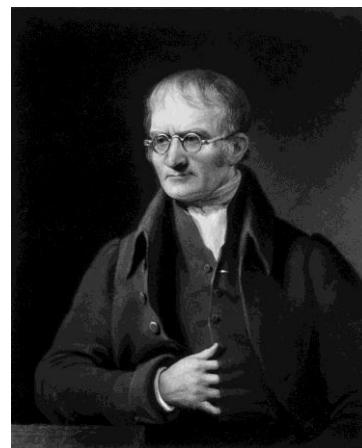


Stavba atomu – od prvních spekulací k Bohrovu modelu

Aleš Lacina, Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity
Kotlářská 2, 611 37 Brno

Antická atomistická představa byla po několika dřívějších dočasných oživeních znovu vzkříšena – tentokrát už natrvalo – počátkem devatenáctého století [1]. Duchovní otec novodobého atomismu John Dalton (1766-1844) jej založil na předpokladu, že základními stavebními částicemi látky jsou nezníčitelné, nestvořitelné (a tedy rovněž nedělitelné) atomy prvků. Chemickou syntézu interpretoval jako spojování těchto elementárních jednotek na „složené (dvojný, trojný, ..., vícenásobné) atomy“ sloučenin; z nich naopak mohly být jednoduché atomy prvků – opět však jen jako celky – zase uvolňovány. Všechny atomy téže chemické látky Dalton považoval za zcela identické, zatímco atomy různých látek za odlišné. Rozdílnost vlastností nestejných atomů při tom chápal jako danost, jejíž hlubšími příčinami se nezabýval. Na těchto ideových základech se mu podařilo teoreticky zdůvodnit některé dříve empiricky nalezené zákonitosti (zachování hmoty – Lavoisier 1789, stálé poměry slučovací – Proust 1799) a – originální analýzou experimentálně zjištěných hmotnostních zlomků týchž prvků v různých sloučeninách [2] – zformulovat vlastní zákon násobných poměrů slučovacích (1802). Ten se mu pak stal východiskem pro určování relativní atomové váhy (dnes bychom řekli hmotnosti) tehdy známých prvků, kterou zavedl jako vůbec první – a na dlouhou dobu jedinou – kvantitativní charakteristiku atomů [3].



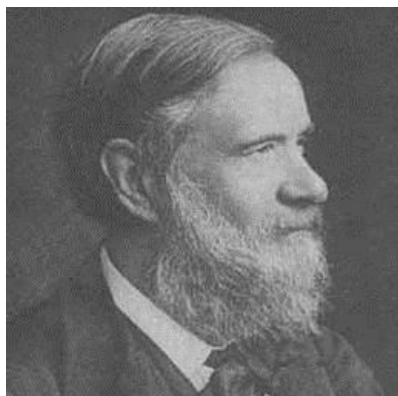
John Dalton

Toto dnes naprosto samozřejmě působící pojetí znamenalo zásadní změnu v nazírání na strukturu látek. Atom, na nějž se doposud pohlíželo – pokud se o něm ovšem vůbec uvažovalo – jako na abstraktní, často spíše spekulativní pojem, se v jeho rámci stal reálným objektem majícím konkrétní, kvantifikovatelné fyzikální a chemické vlastnosti. Vítanou konkretizací a logické projasnění atomistické koncepce však zpočátku komplikovala řada nesnází, které bránily většímu rozšíření nových myšlenek. Jednou z hlavních příčin jejich nedostatečné přesvědčivosti byla chybějící spolehlivá informace o počtech atomů jednotlivých prvků v „atomech sloučenin“. Dalton, vnitřně přesvědčený o principiální jednoduchosti přírody, tento problém zpravidla obcházel hlouběji nezdůvodněnou volbou nejjednodušší možnosti. (Tak například „atom vody“ považoval za dvojný, tj. sestávající z jednoho atomu vodíku a jednoho atomu kyslíku.) V důsledku toho byly některé z jeho závěrů nejen nesprávné, ale dokonce i vzájemně rozporné. Druhým zdrojem obtíží pak byl sám výchozí předpoklad o jednoatomové struktuře prvků vedoucí k výsledkům neslučitelným s některými experimenty, na základě nichž Joseph-Luis Gay-Lussac (1778-1850) vyslovil roku 1808 zákon jednoduchých objemových poměrů slučovacích pro plyny. Tento nesoulad odstranil již roku 1811 Amedeo Avogadro (1776-1856) vyslovením domněnky, že základními částicemi



Amedeo Avogadro

všech látek (a to i prvků) nejsou nedělitelné atomy, ale částice z atomů složené – totiž molekuly a že stejné objemy plynů obsahují (za stejného tlaku a teploty) stejné počty těchto molekul. Dalton však Gay-Lussacovy experimenty zpochybnil a jejich Avogadrův výklad odmítl, čímž nejen

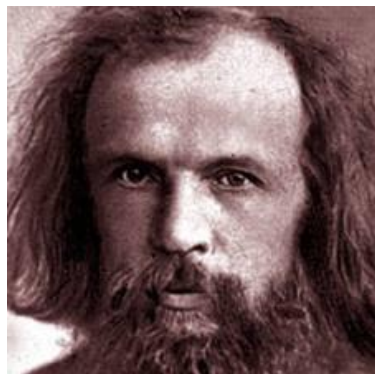


Stanislao Cannizzaro

přispěl k tomu, že Avogadrovo vylepšení jeho vlastní teorie upadlo na téměř padesát let v zapomnutí, ale zároveň tím také výrazně oddálil její širší přijetí. K němu rozhodujícím způsobem napomohl Stanislao Cannizzaro (1826-1910), jenž roku 1858 ukázal, že na základě Gay-Lussacova zákona a Avogadrovy hypotézy lze z experimentálních dat (hustot slučujících se plynů a jejich hmotnostních zlomků ve vznikajících produktech) jednoznačně určit jak složení binárních sloučenin, tak i relativní atomové váhy reaktantů [4].¹⁾ Do celé chemické obce však i potom – třebaže to v dnešním zpětném pohledu vypadá nepříliš pochopitelně – přesvědčení o správnosti Avogadrovy modifikace Daltonova atomismu pronikalo jen pomalu – prakticky až do začátku dvacátého století [1].

První tušení struktury atomu

Úvahy chemiků o podobě atomů se během devatenáctého století vyskytovaly jen sporadicky, a pokud už byly formulovány, měly většinou charakter pouze doplňkových, spekulativních poznámek. Dalton si atomy představoval různě velké, vytvořené z těžce *“tuhé neproniknutelné materie”* a jen dosti neurčitě se vyjadřoval o jejich možných tvarech. Jeho stoupenec a pokračovatel – zakladatel novodobé chemické symboliky – Jöns Jakob Berzelius (1779-1848) považoval, podobně jako mnozí další, bez jakéhokoli zdůvodnění všechny atomy za kulové a stejně velké. V roce 1815 vyslovil William Prout (1785-1850) zpočátku s nadějí přijímanou



Dmitrij Mendělejev

domněnku, že všechny atomy jsou složeny z atomů vodíku (a navrhl jej ztotožnit s primární materií starověkých filosofů). Čím dál přesněji zjišťované hodnoty atomových vah různých prvků jeho hypotézu sice postupně diskvalifikovaly, nicméně idea atomu jako složeného objektu již v obecném povědomí zůstala a navodila otázku jeho případné interní struktury. Explicitní poznámku o vnitřní stavbě atomů učinil roku 1869 Dmitrij



William Prout

Mendělejev, kdy ji označil za pravděpodobnou příčinu odlišných vlastností atomů různých druhů a učinil ji tak zodpovědnou za jím odhalenou periodickou závislost vlastností prvků na jejich atomových vahách. Svoji myšlenku však už dále nerozvinul [7-10].

¹⁾ Práce [4] bezprostředně nezbudila téměř žádný ohlas. Zasloužené pozornosti se jí dostalo až o dva roky později díky Cannizzarově obsahově totožnému vystoupení na chemickém kongresu v Karlsruhe. Toto vůbec první celosvětové setkání chemiků, jehož hlavním cílem bylo sjednotit do té doby značně různorodou chemickou terminologii a značení a vyjasnit problematiku atomových a molekulových vah, je považováno v těchto směrech za historický mezník. Na většinu účastníků této konference udělal Cannizzarův příspěvek mocný – a v řadě případů i okamžitý – dojem. Patřili mezi ně například Dmitrij Mendělejev (1834-1907) nebo Lothar Meyer (1830-1895), jenž v pozdější vzpomínce poznamenal, že mu *„tehdy spadly klapky s očí“* [5, 6].

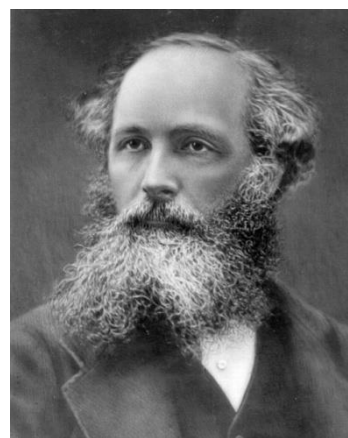
Jen o málo později budovaná molekulárně kinetická teorie plynů, jež byla dobovou fyzikální konkretizací částicového pojetí stavby látek, rovněž vystačila s jednoduchou představou o atomech, jakožto pružných koulích nepatrné velikosti. Nicméně jeden z jejích hlavních tvůrců James Clerk Maxwell (1831-1879) s odkazem na elektromagnetické záření emitované (a absorbované) atomem roku 1875 poukázal na nezbytnost existence jeho vnitřní struktury:

„Spektroskopie vypovídá o tom, že molekuly mohou vykonávat velmi mnoho různých vibrací. Musí jít tedy o soustavy značné složitosti mající mnohem více než šest proměnných [což je počet veličin potřebných k zadání stavu tuhého tělesa] ...“²⁾

Zároveň je však – ve shodě s většinovým názorem – pokládal za nedělitelné:

„Ač během věků docházelo a ještě může docházet k vesmírným katastrofám, během nichž se staré soustavy mohou rozpadat a nové na jejich troskách vznikat, molekuly [= atomy²⁾], ze kterých jsou tyto systémy vytvořeny, zůstávají – jako základní kameny materiálního vesmíru – nezměněny a neporušeny.“ [10-12]

V závěrečných dekádách devatenáctého století se atomy – jejich vlastnosti, empirické indicie jejich existence a samozřejmě také jejich užitečnost pro teoretický výklad periodické tabulky, optických spekter, chemického složení či různých makroskopických projevů látek – staly frekventovaným tématem úvah řady chemiků i fyziků. Vzhledem k nespolehlivosti nebo dokonce úplné absenci experimentálních východisek těchto dohadů, zveřejňovaných mnohdy jen formou poznámek, dodatků, populárních přednášek nebo pouze sdělovaných v korespondenci – však šlo o názory značně různorodé: od úplného odmítnutí atomistické koncepce až po různé nepřilíš konkrétní myšlenkové konstrukce opírající se o představu hypotetických subatomárních částic [13]. Taková „atomová teorie“ ovšem nebyla příliš ceněna a v rámci tehdejší přírodovědy byla pokládána spíše za okrajovou záležitost. Souhrnně lze říci, že „pro běžného fyzika té doby byly spekulace o struktuře atomů něco jako dohady o životě na Marsu – velmi vzrušující pro ty, kteří nalézají v takových věcech zalíbení, ale bez velké naděje na přesvědčivý vědecký důkaz a bez významu pro vědu a její další rozvoj“ [14]. Úvahy o stavbě atomů v době, kdy se ještě pochybovalo o jejich existenci a o jejich vlastnostech se do značné míry jen spekulovalo, se mnohým zdály být předčasné. Nejúspěšnější pokus v tomto směru, který svou systematičností i zpracováním tehdy neměl prakticky žádnou důstojnou konkurenci, představovala vírová teorie Wiliama Thomsona (1824-1907).



James Clerk Maxwell

Atomy jako víry v éteru

Roku 1878 napsal Maxwell do devátého vydání Britské encyklopedie významný i později často připomínaný článek „Atom“. V něm sumarizoval základní požadavky, kterým by měl dostát jakýkoli model atomu, do tří obecně formulovaných bodů odpovídajících atomistické interpretaci nejpodstatnějších empirických poznatků. Přijatelný koncept atomu musel zaručit jeho neměnnou velikost (reprezentující jeho stabilitu), možnost vnitřních pohybů nebo vibrací (souvisejících s emisí/absorpcí světla) a dostatečné množství (vnitřních) charakteristik (jež by umožňovaly rozlišení atomů různých druhů).

²⁾ Z kontextu je zřejmé, že Maxwell má na tomto místě na mysli (i) atomy. Poznamenejme, že terminologie nově se otevírající oblasti mikrosvěta nebyla v té době ještě ustálená. Tato skutečnost místy poněkud komplikuje dnešní čtení tehdejších textů a zřejmě také někdy mohla ztěžovat i vzájemné dorozumění jejich autorů.

První – a na velmi dlouhou dobu jediný – konkrétní náčrt takové představy byl zveřejněn již o jedenáct let dříve, kdy na zasedání Royal Society of Edinburgh vystoupil William Thomson (od roku 1892 lord Kelvin) s návrhem považovat atomy za vírové útvary ve všepřonikajícím éteru. Opíral se při tom o průkopnickou práci Hermanna von Helmholtze (1821-1894) z roku 1858 [15] matematicky popisující rotační pohyb v tekutinách. Jedním z jejích důležitých výsledků – nanejvýš zajímavým z hlediska naděje na vytvoření atomistické paralely – byl teoretický závěr, že vírová vlákna v neohrazené, nestlačitelné, neviskózní kapalině (za níž byl éter považován) se mohou uzavírat v prstence, jež jsou dokonale stabilní. Thomsona na tento článek upozornil jeho dlouholetý spolupracovník a přítel Peter Guthrie Tait (1831-1901) a současně mu předvedl řadu svých (později mnohde a často opakovaných)



Hermann von Helmholtz

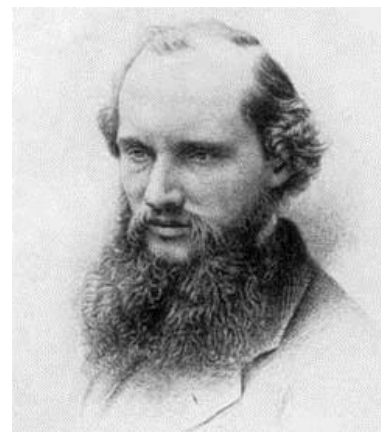


Peter Guthrie Tait

originálních pokusů s kouřovými prstenci ve vzduchu, které působivě demonstrovaly pozoruhodné vlastnosti takových útvarů. Inspirován těmito podněty a veden svým celoživotním vědeckým krédem o fundamentální jednotě přírody, projevujícím se snahou převést výklad všech fyzikálních jevů – včetně tepelných (v jejichž případě se to krátce před tím již podařilo), elektrických, magnetických, světelných i gravitačních – na jednotný mechanický mikroskopický základ, Thomson postupně svůj původní nápad dále rozvíjel. Během následujících třiceti let se mu jej povedlo rozpracovat z výchozího hrubého nástinu, zpočátku podepíraného i dost volnými analogiemi a odkazy na Taitovy experimenty, na konzistentní matematickou teorii, pomocí níž teoreticky vyšetřoval jak možné tvary vírových

prstenců (jednoduché, uzlové i složené; jež měly odrážet rozmanitost různých druhů atomů), tak jejich pohyby.³⁾

Thomsonovy myšlenky našly ve vědeckém světě, zejména anglosaském, značný – převážně pozitivní – ohlas. Velmi uznale, byť s jistými výhradami, se o nich vyjadřoval například Maxwell, kterého s Thomsonem pojil přátelský vztah i dlouholetá korespondence, nebo Albert Abraham Michelson (1852-1931), jenž ideu vírového atomu označil za „jednu z nejslibnějších fyzikálních hypotéz“. Přitažlivost Thomsonovy představy o atomech – ztotožňující tyto základní stavební jednotky látek s pohybovými mody éteru – mohla zvyšovat i s ní spojená perspektiva v podstatě smírného vyřešení odvěkého antagonistického vztahu mezi spojitým a korpuskulárním pojetím hmoty. V průběhu osmdesátých let devatenáctého století vírovou teorii svého staršího jmenovce rozšířil Joseph John Thomson (1856-1940). Jeho úvahy o jednotlivých prstencích obohatil o podrobný rozbor možností jejich vzájemných interakcí a vazeb a otevřel tak cestu k vírové interpretaci chemických vlastností různých atomů a jejich slučování, na niž pak učinil i několik prvních kroků.



William Thomson

V devadesátých letech však začal zájem o vírovou teorii – přes všechny její dílčí úspěchy a dosavadní uznání – postupně opadat. Vzhledem k její značné matematické komplikovanosti,

³⁾ Podrobnější popis vírové teorie je možné najít na mnoha místech ve fyzikálně historické literatuře. Zájemci o skutečně zevrubný výklad této problematiky lze doporučit např. vyčerpávající stať s bohatými odkazy na další prameny [16]. Stručnější, nicméně velmi obsažné, čtivé hodnotící shrnutí přináší např. článek [17].

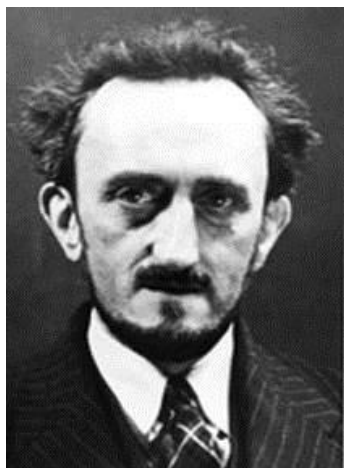
nemožnosti přímého ověření jejich důsledků na atomární úrovni a nepochybně také frustraci z její čím dál patrnější neschopnosti naplnit původní nadějná očekávání měli mnozí tendenci považovat vírové prstence spíše za užitečné simulace usnadňující teoretické úvahy než za reálné atomy. Zklamán selháním svých snah o začlenění elektromagnetických jevů a gravitace do tohoto rámce sdílí podobné pochybnosti i sám William Thomson (nyní již lord Kelvin) a na svoji teorii fakticky rezignuje. V posledních pracích věnovaných této tématice se již případnou korespondencí svých závěrů se strukturou látek ani nezabývá a soustřeďuje se na rozvíjení matematického aparátu⁴). Zmar Kelvinovy vírové představy o atomech nakonec dovršila nečekaná experimentální zjištění. Nejprve Michelsonovy-Morleyho pokusy (1881, 1887) znevěrohodnily existenci éteru, jenž byl jejím neodmyslitelným atributem, a definitivní obrat přinesl objev elektronu učiněný o deset let později.

Rané elektronové modely

Sám objev elektronu s úvahami o stavbě atomu přímo nesouvisel. Byl jedním z nejvýznamnějších závěrů experimentálního studia elektrických výbojů v plynech, které započalo již v padesátých letech devatenáctého století. Dlouholeté experimentování různých badatelů s katodovým zářením a dohady o jeho podstatu završil roku 1897 Joseph John Thomson zásadním poznatkem, že jde o proud stejných záporně nabitých částic s extrémně velkým měrným nábojem $\left(\frac{q}{m}\right)$, jehož velikost je rovna zhruba tisícinásobku do té doby největšího

známého měrného náboje $\left(\frac{q}{m}\right)_H = 9,6 \cdot 10^7 \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$ (měrný náboj vodíkového iontu zjištěný při

elektrolýze) [18]. Když se mu pak o rok později, pomocí právě zkonstruované první verze Wilsonovy mlžné komory, podařilo přibližně zjistit i velikost jejich absolutního náboje $|q|$ ($\approx q_H$), stalo se zřejmým, že korpuskule katodového záření – záhy přejmenovaná na elektron – má hmotnost o tři řády menší než (nejlehčí) atom vodíku. Přirozeně se nabízející domněnku, že by tudíž mohlo jít o částici vnitroatomovou, potvrdily soudobé experimenty vyšetřující vliv zahřívání a zejména ozařování na elektrickou vodivost plynů.⁵) Tyto závěry Thomsona bezprostředně motivovaly k prvním úvahám o složení atomu: „*Hypotéza ... vyslovená Proutem [podle níž] jsou atomy různých elementů [tvořeny] atomy vodíku, je ve svém doslovném znění neudržitelná; pokud však nahradíme vodík nějakou neznámou substancí X, není známo nic, co by bylo s touto hypotézou neslučitelné.*“ Je přitom nepochybné, co touto substancí míní, když dále píše: „*Tyto prvotní atomy ... budeme pro stručnost nazývat korpuskulemi ...* [18].“ A dva roky nato poznamenává: „*Atom považuji za početný soubor ... korpuskulí ...* [19]“⁶)



Jean Baptiste Perrin

Objev elektronu jakožto první subatomární částice opět probudil diskuse o vnitřním ustrojení atomů, při čemž znovu obrátil pozornost i k některým dřívějším spekulacím o jejich případné korpuskulární stavbě. Někdejší astronomické analogie oživil Jean Baptiste Perrin (1870-1942), který zřejmě jako první navrhl

⁴) Ten sice dodnes nachází důstojné uplatnění v hydrodynamice a jejich moderních aplikacích, atomová fyzika se však dále vyvíjela jiným směrem. A v jejích novodobých učebnicích nebývá téměř čtyřicetiletá vírová epizoda většinou zmiňována ani ve formě historické poznámky.

⁵) Podrobněji je celá argumentační linie rozvedena v částečně pedagogicky zaměřeném článku [11].

⁶) Název „korpuskule“ pro elektrony užíval Thomson (i mnozí jiní) ještě několik dalších let.

planetární model atomu obsahující elektrony. V populární přednášce konané roku 1901 na pařížské Sorboně představil atom jako objekt „... sestávající, na jedné straně, z jednoho nebo několika silně kladně nabitých těles, jakýchsi Sluncí, jejichž náboj mnohokrát převyšuje náboj korpuskule, a, na druhé straně, z mnoha korpuskulí v roli malých záporných planet, ..., jejichž celkový záporný náboj je přesně roven celkovému kladnému náboji tak, aby byl atom elektricky neutrální [20].“⁶⁾ Na základě tohoto pojetí se Perrin pokusil o vysvětlení nedávno objevené radioaktivity (považoval ji ovšem za jev vybuzený v atomu zvenčí) a naznačil, že by mohlo najít uplatnění i při výkladu spekter. Stejně jako v případě jeho předchůdců však zůstalo jen u obecně formulovaného, dále nerozvíjeného nápadu postrádajícího jakýkoli komentář konfigurací planetárních elektronů a stability jejich drah.

Příštího roku přišel s jinou ideou lord Kelvin. Atom prezentoval jako kouli stejnoměrně (spojitě) rozloženého kladného náboje, v níž byly rozmístěny diskrétní elektrony (sic!) tak, aby byl celý systém v rovnováze, pokud se tyto částice nepohybovaly [21].⁷⁾ V následujících letech se potom jednak snažil na základě tohoto modelu ilustrovat a vysvětlovat radioaktivitu, o níž se – podobně jako Perrin – domníval, že je důsledkem nějakého vnějšího působení (vlnění éteru nebo jiné externí příčiny), jednak přemýšlel nad dalšími, komplikovanějšími modely. Fyzikální komunita se ovšem stavěla k těmto názorům stárnoucího Kelvina velmi zdrženlivě a jeho práce z tohoto období – s výjimkou prvotního nápadu, jež je předobrazem pozdějšího Thomsonova (J. J.) pudinkového modelu – nenašly žádný odraz v dalším vývoji atomistických představ.



William Thomson
(lord Kelvin)

Na podzim roku 1903 předložil Philipp Lenard (1862-1947) hypotézu, že se atomy různých druhů skládají z různého – přesněji nespecifikovaného – počtu stejných komponent, které nazval dynamidami⁸⁾ [22]. Tyto útvary, jež si představoval jako těsné – elektricky neutrální – spojení elektronu s mnohem hmotnějším kladně nabitým objektem⁹⁾, měly být rozloženy rovnoměrně v celém objemu atomu. S odkazem na vysokou prostupnost tenkých kovových fólií pro katodové paprsky, kterou sám experimentálně prokázal o několik let dříve, Lenard konstatuje, že úhrnný objem dynamid je jen nepatrným zlomkem ($\approx 10^{-12}$) objemu celého atomu a jako první tak vyslovuje zdůvodněný názor, že atomy nejsou neproniknutelné, ale skládají se z malých objektů, mezi nimiž je prázdný prostor. Více se však z Lenardovy představy nezachovalo. Spekulativní úvahy o optických spektrech a radioaktivitě, které na ní založil, byly formulovány jen velmi vágně, o její souvislosti s chemickými vlastnostmi atomu se pak nezmínil vůbec. A tak Lenardův návrh neměl na další studium stavby atomu o nic větší vliv než poslední práce Kelvinovy.



Philipp Lenard

⁷⁾ Kelvinovy hypotetické elektrony se lišily od Thomsonových korpuskulí (=elektronů) jak nábojem, tak hmotností a měly se řídit ad hoc silovým zákonem, složitějším než zákon Coulombův.

⁸⁾ Tento název se ve fyzikální literatuře objevil již o půlstoletí dříve, kdy jej k označení objektů, které považoval za základní stavební jednotky všech látek použil Ferdinand Redtenbacher (1809-1863). Mělo jít o pevně vázané systémy sestávající z hmotných atomů obklopených slupkami nevažitelného éteru [23].

⁹⁾ Tato idea je zajímavá rovněž – a možná hlavně – z jiného hlediska. Lenard jejím vyslovením implicitně zachází s kladným nábojem jako kvantovaným. Převažující fluidová představa o povaze elektřiny byla přitom podlomena (objevem elektronu) jen v případě záporného náboje. Kladný náboj však považoval J. J. Thomson (ale také Kelvin a velmi mnozí jiní) nadále za spojitou entitu.

Těsně před koncem téhož roku zveřejnil v tokijské Fyzikálně-matematické společnosti Hantaro Nagaoka (1865-1950) další představu o stavbě atomu inspirovanou podobou planety Saturn.¹⁰⁾ Podle ní by měl být atom tvořen masivním kladným nábojem (odhadovaným řádově na desetitícínásobky náboje elektronu) opásaným jedním nebo více prstenci navzájem stejně vzdálených elektronů pohybujících se stejnou úhlovou rychlostí. Nagaoka tvrdil, že se mu podařilo dokázat dynamickou stabilitu svého modelu, prezentoval jej jako nadějně východisko pro popis optických spekter i radioaktivity [25] a následnými výpočty se snažil ukázat jeho slučitelnost se spektroskopickými daty, když emisní spektrum atomu interpretoval jako důsledek příčných kmitů elektronových prstenců. Při tom, podobně jako četní jeho současníci, vyjádřil přesvědčení, že skutečná struktura atomu může představovat obtíže, které znemožní její matematické uchopení [26]. Nagaokův nápad však kromě zájmu vzápětí sklidil rovněž zdrcující kritiku zpochybňující jeho výpočty a poukazující na nestabilitu takového rozložení hmoty a náboje [27]. J. J. Thomson nadto odmítl i obecnou ideu kladně nabitého tělesa obklopeného souborem stejných záporně nabitých satelitů, jež se ovšem v jiné konkrétní podobě – a již definitivně – vrátila na scénu o necelých deset let později.



Hantaro Nagaoka

Thomsonův (pudinkový) model a jeho vývoj

V téže době přemýšlel o počtu a rozmístění elektronů v atomu i jejich objevitel J. J. Thomson. Vycházel při tom z představy, jejíž obecná podoba byla prakticky identická s Kelvinovou ideou jednotlivých elektronů nacházejících se v homogenní kladně nabitě kouli blíže nespecifikovaného média. O tomto kladném pozadí se ovšem, podobně jako Kelvin,



Joseph John Thomson

vyjadřoval jen velice neurčitě: Měl jím být jakýsi nevažitelný rosol¹¹⁾ zajišťující elektrickou neutralitu a stabilitu elektronové konfigurace, jež určovala vlastnosti atomu včetně jeho hmotnosti.¹²⁾ Formulace takového modelu se přitom neopírala o žádné přímé fyzikální experimenty, nýbrž šlo o vyústění Thomsonovy sofistikované představivosti. Na rozdíl od autora prvotního nápadu, který jej – již na sklonku svého života – dále nerozvíjel, Thomson toto rozložení hmoty a náboje po několik let (1902-1908) intenzivně studoval, při čemž výsledky svých úvah a rozsáhlých výpočtů porovnával s různými vlastnostmi reálných atomů. Na základě těchto konfrontací potom modifikoval jak výchozí předpoklady, tak konkrétní podobu zpočátku jen nastíněného modelu, jenž pak už byl nadále – zcela oprávněně – spojován s jeho jménem.¹³⁾

¹⁰⁾ Bezprostředním Nagaokovým východiskem při tom byla velmi ceněná Maxwellova práce [24], s níž se seznámil během svého postdoktorského pobytu v Evropě (1893-1901). Maxwell v ní vyřešil dvě století otevřený problém stability Saturnových prstenců, když ukázal, že takové prstence musí sestávat z oddělených těles a rotovat dostatečně velkou úhlovou rychlostí. Podstatným rozdílem mezi Saturnem a modelovaným atomem, s nímž se ovšem Nagaoka náležitým způsobem nevypořádal, je odlišný charakter interakce mezi „částicemi“ obou soustav (gravitační x elektromagnetická).

¹¹⁾ Samo toto želé přitom muselo být drženo pohromadě nějakými – zatím neznámými – silami neelektrické povahy. (Analogický pozdější problém stability atomového jádra pak vyřešila existence jaderných sil.)

¹²⁾ Thomson to uvádí výslovně: „*Předpokládáme, že hmotnost atomu je součtem hmotností korpusek [= elektronů], které obsahuje, takže atomová váha prvku je určena počtem korpusek v atomu.* [28]“ Kladný náboj tedy, podle jeho tehdejšího mínění, k hmotnosti atomu nijak nepřispívá.

¹³⁾ Thomsonův model bývá zpravidla jediným z „předjaderných“ modelů atomu zmiňovaným v nesespecializované literatuře. Pod tímto označením však učebnice, přehledové články či popularizační prameny obvykle uvádí různé

Zatímco Kelvinovo pojetí atomu bylo statické, Thomson od počátku uvažoval nejen o rozmístění elektronů, s nímž dále spojoval chemické vlastnosti atomu, ale také o jejich pohybu, který se mu stal základem pro vysvětlování stability atomů, jejich vyzařování i radioaktivity. V řadě prací postupně vyšetřoval různé varianty svého modelu, při čemž jejich dílčí aspekty a závěry, k nimž dospěl, nezřídka dost volně kombinoval.¹⁴⁾

Tak začátkem roku 1904 reprezentoval atom souborem elektronů rovnoměrně rozložených nejprve na jednom prstenci (nacházejícím se uvnitř oblasti kladného náboje a se středem splývajícím s jejím středem), které obíhaly stejnou, stálou rychlostí podél něj. Každý z těchto elektronů byl – podobně jako v případě dřívější saturnské analogie – odpuzován všemi svými souputníky a současně přitahován ke středu atomu silou, jejíž závislost na vzdálenosti od něj se ovšem od Nagaokova vyjádření lišila. Přestože vzhledem k předpokládané nevažitelnosti kladného média měly být atomárních elektronů řádově tisíce, Thomson začíná svoje úvahy a výpočty nepočtenými elektronovými konfiguracemi. Při tom dospívá k závěru, že pokud počet elektronů v prstenci přesáhne pět, je k zajištění stability takového uspořádání nezbytná přítomnost elektronů i uvnitř prstence. To jej dále přivádí k myšlence planárního souboru soustředných prstenců. Vnitřní (stabilizující) prstence by měly obsahovat vždy méně elektronů než prstence s větším poloměrem a jejich struktura by pak měla, podle něj, mít – v protikladu k dnešnímu přesvědčení – rozhodující vliv na chemické vlastnosti atomu. Thomson při tom dokonce nalézá jisté analogie mezi svými závěry a periodickou soustavou prvků.¹⁵⁾

Problém radiační nestability kruhového pohybu jednotlivých elektronů Thomson řešil již o rok dříve, kdy jej teoretické studium pole buzeného stejnými bodovými náboji symetricky rozloženými podél rotujícího kruhu přivedlo k závěru, že energie vyzařovaná takovým systémem rychle klesá s rostoucí rychlostí rotace a zvětšujícím se počtem nábojů v prstenci [32]. (Tento, na první pohled možná trochu nečekaný závěr se stává přijatelným odkazem na smyčku protékanou stálým proudem, která vytváří časově neproměnné pole a neemituje elektromagnetické vlny.) A Thomson v tom zároveň vidí i možnost vysvětlení radioaktivity:

„ ... rychlosti pohybujících se korpusek [= elektronů] se budou v důsledku vyzařování pomalu – velice pomalu – zmenšovat; když po dlouhé době rychlost dosáhne kritické hodnoty, nastane cosi jako výbuch korpusek Kinetická energie získaná tímto způsobem může být dostatečná k vynesení nějakého systému z atomu, takže se může, jako v případě radia, část atomu odtrhnout. V důsledku této velmi pomalé disipace energie vyzařováním, bude doba života atomu velmi dlouhá. [28]“

Souběžně Thomson pracoval i na statické verzi svého modelu, u níž se pokoušel nalézt i rovnovážné prostorové konfigurace elektronů a jejich tlumenými harmonickými kmity pak

přechodné verze Thomsonových představ či rozmanité varianty jejich kombinací. Rozšířené přizvisko „puddingový“ (plum-pudding), odkazující na podobnost s (anglickým) pudinkem, nepochází od samotného Thomsona a je dosti pravděpodobné, že bylo ve své době míněno i mírně ironicky.

¹⁴⁾ Thomsonovy práce z tohoto období se proto poměrně obtížně čtou, zvláště snaží-li se čtenář je chápat v souvislostech. Místo vlastního komentáře se to autor rozhodl raději dokumentovat dvěma citáty:

„ [J. J.] obvykle upřednostňoval to, co jeho teorie vysvětlovala, před tím, s čím si nevěděla rady... byl tak vynalézavý v návrzích způsobů, jak se vyhnout závěrům, které se mu nehodily, že se idea rozhodujícího testu za jeho výkladem mohla zcela ztratit. ... J. J. nelpěl na svých atomových teoriích dogmaticky a skutečně byl připraven je někdy změnit, aniž by vůbec sdělil, že začíná odznovu a že to, co bylo uvedeno doposud, musí být považováno za neplatné. [29]“

„Žádná velká přesnost se nepožadovala a k vyslovení jednoznačného závěru [mu] stačila i přibližná podobnost. [30]“

Přímým důsledkem tohoto faktu je zřejmě také situace zmiňovaná v poznámce ¹³⁾. Podrobnější komentáře a výklad relevantních Thomsonových prací lze najít např. v [13, 29, 31].

¹⁵⁾ Některé jeho tehdejší úvahy jsou ovšem dost obtížně stravitelné. Lze to dokumentovat například skutečností, že zmíněné paralely mezi atomy prvků a elektronovými konfiguracemi obsahujícími několik desítek elektronů vede v témže článku, na jehož jiném místě předpokládá, že tyto elektrony jsou zodpovědné za veškerou hmotnost atomu (a měly by jich tudíž být tisíce)..

hodlal vysvětlovat elektromagnetické záření emitované atomem. Ve všech jeho atomistických úvahách však zůstávala řada (často nepřiznaných) otevřených problémů. Například navzdory svému tvrzení, že atomy obsahují řádově tisíce elektronů, se zabýval jen relativně nepočetnými elektronovými konfiguracemi, soubor prstenců atomárních elektronů považoval za rovinný a mnohdy si pomáhal vizuálními modely a nedostatečně zdůvodněnými analogiemi, o nichž se domníval, že by mohly poskytnout aspoň přibližný obraz vyšetřované reality [33, 34].

Z dnešního hlediska je nejvýznamnějším Thomsonovým příspěvkem ke studiu stavby atomu jeho upřesnění počtu atomárních elektronů. V roce 1906 přechází od svých dosavadních spekulativních představ o jejich množství k fyzikálnějšímu přístupu [35]. Provádí mikroskopický rozbor tří nezávislých jevů (disperze světla ve vodíku, rozptylu rentgenového záření ve zředěných plynech a rozptylu β -záření tenkými fóliemi) opírající se o modifikovanou statickou verzi svého modelu. Vysvětluje je interakcí s atomárními elektrony a ve všech třech případech dospívá k témuž závěru – totiž, že počet elektronů v atomu n je přibližně roven jeho váze vyjádřené v atomových jednotkách (v dnešní terminologii hmotnostnímu číslu A). Detailní porovnání s experimentálními daty jej pak přivádí ke konkrétnějšímu vyjádření: $n = k \cdot A$ (kde $k \in \langle 0.2, 2 \rangle$). (Brzy na to jeho žák Charles Glover Barkla (1877-1944) na základě přesnějších výsledků vlastních rentgenovských měření zpřesnil – pro lehké prvky – odhadovanou hodnotu k na 0.5.)

Tento poznatek měl ovšem pro Thomsonův model atomu fatální důsledky, neboť zneplatnil hlavní argument pro jeho stabilitu. Kromě toho zcela změnil i dosavadní představu o rozložení hmoty v atomu, jejíž drtivou většinu bylo nyní nutné spojovat s kladným nábojem. Thomson tuto změnu zpočátku provedl jen víceméně formálně prohlášením, že za atomovou váhu je tedy zodpovědný (původně nevažitelný) kladný rosol. Vzápětí však začal povahu kladného náboje intenzivně – teoreticky i experimentálně – studovat [36]. Po několik dalších let se pak ještě snažil svůj model různě modifikovat, nalézt přijatelné zdůvodnění jeho stability se mu však nepodařilo.

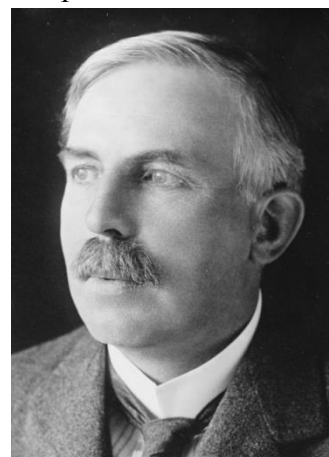
Jaderný model

Thomsonův model přinesl dosud nejkompexnější a nejpropracovanější obraz atomu, poskytující rovněž kvalitativní či dokonce polokvantitativní shodu s některými experimentálními výsledky, a byl proto – přes veškerou svoji rozpornost a nedokonalost – ve své době nejvíce znám a ceněn. Jedním z jeho hlavních nedostatků byl ovšem pouze spekulativní charakter samotné výchozí představy o rozložení hmoty a náboje v atomu. Tento zásadní problém se podařilo vyřešit roku 1911 Thomsonovu někdejšímu doktorandovi Ernestu Rutherfordovi (1871-1937) na základě studia rozptylu svazků α -částic kovovými fóliemi.

Na počátku tohoto všeobecně známého příběhu stojí Rutherfordovo přesvědčení o možnosti použít α -částice, jejichž vlastnosti už předtím sám detailně prozkoumal, jako vhodnou experimentální sondu:

„Poněvadž α -částice ... procházejí atomem, pečlivé studium odchylek 'těchto střel' od původního směru může poskytnout určitou představu a stavbě atomu, jež je za tyto odchylky

zodpovědná. Rozptyl rychle letících nabitých částic atomy látky je jednou z nejslibnějších metod řešení problému stavby atomu [37].“



Ernest Rutherford

Vzhledem k jeho celkové elektrické neutralitě by měla α -částice, která mívá Thomsonův atom, pociťovat jen velmi slabé pole elektrického multipólu, jež by zřejmě nemohlo nijak výrazně ovlivnit její pohyb. Podobně by tomu bylo ovšem i tehdy, kdyby α -částice takovým atomem procházela. (V tomto případě jsou sice vnitroatomové náboje α -částici blíže, ale protože ji nyní obklopují, síly, jimiž na ni působí, se navzájem – do menší či větší míry (v závislosti na okamžité poloze α -částice v atomu) – kompenzují.) Ať by tedy relativně rychlá α -částice jednotlivý thomsonovský atom mívěla nebo jím pronikala, měla by se při tom odchýlit od původního směru jen nepatrně.

Zdlouhavé experimenty s rozptylem α -částic na tenkých kovových fóliích, které prováděli od podzimu 1907 – pod Rutherfordovým ideovým vedením – Hans Geiger (1882-1945) a Ernest Marsden (1889-1970), však překvapivě ukázaly, že kromě očekávaného maloúhlového rozptylu dochází rovněž – sice s mnohem menší, ale nenulovou pravděpodobností – k rozptylu do velkých úhlů: Z každých přibližně desetitisíc α -částic se jedna odchyluje o úhel větší než 90° a dokonce bylo registrováno i několik jednotlivých α -částic rozptýlených pod úhlem blízcím se 180° (tj. odražených zpět). Velkoúhlový rozptyl α -částice se tedy pozoruje jen velmi zřídka. Pokud by ovšem struktura atomu byla thomsonovská, nemohlo by na něm k takovému rozptylu dojít nikdy.

O nic nadějnější nebyla ani (Thomsonova) idea interpretovat pozorovanou velkou odchylku α -částice od původního směru jako sumu malých odchylek, ke kterým by docházelo na atomech, s nimiž α -částice postupně interaguje během svého průchodu fólií. Tuto hypotézu, opírající se o skutečnost, že tloušťka fólie je přibližně rovna tisícinásobku meziatomové vzdálenosti, diskvalifikuje mizivě malá pravděpodobnost takového nahromadění následných malých odchylek na stejnou stranu. Počet α -částic rozptýlených do velkých úhlů by totiž v důsledku toho musel být o mnoho řádů menší, než bylo zjištěno experimentálně.

Předběžný rozbor tohoto typu přivedl Rutherforda k přesvědčení, že thomsonovská představa o rozložení hmoty a náboje v atomu není správná a že velkoúhlová odchylka α -částice od původního směru je způsobena její interakcí s jediným terčovým atomem. Následným teoretickým rozbohem pak dospěl k závěru, že za takové odchylky je zodpovědné „kladné závaží“ atomu – tj. jeho část obsahující všechny jeho kladný náboj a téměř veškerou hmotnost ($\approx 99.95\%$ hmotnosti atomu) – jež musí mít poloměr přinejmenším o čtyři řády menší než sám atom. A poněvadž kromě „kladného závaží“, které – vzhledem k jeho nepatrné velikosti – Rutherford nazval atomovým jádrem, atom obsahuje už jen elektrony, lze konstatovat, že sestává z malého těžkého kladného jádra a rozlehlého lehkého záporného (elektronového) obalu.¹⁶⁾

Rutherfordův objev – dnes považovaný za mezník ve studiu struktury atomu – ale bezprostředně odpovídající ohlas nevzbudil. Jaderný model totiž přinášel „jen“ jeden nový poznatek: informaci (vzápětí spolehlivě experimentálně ověřenou! [38]) o rozložení hmoty a náboje v atomu. O palčivých problémech pohybu elektronů, optických spekter či chemických vlastností atomu však nevypovídal nic. Rutherford si toho byl ovšem dobře vědom a ve svém klíčovém sdělení [37] je všechny obešel větou:

„Otázka stability navrhovaného atomu se v tomto stadiu nezvažuje, neboť evidentně závisí na [zatím neznámé]detailní stavbě atomu a na pohybu jeho nabitých konstituentů.“

Svoje závěry zprvu prezentoval spíše jako teorii rozptylu α -částic a z atomistického hlediska je komentoval jen zdrženlivě. Dobře to ilustruje i fakt, že ve své obsažné učebnici [39] věnuje jadernému modelu jen tři stránky, na nichž lze najít i jeho tehdejší detailní představu o stavbě atomu:

¹⁶⁾ Podrobněji a v širších souvislostech popsal autor objev atomového jádra v článku [11]. Originální Rutherfordův výklad je obsahem práce [37].

„[Kladně nabitě jádro je] ... obklopeno elektrony, o nichž lze předpokládat, že jsou rozmístěny v celém sférickém objemu [atomu] nebo v jedné rovině v soustředných prstencích.“¹⁷⁾

Podrobněji formulovanou domněnku pak věnuje atomovému jádru, které se stává hlavním objektem jeho dalšího vědeckého zájmu [40]:

„Není pochyb o tom, že nabitý střed atomu je složitým dynamickým systémem sestávajícím částečně z nabitého hélia a vodíkových atomů [= α -částic a protonů]. Zdá se, že kladně nabitě atomy látky se na malých vzdálenostech navzájem přitahují, neboť jinak si lze obtížně představit, jak se součásti centra udrží pohromadě.“

Bohrovi bezprostřední předchůdci

Prvním, kdo se pokusil využít v souvislosti se strukturou atomu kvantových představ, byl brněnský rodák Arthur Erich Haas (1884-1941). Již rok před publikací Rutherfordova jaderného modelu přišel v habilitační práci podané na vídeňské univerzitě s ideou možné souvislosti Planckovy konstanty s obecnými vlastnostmi atomů. Někdejší Planckovy oscilátory emitující a absorbující dutinové záření¹⁸⁾ nahradil ve svých úvahách jednoduchými thomsonovskými atomy, jejichž jediný elektron obíhal po kružnici obepínající jejich rovník. (Poznamenejme, že dynamika takového elektronu je stejná jako v případě použití pozdější jaderné představy o atomu!) Zkombinováním druhého Newtonova zákona, Coulombova zákona, Balmerovy formule pro vlnčet spektrálních čar a vlastní (blíže nekomentované) „kvantové podmínky“ (spočívající v požadavku rovnosti potenciální energie elektronu energii světelného kvanta) pak dospěl k vyjádření Planckovy konstanty h pomocí parametrů svého modelu – náboje e a hmotnosti m elektronu a poloměru jeho oběžné dráhy. Podobně bylo naopak možné určit poloměr atomu prostřednictvím e , m , a h , to však Haasovým záměrem nebylo. Pomocí těchto konstant a rychlosti světla c však poprvé teoreticky vyjádřil i – doposud jen empiricky určenou – Rydbergovu konstantu R . Číselná hodnota, kterou pro ni takto získal, měla sice správný řád, byla však zhruba osmkrát větší než její hodnota experimentální. Z dnešní perspektivy patří Haasovu kvantovému pojetí atomu nesporně priorita. Nicméně logické směřování jeho úvah – vyjádření dosud tajemné Planckovy konstanty pomocí parametrů atomového modelu¹⁹⁾ – a rovněž absence přijatelného zdůvodnění nezvyklé „kvantové podmínky“ se nesetkalo u mnoha fyziků s pochopením. Jeho práce byla ostře kritizována a nadlouho zapomenuta [43].



Arthur Erich Haas

S jinou „kvantovou“ představou o atomu přišel následujícího roku 1911 John William Nicholson (1881-1955). Na jeho sklonku navrhl model, v němž „kladná elektrina existuje v jednotkách, jejichž velikost je velmi malá dokonce i ve srovnání s elektrony a je spojena s téměř veškerou hmotou atomu [44].“ Poněvadž jej publikoval až několik měsíců po Rutherfordově

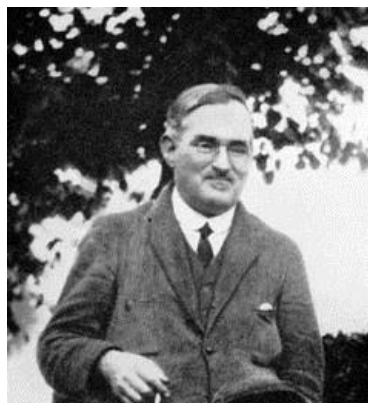
¹⁷⁾ Od velmi podobné – spekulativní – Nagaokovy představy, kterou Rutherford připomíná, se tento koncept výrazněji liší jen nepatrnými rozměry kladného náboje.

¹⁸⁾ Způsob zavedení Planckovy konstanty, dobové reakce fyzikální komunity a některé další relevantní události stručně připomíná např. [41].

¹⁹⁾ Rozhodným oponentem takového pojetí byl například Arnold Sommerfeld (1868-1951), jenž hledání jakékoli dynamické interpretace Planckovy konstanty rezolutně odmítal. Existenci a vlastnosti atomů je, podle něj, třeba chápat jako „důsledek existence elementárního kvanta účinku ... Elektromagnetické nebo mechanické 'vysvětlení' h “, píše Sommerfeld, „považuji za tak zbytečné a neplodné, jako mechanické 'vysvětlení' Maxwellových rovnic. Vědě by bylo velmi ku prospěchu, kdyby se spíše zkoumaly důsledky hypotézy o h a její souvislosti s dalšími jevy [42].“

práci [37], mohl se již opřít i o jeho závěry, které doplnil konstatováním, že pokud jde o elektrony, jejich „planetární systém je nejpravděpodobnější“. Tím jeho návrh na jedné straně nabyl značné podobnosti s Nagaokovým modelem, charakterem výpočtů i argumentací a komentáři však byl blíže představám Thomsonovým.

Kromě poměrně velmi konkrétních – byť většinou, pochopitelně, nesprávných – formulací se Nicholsonův model lišil od předchozích pojetí hlavně tím, že se podstatně více odkazoval na astrofyzikální experimentální data než na výsledky laboratorní. Nicholson totiž



John William Nicholson

sdílel přesvědčení druhdy vyjádřené Williamem Crookesem (1832-1919) a Josephem Normanem Lockyerem (1836-1920), že pozemská hmota se vyvinula z jednodušších forem, které ještě existují ve hvězdách a mlhovinách a mohou být tudíž studovány spektroskopicky. Ve snaze najít interpretaci některých neidentifikovaných čar ve spektrech mlhovin a sluneční koróny je Nicholson připisoval čtyřem hypotetickým primárním elementům, jež nazval koronium (jeho atom měl obsahovat dva protilehlé elektrony rovnoměrně obíhající po téže kružnici kolem jádra nesoucího kladný náboj $2e$), „vodík“ (tři elektrony), nebulium (čtyři elektrony), protofluorin (pět elektronů). Atomy všech běžných (pozemských) prvků pak měly být kombinacemi proto-atomů „vodíku“, nebulia a protofluorinu.²⁰⁾

Strukturou atomů chemických prvků se Nicholson ovšem zabýval jen okrajově. Jeho hlavním zájmem byly detaily stavby prvotních proto-atomů a následně výpočet jejich spekter. Za jejich původce přitom považoval – inspirován dřívějším názorem Thomsonovým – příčné kmity elektronových prstenců. Právě při těchto úvahách zahrnul do svého postupu Planckovu ideu kvantování vibrací, když porovnáním svých výsledků s frekvencemi některých (dosud neinterpretovaných) čar hvězdných spekter dospěl k závěru, že moment hybnosti rotujících elektronů je s dobrou přesností roven celistvému násobku Planckovy konstanty. Zobecnění takového požadavku také na další konkrétní hodnoty těchto násobků a na všechny proto-atomy jej přivedlo i k předpovědi spektrálních čar, které nebyly pozorovány. A pozdější objev některých z nich jej (a řadu dalších), samozřejmě, utvrdil ve správnosti zvoleného přístupu.²¹⁾

Už rok před vydáním věhlasné Bohrovy trilogie [46] potom píše:

„Má-li Planckova konstanta, jak Sommerfeld navrhuje, atomistický význam, lze tomu rozumět tak, že moment hybnosti atomu se může zvětšovat nebo zmenšovat pouze o diskrétní hodnoty, když elektron opouští [atom] nebo se [do něj] vrací. Snadno se nahlédne, že takové pojetí klade představitosti menší potíže než obvyklá interpretace, podle níž má atomistický [= nespojitý] charakter sama energie [47].“

Tato citace naznačuje, že i přes novátorské využití Planckovy konstanty v tehdejších úvahách o stavbě atomu, Nicholson byl podstatou svého myšlení klasickým fyzikem. A zůstal jím zřejmě i nadále, jak dokládá také jeho pozdější výrok, že atomová spektra jsou důsledkem „dynamických vibrací atomu, jejichž frekvence jsou přenášeny k našim přístrojům prostřednictvím éteru. [48]“²²⁾

²⁰⁾ Ačkoliv tříelektronový „vodík“ měl být velmi podobný běžnému (pozemskému) vodíku, Nicholson je nepovažoval za totožné. Nejjednodušší atomární soustavou bylo v jeho schématu koronium, které se mělo nacházet jen ve sluneční koróně. Jednoelektronový atom, jako nestabilní, v něm místo neměl, zatímco radiální stabilita dvou- až pětielektronových proto-atomů se zdůvodňovala – v duchu někdejších Thomsonových úvah – tím, že celkové zrychlení souboru stejnoměrně rozložených elektronů rovnoměrně rotujících podél (rovinného) prstence je nulové. (Podobnou argumentaci poprvé použil v roce 1897 Joseph Larmor (1857-1942) [12].)

²¹⁾ Jejich správná interpretace byla nalezena až mnohem později [45].

²²⁾ Velmi příkře se o kvalitě Nicholsonovy inovace vyjádřil dlouholetý spolupracovník a osobní asistent Nielse Bohra Léon Rosenfeld (1904-1974): „*To, jakým způsobem se [Nicholson] snažil využít svůj model k analýze fyzikálních situací, působí dojmem naprosté svévole a absence profesionality a ty případy, kdy skutečně dospěl*

Bohrův model

Bohrův model atomu (vodíkového typu) byl vyvrcholením snah obrysově připomenutých v předcházejícím textu. I když by se při (velmi) povrchním pohledu snad mohlo zdát, že vykazuje některé rysy připomínající formulace svých bezprostředních předchůdců (Haasovo vyjádření Rydbergovy konstanty, Nicholsonovo kvantování momentu hybnosti), fyzikální podstata jeho pojetí je naprosto odlišná. Bohr, který Haasovu práci neznal a od Nicholsonových představ se distancoval, to později komentoval slovy: „*Použití Planckových idejí v souvislosti s touto problematikou už bylo ve vzduchu ...* [30].“ Vzhledem ke své převratnosti byla Bohrova koncepce celou řadou i velmi významných fyziků – alespoň zpočátku – přijímána se značnou nedůvěrou [50]. Jedním z jejích nejhlasitějších kritiků byl Nicholson, jehož v podstatě klasický přístup preferovali také mnozí jiní, a neakceptoval ji ani Thomson, jenž se v téže době ještě pokoušel o poslední – neúspěšnou – modifikaci svého modelu.



Niels Henrik Bohr

Výklad a komentář Bohrova modelu vydá na rozsáhlý samostatný příběh, který už však leží mimo rámec tohoto příspěvku. Autor jej nedávno obšírně popsal na jiném místě [50].²³⁾

Literatura

- [1] A. Lacina: „Atom – od hypotézy k jistotě“, Čs. čas. fyz. **48**, 282 (1998).
- [2] A. B. Arons: „Cesta k přírodovědné gramotnosti“, Čs. čas. fyz. **A35**, 58 (1985).
- [3] R. Brdička a kol.: *Úvod do fyzikální chemie*. SNTL, Praha 1972.
- [4] S. Cannizzaro: „Sunto di un corso di filosofia chimica“, *Il Nuovo Cimento* **7**, 321 (1858).
- [5] C. de Milt: „The Congress at Karlsruhe“, *Journal of Chemical Education* **28**, 421 (1951).
- [6] H. Hartley: „Stanislao Cannizzaro, F.R.S. (1826-1910) and the First International Chemical Conference at Karlsruhe“, *Notes and Records of the Royal Society of London* **21**, 56 (1966).
- [7] Ja. Dorfman: *Vsemirnaja istorija fiziki (s načala XIX. do serediny XX vv.)*. Nauka, Moskva 1979.
- [8] R. Zajac, J. Šebesta: *Historické pramene súčasnej fyziky 1*. Alfa, Bratislava 1990.
- [9] L. M. Brown, A. Pais, B. Pippard: *Twentieth Century Physics*. IOPP, Bristol and Philadelphia, AIPP, New York 1995.
- [10] P. Kudrjavcev: *Kurs istorii fiziki*, Prosvěščenije, Moskva 1974.
- [11] A. Lacina: „Deset kroků do mikrosvěta“, Čs. čas. fyz. **57**, 243 (2007).
- [12] A. Pais: *Inward Bound: Of Matter and Forces in the Physical World*. Clarendon Press, Oxford 1986.

ke shodě mezi vypočtenými frekvencemi a pozorovanými spektrálními čarami, lze pokládat jen za shodu náhod. ... není zde žádná fyzikální argumentace, ale jen žonglování s čísly ... [49].“

²³⁾ Zaujatému čtenáři doporučuje jako rozšíření práce [50] poutavé pojednání [H. Kragh: „Resisting the Bohr Atom: The Early British Opposition“, *Physics in Perspective* **13**, 4 (2011)] publikované později.

- [13] H. Kragh: *Before Bohr: Theories of Atomic Structure 1850 – 1913*. Re Poss: Research Publications on Science Studies **10**, University of Aarhus, Aarhus 2010.
- [14] E. N. da C. Andrade: „The Birth of Nuclear Physics“, *Proceedings of the Royal Society* **A244**, 437 (1958).
- [15] H. von Helmholtz: „Über Integrale den hydrodynamischen Gleichungen, welche den Wirbelbewegungen entsprechen“, *Journal für die reine und angewandte Mathematik* **55**, 25 (1858).
- [16] H. Kragh: „The Vortex Atom: A Victorian Theory of Everything“, *Centaurus* **44**, 32 (2002).
- [17] R. H. Silliman: „William Thomson: Smoke Rings and Nineteenth-Century Atomism“, *Isis* **54**, 461 (1963).
- [18] J. J. Thomson: „Cathode Rays“, *Philosophical Magazine* **44**, 293 (1897).
- [19] J. J. Thomson: „On the Masses of Ions in Gases at Low Pressures“, *Philosophical Magazine* **48**, 547 (1899).
- [20] J. Perrin: „Les hypothèses moléculaires“, *Revue Scientifique* **15**, 449 (1901).
- [21] W. Thomson: „Aepinus Atomized“, *Philosophical Magazine* **3**, 257 (1902).
- [22] P. Lenard: „Über die Absorption von Kathodenstrahlen verschiedener Geschwindigkeit“, *Annalen der Physik* **12**, 714 (1903).
- [23] F. Redtenbacher: *Das Dynamidensystem. Grundzüge einer mechanischen Physik*. Friedrich Basserman, Manheim 1857.
- [24] J. C. Maxwell: *On the Stability of Saturn's Rings*. Macmillan, Cambridge 1859.
- [25] H. Nagaoka: „On a Dynamical System Illustrating the Spectrum Lines and the Phenomena of Radio-activity“, *Nature* **69**, 392 (1904).
- [26] H. Nagaoka: „Kinetics of a System of Particles Illustrating the Line and Band Spectrum and the Phenomena of Radio-activity“, *Philosophical Magazine* **7**, 445 (1904).
- [27] G. A. Schott: „On the Kinetics of System of Particles Illustrating the Line and Band Spectra“, *Philosophical Magazine* **8**, 384 (1904).
- [28] J. J. Thomson: „On the Structure of the Atom“, *Philosophical Magazine* **7**, 237 (1904).
- [29] R. S. Strutt (Rayleigh): *The Life of Sir J. J. Thomson: sometime Master of Trinity College, Cambridge*. Cambridge University Press, Cambridge 2012.
- [30] N. Bohr: Oral history interview of N. Bohr by T. S. Kuhn, 1962, in Archives of the History of Quantum Physics, Niels Bohr Library, American Institute of Physics, New York. (Citováno podle [12].)
- [31] C. Baily: „Early Atomic Models – from Mechanical to Quantum“, *European Physical Journal H* **38**, 1 (2013).
- [32] J. J. Thomson: „The Magnetic Properties of Systems of Corpuscles Describing Circular Orbits“, *Philosophical Magazine* **6**, 673 (1903).
- [33] J. J. Thomson: *Electricity and Matter*. C. Scribner's Sons, New York 1904.
- [34] R. Zajac, J. Pišút, J. Šebesta: *Historické pramene súčasnej fyziky 2*. Univerzita Komenského Bratislava, Bratislava 1997.
- [35] J. J. Thomson: „On the Number of Corpuscles in an Atom“, *Philosophical Magazine* **11**, 769 (1906).
- [36] M. Novotný: „Kdy a jak byly položeny fyzikální základy hmotnostní spektrometrie“, *Čs. čas. fyz.* **63**, 365 (2013).
- [37] E. Rutherford: „The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom“, *Philosophical Magazine* **21**, 669 (1911).
- [38] H. Geiger, E. Marsden: „The Laws of Deflection of α Particles through Large Angles“, *Philosophical Magazine* **25**, 604 (1913).

- [39] E. Rutherford: *Radioactive Substances and their Radiations*. Cambridge University Press, Cambridge 1913.
- [40] A. Lacina: „Ernest Rutherford – Newton atomové fyziky“, Čs. čas. fyz. **62**, 448 (2012).
- [41] A. Lacina, H. Martinásková: „Kvantové vlastnosti elektromagnetického záření v gymnaziální fyzice“, Matematika, fyzika, informatika **17**, 407 (2008).
- [42] A. Sommerfeld: „Das Plancksche Wirkungsquantum und seine allgemeine Bedeutung für die Molekularphysik“, Physikalische Zeitschrift **12**, 1057 (1911).
- [43] M. Jammer: *Evoljucija ponjatij kvantovoj mehaniki*. Nauka, Moskva 1985. (Orig.: *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*. Mc Graw-Hill, New York 1967.)
- [44] J. W. Nicholson: „A Structural Theory of Chemical Elements. Philosophical Magazine **22**, 864 (1911).
- [45] I. S. Bowen: „The Origin of Nebulium Lines“, Nature **120**, 473 (1927).
- [46] N. Bohr: „On the Constitution of Atoms and Molecules I – III“, Philosophical Magazine **26**, 1, 476, 857 (1913).
- [47] J. W. Nicholson: „The Constitution of the Solar Corona II“, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **72**, 677 (1912).
- [48] J. W. Nicholson: „Emission Spectra and Atomic Structure“, Journal of Chemical Society, Transactions **115**, 855 (1919).
- [49] L. Rosenfeld: *Úvod. V: N. Bohr: On the Constitution of Atoms and Molecules (reprint of Bohr's papers of 1913)*. Munksgaard, Copenhagen 1963.
- [50] A. Lacina: „Bohrův model atomu“, Pokroky matematiky, fyziky a astronomie **53**, 125 (2008)