichádza pravidelne, vypytuje sa, ako pokračuje práca, a rozpráva o najmenších podrobnostiach...“ [10]. Bohr sa čoskoro profiloval v manchesterskom laboratóriu ako teoretik. Z kolegov sa zblížil najviac s Györgyom Hevesym. Spočiatku sa N. Bohr zaoberal v Manchestri absorpciou nabitých častíc (alfa a beta) a v tejto súvislosti disperziou svetla.***) Tieto problémy ho priviedli k úvahám o štruktúre atómu.

V tom čase existovali tri modely atómu, z ktorých ani jeden nebol uspokojivý. Koncom roku 1903 vytvoril japonský fyzik Hantaro Nagaoka (1865–1950) pod Maxwellovým vplyvom model atómu podľa vzoru planéty Saturn a jej prstenca. Maxwell svojimi výpočtami dokázal stabilitu tohto systému. Nagaokov model, v ktorom úlohu Saturna

*) Svedectvo o Bohrovi v tomto smere podal aj R. P. FEYNMAN vo svojich spomienkach z Los Alamos [8]. Bohr si zavolať na prediskutovanie niektorých problémov vtedy ešte mladého a nie veľmi významného Feynmana s komentárom, že o ňom počul, že rád oponuje, a to bez ohľadu na osobu alebo osobnosť, o ktorú ide. A práve takého človeka Bohr potreboval.

**) *Note on the electron theory of thermoelectric phenomena*, Phil. Mag. 23 (1912) s. 984–986, pozri [5] str. 440–442.

***) N. Bohr o.i. uverejnil na túto tému článok vo Philosophical Magazine a k problematike sa potom vrátil v r. 1915. Pozri [11].

hralo kladne nabité jadro atómu a úlohu prstenca elektróny, nemohol predstavovať stabilný útvar ani len z hľadiska klasickej mechaniky. Medzi telesami, ktoré tvoria Saturnov prstenec, pôsobia príťažlivé gravitačné sily, ale medzi elektrónmi pôsobia odpudivé sily, takže prstenec Nagaokovho atómu by sa rozletel. V tom istom období vypracoval J. J. Thomson „pudingový“ model atómu, v ktorom kladný náboj atómu je rozptýlený v celej hmote atómu a v nej ako hrozienka v koláči sú umiestnené v pravidelných konfiguráciách elektróny. *) Thomsonov model bol veľmi presvedčivý do tých čias, kým Rutherfordove, Marsdenove a Geigerove experimenty a Rutherfordove výpočty neukázali, že takmer celá hmotnosť atómu je sústredená v jadre atómu, ktorého lineárne rozmery sú o štyri až päť rádov menšie ako lineárne rozmery atómu. Rutherford vytvoril ako pracovnú hypotézu pre ďalšie pokusy svojho tímu planetárny model atómu, v ktorom elektróny obiehajú okolo kladného jadra ako planéty okolo Slnka. Ale Rutherfordov model vykazoval dva nedostatky, ktoré klasickej fyzika nevedela preklenúť. Nič z neho nevyplývalo o veľkosti atómu a nadto nebol stabilný, lebo elektróny obiehajúce okolo jadra s nenulovým zrýchlením musia podľa klasickej elektrodynamiky vyžarovať elektromagnetické žiarenie, spojitě strácať energiu a rýchle spadnúť na jadro. Pri takomto pohybe by elektróny nemohli vytvoriť diskkrétne čiarové spektrá a atóm by nebol stabilný.

V tejto situácii mohla pomôcť iba rodiaca sa kvantová teória, ktorej priekopníkmi boli Max Planck (1900) a Albert Einstein (1905). Thomson, ani Rutherford sa v tom čase kvantovou teóriou nezaoberali. Obaja sa zúčastnili na prvom Solvayovom kongrese v Bruseli v dňoch 30. októbra až 3. novembra 1911. Stretnutie malo posúdiť javy, na ktoré sa môže úspešne použiť kvantová teória. Obaja boli predovšetkým experimentátormi a kvantová teória im ešte bola vzdialená. Nie tak mladému Bohrovi. Bohr hovorieval neskoršie o šťastnej okolnosti, že sa narodil v krajine, ktorá nemala nijaké nároky vedúceho národa, takže vo svojej mladosti prijal to najlepšie z oboch svetov, s ktorými Dánsko hraničí: „kontinentálnu“ teoretickú tradíciu a anglický empirizmus. Vari práve pre Angličanov nezvyklý špekulatívny prístup k problémom dopomohol Bohrovi k syntéze záverov, ktoré vyplývali z Rutherfordových experimentov a Planckovej-Einsteinovej kvantovej teórie.

Na tomto mieste treba povedať, že Bohr nebol prvý, čo sa usiloval uplatniť kvantovú teóriu v súvislosti s modelom atómu. Prvým bol Arthur Erich Haas, ktorý sa narodil v Brne 30. apríla 1884, študoval vo Viedni, pôsobil ako profesor v Lipsku a vo Viedni. Zomrel 20. apríla 1941 v Chicagu v USA. Haas sa chcel v r. 1909 vo Viedni habilitovať z dejín fyziky. Keďže v tom čase takýto odbor neexistoval, napísal – ako sa vtedy zdalo jeho viedenským kolegom (najmä Hasenöhrlovi) – príliš špekulatívnu habilitačnú prácu o súvise rozmerov atómu s Planckovou konštantou. Haas napokon v r. 1910 až 1911 publikoval štyri práce na túto tému (dve boli publikované prednášky), o ktorých Lorentz hovoril aj na spomínanom prvom Solvayovom kongrese [4, 17]. Haas, pravda, kvantoval Thomsonov model atómu. Inšpirovaný Einsteinom našiel najmä pomocou

*) Thomsona inšpirovali k takémuto modelu pokusy amerického fyzika ALFREDA MARSHALLA MAYERA (1836–1897), ktorý registroval v magnetickom poli stabilné konfigurácie ihiel zapichnutých do korkových zátok plávajúcich na vode. Thomson vo svojej knihe [12] prekreslil Mayerove obrázky.

rozmerovej analýzy vzťah medzi polomerom atómu a , hmotnosťou m_e a nábojom e elektrónu

$$(1) \quad h = 2\pi|e| \sqrt{(m_e a)}.$$

N. Bohr pozorne sledoval v tých časoch literatúru o štruktúre atómu. Vidno to z jeho vlastného prvého článku o stavbe atómov a molekúl. Okrem A. Haasa v ňom cituje ďalších štyroch autorov, ktorí na Haasove idey nadviazali. Zaoberal sa pochopiteľne aj druhým prístupom k problematike, ktorého autorom bol Nicholson*) z Cambridgea.

Nicholson sa od r. 1910 zaoberal čiarovými spektrami nebeských telies. Vyšiel z predpokladu, že hviezdna matéria má elementárnejšiu štruktúru ako známe chemické atómy. To bola sama o sebe geniálna anticipácia súčasných teórií. Menej úspešný bol už v charakteristike týchto hviezdnych častíc. Považoval ich za akési primárne atómy, pozostávajúce z malých záporne nabitých guľôčok, ktoré rotujú okolo menšej gule nabitej kladne. Vektorový súčet zrýchlení všetkých elektrónov, rotujúcich okolo kladného jadra takéhoto primárneho atómu, bol nulový. Tým vysvetlil stabilitu atómov. V Nicholsonovej klasifikácii najjednoduchší atóm s dvoma elektrónmi sa nazýval korónium, ďalší – „primárny vodík“ – mal tri elektróny, nebulium malo štyri elektróny a protofluor päť. Všetky chemické prvky sú podľa Nicholsona zložené z primárnych atómov, napríklad vodík z dvoch „primárnych vodíkov“, hélium z nebulia a protofluoru atď. Nicholson skúmal spektrá týchto primárnych atómov v spektrách hviezd a Slnka. V roku 1912 sa dopracoval k záveru, že vo všetkých primárnych atómoch moment hybnosti elektrónového prstena nadobúda hodnoty, ktoré sú celočíselnými násobkami $h/2\pi$, kde h je Planckova konštanta.

Bohr podrobne rozobral Nicholsonove názory aj výpočty, vyzdvihol význam kvantovania momentu hybnosti, ale poukázal na tri slabiny tohto modelu. V Nicholsonovej teórii sú frekvencie funkciami energie obiehajúcich elektronov. Takýto systém nemôže vyžarovať homogénne žiarenie v kvantách (so spojitým poklesom energie mení sa spojite frekvencia). Pre niektoré frekvencie sú Nicholsonove systémy nestabilné a napokon, čo je hlavné, Nicholsonova teória nevysvetľuje Balmerove a Rydbergove empiricky formulované zákony pre vlnové dĺžky spektrálnych čiar atómu vodíka.

Bohrov model atómu

V predchádzajúcej časti sme vykreslili situáciu, v akej sa Bohr začal intenzívne zaujímať o štruktúru atómu. Boli tu dva klasické modely, Thomsonov a Rutherfordov (ak odhliadneme od pokusu Nagaoku) a v podstate dva pokusy nájsť súvis medzi štruktúrou atómu a Planckovou-Einsteinovou teóriou. Podľa Rutherfordových názorov bolo k dispozícii ešte príliš málo experimentálneho materiálu, aby sa dačo dalo povedať o štruktúre atómu. Bohr však cítil, že doba k vypracovaniu kvantovomechanického modelu atómu už dozrela a intenzívne sa problematikou začal zaoberať. Trvalo mu vyše

*) William Nicholson sa narodil v Darlington v Anglicku 1. novembra 1881. Pôsobil na rôznych anglických univerzitách. Zomrel 10. októbra 1955 v Oxforde.

roka, kým dospel k výsledkom, ktoré mohol publikovať. Bol to rok úmornej práce, v ktorom každý svoj nový myšlienkový krok konzultoval ústne alebo písomne s Rutherfordom.*) Napokon v r. 1913 vyšla v časopise *Philosophical Magazine* Bohrova trilógia *On the Constitution of Atoms and Molecules* (*O stavbe atómov a molekúl*).

V prvom článku sa zaoberá atómom vodíka, v druhom systémami obsahujúcimi jedno jadro a konečne v treťom systémami obsahujúcimi viac jadier (t.j. molekuly)**). Jednotlivé časti trilógie vyšli vo *Philosophical Magazine* v júli, septembri a novembri 1913. Druhý a tretí článok priniesli iba určité kvalitatívne výsledky, v prvom Bohr odôvodnil čiarové spektrum vodíka a vodíku podobných atómov, určil vzťah pre dĺžky spektrálnych čiar a predpovedal ešte neobjavené spektrálne čiary v extrémnej infračervenej a ultrafialovej oblasti. Teoreticky tiež určil hodnotu Rydbergovej konštanty a lineárne rozmery atómu. Z Bohrovej teórie napokon vyplynulo kvantovanie momentu hybnosti elektrónov v atómoch. Na tomto princípe sa rozvíjala kvantová teória až do r. 1925. (Napokon aj z kvantovej mechaniky vyplýva kvantovanie vlastného a orbitálneho momentu hybnosti elektrónov v atómoch).

Bohr vyšiel z predpokladu, že energia elektrónov v planetárnom modeli atómu môže nadobúdať iba diskrétné hodnoty. Takéto stavy sú stabilné v protiklade k všetkým predstavám klasickej elektrodynamiky. Prečo tomu tak je, vysvetlíť nevedel, toto tvrdenie postuloval. Súčasne postuloval, že v stacionárnych stavoch ostávajú v platnosti zákony mechaniky (Bohrov prvý postulát). Pokiaľ ide o prechody systémov z jedného stacionárneho stavu do druhého, nemožno použiť ani klasickejšiu elektrodynamiku, ani klasickejšiu mechaniku. Jeho druhý postulát znie: „Uvedený proces je sprevádzaný emisiou homogénneho žiarenia, pre ktoré je pomer frekvencie a vyžiareného množstva energie určený Planckovou teóriou“.

Podľa prvého postulátu sa elektrón v atóme vodíka v základnom stave pohybuje po Keplerovej elipse. Obežná frekvencia a veľká poloos elipsy závisia od väzbovej energie elektrónu. Je to energia, ktorú treba dodať elektrónu, aby sa previedol na nekonečnú vzdialenosť od jadra, pričom medzi záporným elektrónom s nábojom ($-e$) a kladným jadrom s nábojom e pôsobia coulombovske sily. Potom táto väzbová energia a súčasne stredná kinetická energia elektrónu počas jedného obehu je

$$(2) \quad W = \frac{1}{2} \frac{e^2}{a},$$

kde a je dĺžka veľkej poloosi. Frekvencia obehu ω je daná klasickým vzťahom

$$(3) \quad \omega = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{\sqrt{W^3}}{e^2 \sqrt{m}}.$$

Bohr nadviazal na Planckovu teóriu, podľa ktorej oscilátor s frekvenciou ν môže nadobudnúť energiu $\tau h\nu$. $\tau = 0, 1, 2, 3, \dots$ (Energia kvantovomechanického oscilátora je o $1/2 h\nu$ väčšia). Analogicky predpokladal, že pri prechode elektrónu z nekonečna

*) Korešpondencia Bohra a Rutherforda z tých čias je v [11].

***) Všetky tri články sú prevzaté do publikácie [11] na s. 161–233, nájdeme ich tiež v [13] a prvý z nich v [14].

na základnú dráhu (ktorá môže byť pre jediný elektrón aj kruhová), získa kinetickú energiu

$$(4) \quad W = K\omega,$$

kde K bola nejaká konštanta s rozmerom účinku rádu Planckovej konštanty a ω bola frekvencia obehu.*) Bohrovi bolo od začiatku jasné, že K bude mať nejakú hodnotu z intervalu $(0, h)$, lebo frekvencia obehu nekonečne vzdialeného elektrónu je nulová a v základnom stave dosiahne hodnotu ω . Napokon dosadil

$$(5) \quad K = h/2.$$

Neskoršie uvažoval stacionárne dráhy**) s energiou

$$(6) \quad W = \tau h \frac{\omega}{2},$$

pričom pre základný stav $\tau = 1$ a pre vyššie energetické hladiny $\tau = 2, 3, 4, \dots$. Dosađením (6) do (2) a (3) dostal potom pre energiu elektrónu v atóme vodíka kvantované hodnoty

$$(7) \quad W_{\tau} = - \frac{2\pi^2 m e^4}{\tau^2 h^2}.$$

Bohrov polomer atómu pre základný stav ($\tau = 1$)

$$(8) \quad a = \left(\frac{h}{2\pi}\right)^2 \frac{1}{m e^2}$$

bol ekvivalentný s Haasovým vzťahom (1).

Pre vyššie kvantové stavy ($\tau \neq 1$)

$$(8a) \quad a = \tau^2 \left(\frac{h}{2\pi}\right)^2 \frac{1}{m e^2}$$

a ďalej

$$(8b) \quad \omega = \frac{4\pi^2 m e^4}{\tau^3 h^3}.$$

Matematický tvar druhého postulátu vyjadruje Bohrovu podmienku frekvencií, ktorú pôvodne zapísal takto:

*) Nejde o uhlovú frekvenciu, v Bohrovom označení $\omega = 1/T$, kde T je perióda obehu. S takýmito úvahami — v našej reprodukcii trochu zjednodušenými — začal v lete 1912 (pozri [11] str. 104, 141 a 156). Vtedy použil označenie pre kinetickú energiu E a frekvenciu ν .

**) Bohr sa spočiatku zaoberal iba základným stavom atómov a molekúl. Spektrá sa mu zdali príliš komplikované na to, aby ich využil pri výskume štruktúry atómov. Až začiatkom r. 1913 upriamil HANS MARIUS HANSEN Bohrovu pozornosť na Rydbergove práce. To privedlo Bohra k skúmaniu vyšších energetických hladín elektrónu v atóme vodíka a k porovnaniu svojich úvah s Balmerovou sériou.

$$(9) \quad W_{\tau_1} - W_{\tau_2} = h\nu,$$

kde ν už je frekvencia vyžiareného svetla, ktorá súvisí s frekvenciami elektrónov obiehajúcich po „povolených“ stacionárnych dráhach prostredníctvom vzťahov (6) a (7). Vzhľadom na (7) dostal potom

$$(10) \quad \nu = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^3} (1/\tau_2^2 - 1/\tau_1^2).$$

Pozoruhodné bolo odôvodnenie vzťahu (5), a teda aj (6). Bohr vyšiel zo všeobecného predpokladu $W = f(\tau) h\omega$, kde $f(\tau)$ je ľubovoľná spojitá funkcia. Dosadením $f(\tau)$ namiesto neodôvodneného $\tau/2$ do výrazu (6) dostal namiesto (10) vzťah

$$(11) \quad \nu = \frac{\pi^2 m e^4}{2h^3} (1/f^2(\tau_2) - 1/f^2(\tau_1)).$$

Porovnaním (11) s Balmerovým empirickým vzorcom určil tvar funkcie $f(\tau)$, a to

$$f(\tau) = c\tau,$$

kde c je ešte neurčená konštanta. Napokon porovnaním svojho vzťahu pre vyžiarenú frekvenciu s klasickým vzťahom pre vysoké kvantové čísla dostal $c = 1/2$. Tým je odôvodnený vzťah (5), a teda aj vzťah (6), z ktorého pomocou (9) vyplýva (10). Bohr tu vlastne vychádzal z myšlienky, ktorú neskoršie nazval princípom korešpondencie: pre vysoké kvantové čísla je rozdiel medzi výpočtami pomocou novej teórie a pomocou klasickej teórie zanedbateľne malý. Napokon z rovníc (8a) a (8b) dostal pre veľkosť momentu hybnosti elektrónu v prípade kruhovej dráhy

$$(12) \quad M = ma^2(2\pi\omega) = \tau \frac{h}{2\pi}.$$

V poslednom vzťahu je v Bohrovom zápise $2\pi\omega$ uhlová frekvencia obiehajúceho elektrónu. Kvantovanie momentu hybnosti podľa vzťahu (12) použil potom v ďalšej práci ako východisko svojich úvah.

Bohrove články prijal pozitívne predovšetkým Arnold Sommerfeld, ktorý v r. 1914/1915 prednášal o novej teórii atómu, pričom ju rozšíril na systémy s dvoma stupňami voľnosti. Hevesy oboznámil s novou teóriou Einsteina, ktorý ju tiež uvítal. Neskoršie napísal Einstein o situácii, v ktorej Bohr vytvoril svoj model atómu: „Všetky moje pokusy prispôbiť teoretický základ fyziky týmto poznatkom (Planckovej kvantovej teórii, pozn. J. Š. a R. Z.) úplne stroskotali. Mal som pocit, akoby mi unikala pôda pod nohami, bez toho, že by sa dakde zjavil pevný základ, na ktorom by sa dalo stavať. Bolo to zázračné a aj dnes sa mi zdá ako zázrak, že tento neistý a protirečivý základ stačil mužovi s jedinečným inštinktom a jemnocitom, aký preukázal Bohr, aby objavil hlavné zákony spektrálnych čiar a elektrónových obalov atómov a ich význam pre chémiu. Je to najvyššia muzikálnosť vo sfére myslenia.“ [16]

Pochopiteľne novú teóriu privítal predovšetkým E. Rutherford, veď s jeho podpisom šla Bohrova trilógia do tlače. Rutherford tiež zariadil, že v septembri 1913 pozvali Bohra do Birminghamu na schôdzu British Association for the Advancement of Science.

Bolo to prvé fórum, na ktorom Bohr vystúpil so svojím modelom. Jeho referát prijal veľmi pozitívne J. Jeans, ale odmietavo lord Rayleigh a J. J. Thomson. Vzápätí sa konal v Bruseli II. Solvayov kongres. Bohr sa na ňom nezúčastnil, o jeho modeli tam nepadla ani zmienka. Bohrova teória čakala na experimentálne potvrdenie a ďalšie rozvinutie.
(Pokračovanie)

Literatúra

- [1] PAIS, A.: „*Subtle is the Lord...*“. Oxford, New York, Clarendon Press, Oxford University Press, 1982, s. 483–501.
- [2] BOHR, H.: *My Father*. In *Niels Bohr*, ed. S. ROZENTAL, Amsterdam, North Holland Publishing Company, 1967, s. 335.
- [3] BOHR, N.: *Collected Works*, ed. L. ROSENFELD. Amsterdam, New York, Oxford, North-Holland Publishing Company, Volume 1 — 1972, Volume 2 — 1981, Volume 3 — 1976, Volume 4 — 1977. V ďalšom citované ako *Works 1, Works 2, Works 3, Works 4*.
- [4] MEHRA, J., RECHENBERG, H.: *The Historical Development of Quantum Theory, Volume 1, Part 1*. New York, Heidelberg, Berlin, Springer Verlag 1982, s. 40, s. 182.
- [5] *Works 1*.
- [6] KLAUS, J. M., FRANKFURT, U. I., FRENK, A. M.: *Niels Bohr*. Moskva, Nauka 1977.
- [7] HEISENBERG, W.: *Der Teil und das Ganze*. München, Piper und Co., 1969, s. 59–65.
- [8] FEYNMAN, R. P.: *Los Alamos zespoda*. Čs. časopis pro fyziku A30 (1980/2), s. 152.
- [9] Pozri [6] s. 177.
- [10] *Works 1*, s. 551.
- [11] *Works 2.*, s. 3–102.
- [12] THOMSON, J. J.: *Electricity and Matter*. Westminster Archibald Constable and Co., 1904, s. 125.
- [13] BOHR, N.: *Izbrannyje naučnyje trudy*. Moskva, Nauka 1970, s. 84–148.
- [14] HAAR, D. TER: *Quantentheorie*. Berlin, Oxford, Braunschweig, Akademie-Verlag, Pergamon Press, Vieweg und Sohn, 1970, s. 167–200.
- [15] *Works 2.*, s. 167.
- [16] EINSTEIN, A.: *Autobiographisches*. In *Albert Einstein, Philosopher-Scientist*, ed. P. A. SCHILPP, New York, Tudor Publishing Company 1951, s. 44–46.
- [17] HERMANN, A.: *Weltreich der Physik von Galilei bis Heisenberg*. Esslingen am Neckar, Bechtle, 1981, s. 304–310.