

DESET KROKŮ DO MIKROSVĚTA

Aleš Lacina

Fyzika mikrosvětla je zvláštní disciplínou. Na rozdíl od ostatních fyzikálních partií, které jí ve školním učivu předcházejí a které většinou popisují svět naší každodenní zkušenosti (makrosvět), se totiž zabývá studiem chování a vlastností objektů, jež nelze vnímat lidskými smysly. Ani přímo, ani s pomocí jednoduchých přístrojů, jako je například lupa nebo optický mikroskop.

Máme-li se o čemkoli poctivě a zodpovědně vyjadřovat, musíme být schopni svá tvrzení podepřít srozumitelnými průkaznými argumenty. Při popisu a vysvětlování jevů probíhajících v makrosvětě je situace zjednodušena tím, že vyslovovaným závěrům dodává věrohodnosti i přímá smyslová zkušenost. Její absence v případě mikrosvětla naopak vede k nezbytnosti spolehnout se jen na výsledky experimentů. A teprve na základě jejich pečlivého kritického rozboru si postupně vytvářet představu o složení a vnitřním uspořádání smyslově nedostupného mikrosvětla a následně i o vlastnostech a chování mikroobjektů.

Dnes běžné vzdělávací postupy se však bohužel ubírají jinou cestou: s poněkud demagogickým odkazem na iluzorní potřebu přiblížit – i na střední škole – obsah vyučování současnému stavu vědy zpravidla rychle míjejí základy, na nichž je moderní fyzika vybudována a akcentují spíše „zajímavější“ aktuální témata. Praktickým důsledkem tohoto způsobu vzdělávání ovšem jsou jen povrchní útržkovité znalosti převážně deklarativního charakteru a – což je ještě horší – tendence studentů, nechápajících pojmy a představy, jimiž se v diskusi takových problémů operuje, uvažovat a mluvit o věcech, jejichž skutečné podstatě nerozumějí. Preference vyspělých témat k vyšší vzdělanosti automaticky nevede. A pouštět se do nich se studenty, jejichž „přesvědčení“ např. o diskrétní struktuře hmoty spočívá jen v zapamatovaných názvech „atom“, „elektron“, „jádro“, ..., které jim byly předloženy bez jakékoli informace o empirickém materiálu a úvahách, jež k vytvoření těchto pojmů vedly, je sice snad na první pohled efektní, ale rozhodně intelektuálně nečestné, pokud svým svěřencům napřed nepomůžeme vytvořit a důkladně pochopit nezbytné základy. Je zřejmě nanejvýš žádoucí – namísto mluvení (do značné míry planého) o efektních tématech, na něž jejich fyzikální erudice, ani rozumové schopnosti zatím nestačí – nechat studenty pohlédnout na tematiku mikrosvětla prizmatem sice méně vznešených, zato však poctivě zvládnutelných problémů.

Účelem a snahou následujících stránek je demonstrovat možnost naplnění tohoto požadavku připomenutím logiky (i historie) postupu, který přivedl k přesvědčení o existenci atomů a k základní představě o jejich struktuře. Tyto fundamentální poznatky, na nichž stojí celá moderní přírodověda, se dnes ve školní výuce prezentují velmi formálně – v podstatě informativním způsobem [1]. Přitom cesta, jíž člověk dospěl od někdejší nevědomosti k současnému **porozumění** je zvládnutelná i na gymnaziální úrovni a má nesmírnou jak fyzikální, tak pedagogickou hodnotu.

Toto pojednání je míněno jako náčrt úvodního výkladu zmíněné problematiky prováděný rozšiřujícími poznámkami fyzikálně-metodického charakteru. Ke zvýraznění jeho hlavní ideové linie byly některé komentáře, které tento fyzikální příběh prohlubují a uvádějí jej do širších souvislostí, přesunuty – do poměrně rozsáhlého poznámkového aparátu. Čtenář jich však zajisté může – podle svého uvážení – na libovolném místě libovolně použít k rozšíření či jiné vlastní modifikaci základního textu.

Nejpřirozenějším začátkem jakékoli úvodní prezentace fyziky mikrosvětla je jistě vytvoření základní představy o jeho struktuře. Právě ona je totiž východiskem všech dalších

úvah a proto musí být nejen jasně formulována, ale měla by být také pečlivě, přesvědčivě zdůvodněna. Základní otázkou a prvním krokem do mikrosvěta je tedy problém jeho struktury. Všichni jsme od útlého věku vychováváni v přesvědčení (nebo ve víře?), že

1. LÁTKY SE SKLÁDAJÍ Z ATOMŮ.

Tento závěr však není nijak samozřejmý. Obvyklé konstatování, že to věděli již staří Řekové, kriticky uvažujícího člověka neuspokojí: že dělitelnost látek končí atomy, starořečtí filozofové nevěděli, nýbrž pouze předpokládali. a navíc jen někteří, zatímco jiní zastávali opačný názor. Ani případný – rovněž často užívaný – odkaz na moderní vyspělé experimentální techniky není vhodným argumentem, poněvadž už jenom vysvětlit princip činnosti těchto přístrojů, natož pak porozumět jejich údajům, je samo o sobě podstatně obtížnější než odpovédět na výchozí otázku. (Dlouhou historii vývoje představ o struktuře látek stručně popisuje článek *Nespojitá struktura látek – konstatovat nebo vysvětlit?*, který lze nalézt i na tomto portálu [2].)

Pokud již na existenci atomů přistoupíme – není bez zajímavosti připomenout, že přírodověda to bez výhrad udělala teprve před sto lety [2] – máme před sebou další krok: podrobněji atomy popsat. Dnes všichni „víme“, že

2. ATOMY MAJÍ VNITŘNÍ STRUKTURU.

Toto tvrzení se však diametrálně liší od názorů duchovních otců atomistické koncepce (Leukippos 500–450 př. n. l., Démokritos 460–370 př. n. l.), kteří atomy považovali za nejmenší – dále nedělitelné – stavební jednotky látek. Vlastnosti různých objektů našeho světa pak zdůvodňovali různým tvarem, velikostí, pohybem a spojováním vnitřně nestrukturovaných atomů. Ani zakladatel chemického atomismu John Dalton (1766–1844) o třicet století později o případné vnitřní struktuře atomů neuvažoval, když všechny svoje úvahy založil na hypotéze, že základními stavebními jednotkami látek jsou neměnné – nezničitelné a nestvořitelné – atomy, které jsou v chemických reakcích – jako celky – spojovány a rozlučovány.

První náznak, že se uvnitř atomů něco děje a že by tedy měly být strukturovanými objekty přineslo ztotožnění optických spekter zahřátých zředěných plynů se spektry atomovými (tedy závěr, že elektromagnetické záření emitované zahřátými zředěnými plyny má původ uvnitř atomů), k němuž došlo ve druhé polovině devatenáctého století [P1]. Skutečnost, že jednotlivý atom vysílá (i pohlcuje) světlo, totiž není myslitelná bez průvodních změn v jeho nitru.

Mezníkem v nazírání na atom se však stal až objev přirozené radioaktivity (1896; Henri Becquerel 1852–1908) a zejména následné podrobné experimentální prozkoumání tohoto jevu (Ernest Rutherford 1871–1937). Z pozorované postupné změny chemického složení radioaktivních vzorků totiž vyplynulo, že současně s emisí radioaktivního záření dochází k přeměně jednoho prvku v prvek druhý. Jinak řečeno, atomy určitého druhu se mění v atomy jiného druhu, což ovšem znamená, že nejsou tak stálé a neměnné, jak se doposud věřilo: „*Atomy [radioaktivních prvků] z chemického hlediska nedělitelné, jsou zde dělitelné,*“ píše Marie Curie (1867–1934) v roce 1900 a dodává, že vysvětlení radioaktivity vymršťováním subatomárních částic „*vážně podkopává [stávající] chemické principy.*“

Následující úvahy o atomech již spočívaly ve spekulacích o vnitřním ustrojení – tedy o stavbě – atomu. (Cesta k jednoznačným formulacím uváděným v dnešních učebnicích však byla ještě dlouhá a je v mnoha směrech poučná.) Všechny tyto představy měly – přes veškerou

svoji rozdílnost – jeden společný rys. Každá z nich předpokládala, že součástí atomu jsou mikroobjekty objevené rok po objevu přirozené radioaktivity – *elektrony*.

Třebaže dnes najdeme všechny základní informace o elektronu v každých sebestručnějších fyzikálních tabulkách, situace vždy „takhle jasná“ nebyla. Nejprve byl

3. **ELEKTRON OBJEVEN JAKO ZÁPORNĚ NABITÝ MIKROOBJEKT S MIMOŘÁDNĚ VELKÝM MĚRNÝM NÁBOJEM (q/m).**

Sám objev elektronu s úvahami o stavbě atomu nesouvisel. Byl vyústěním experimentálního studia elektrických výbojů v plynech, které započalo již v padesátých letech devatenáctého století. V té době zjistil Heinrich Geissler (1814–1879), že napětí přibližně 1000V mezi elektrodami zatavenými ve skleněné trubici, v níž je tlak roven asi tisícině tlaku atmosférického, způsobí vznik zářícího oblaku vyplňujícího trubici. Snížení tlaku v trubici způsobilo nejprve lokalizaci oblaku jen do prostoru mezi elektrodami. Další snižování tlaku se současným zvyšováním napětí na elektrodách (Julius Plücker 1801–1868) mělo za následek vznik nového jevu: sílí světélkování stěn trubice – především v oblasti protilehlé záporné elektrodě; zářivý oblak uvnitř trubice při tom naopak postupně slábl. Výsledkem tohoto experimentování byl závěr, že všechny tyto jevy způsobuje něco, co vystupuje ze záporné elektrody (katody) – *katodové paprsky*, resp. *katodové záření* (Plücker 1858).

V následujících letech byly vlastnosti katodového záření intenzivně zkoumány řadou badatelů. Nejprve Plücker zjistil, že se paprsek katodového záření vychyluje v magnetickém poli a to na tutéž stranu, na niž by se vychyloval svazek záporně nabitých částic. William Crookes (1832–1919) v řadě experimentů konaných v šedesátých a sedmdesátých letech prokázal mj. tepelné a mechanické účinky katodového záření a na základě všech těchto výsledků vyslovil domněnku (1879), že toto záření je proudem molekul zbytkového plynu v trubici, které nejprve dopadem na katodu získají záporný náboj a následně jsou od ní odpuzovány.

Tomuto závěru oponoval německý fyzik Heinrich Hertz (1857–1894), jenž se marně snažil odchýlit svazek katodového záření přiložením elektrického pole (1883). Hertzův názor podporoval jeho krajan Philipp Lenard (1862–1947), který nejprve (1894) experimentálně prokázal, že katodové záření má podstatně větší pronikavost než by mohl mít jakýkoli molekulární či atomární svazek, a po té zjistil, že ani po dlouhodobém pronikání katodového záření do vyčerpané nádoby v ní nelze detekovat žádnou látku (plyn) [P2].

S definitivní platností o povaze katodového záření rozhodly experimenty Josepha Johna Thomsona (1856–1940), jemuž se roku 1896 podařilo – při dokonalejším vyčerpání trubice – odchýlit katodové paprsky i elektrickým polem. Na základě toho (a s odkazem na zmíněné Plückerovy a Crookesovy experimenty) vyslovil přesvědčení, že katodové záření je proudem stejných záporně nabitých částic [P3]. Následujícího roku pak tuto hypotézu podpořil experimentálním určením měrného náboje těchto korpusek

$$q / m \approx (-) 10^{11} \text{ C kg}^{-1} .$$

Mimořádně pozoruhodné při tom bylo, že tato hodnota je tisíckrát větší než do té doby největší známý měrný náboj (měrný náboj vodíkového iontu zjištěný v elektrolytických experimentech $q_H/m_H = 9.6 \cdot 10^7 \text{ C kg}^{-1}$). Pro pojmenování korpusek katodového záření byl přijat již existující termín *elektron*, který byl do té doby používán k označení velikosti náboje vodíkového iontu ($q_H = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; dnes je tato hodnota zpravidla označována symbolem e a nazývána *elementární náboj*).

Z počátku byl tedy jedinou známou charakteristikou nově objeveného elektronu jeho měrný náboj q/m , zatímco jeho náboj q a hmotnost m samy o sobě známy nebyly.

I když za této situace připadalo v úvahu více možností

- elektron má náboj srovnatelný s nábojem vodíkového iontu ($|q| \approx q_H$) a asi tisíckrát menší hmotnost ($m \approx 0.001 m_H$),
- elektron má hmotnost srovnatelnou s hmotností vodíkového iontu ($m \approx m_H$) a asi tisíckrát větší náboj ($|q| \approx 1000 q_H$),
- elektron má jiné hodnoty hmotnosti ($m \neq m_H$) a náboje ($|q| \neq q_H$) slučitelné s experimentálním výsledkem $q/m \approx (-) 10^{11} \text{ C kg}^{-1}$,

obecný názor fyzikální komunity se vzápětí přiklonil k první alternativě:

4. ELEKTRON JE MIKROOBJEKT S (RELATIVNĚ) MALOU HMOTNOSTÍ NESOUCÍ ZÁPORNÝ NÁBOJ BĚŽNÉ VELIKOSTI.

Především se totiž zdálo být podstatně pravděpodobnější, že pozornosti experimentátorů dosud unikala spíše nepatrný objekt s nevelkým nábojem než objekt běžné velikosti nesoucí obrovský náboj. Hlavně však tímto směrem ukazovalo dřívější, výše již zmiňované, Lenardovo experimentální zjištění, že katodové záření – teď už ovšem interpretované jako proud elektronů – má o několik řádů vyšší pronikavost látkou než atomové, molekulové či iontové svazky [P2]. Úplnou jistotu pak přineslo Thomsonovo přímé experimentální určení náboje elektronu q (pomocí právě zkonstruované první verze Wilsonovy mlžné komory) provedené v roce 1898. (Dnešní učebnicová literatura, např. [3], odkazuje zpravidla na experimentální stanovení této veličiny, jehož autorem je Robert Andrews Millikan (1868–1953). Millikanovo měření je sice přesnější než Thomsonovo, heuristický význam však nemělo, neboť bylo provedeno až o dvanáct let později.)

Mnohonásobné opakování Thomsonova experimentu s trubicemi s katodami zhotovenými z různých materiálů, dřívější (1879) Edisonovy zkušenosti získané při práci na konstrukci žárovky (~ termoemise), zjištění, že elektrony lze uvolnit z různých vodičů i jejich ozáření elektromagnetickým zářením (= fotoelektrický jev), přivedly k závěru, že

5. VŠECHNY LÁTKY OBSAHUJÍ ELEKTRONY.

Ani doposud diskutované experimenty, ani zatím provedené úvahy nás ovšem neopravňují automaticky lokalizovat elektrony, jak jsme zvyklí, do nitra atomů.

Možnosti se totiž nabízejí dvě:

- látky se skládají z atomů (o nichž už se vědělo dříve) a elektronů (které byly nově objeveny),
- látky sestávají z atomů obsahujících elektrony.

„Jistěže“ vybereme druhou možnost. Ale na základě čeho?

Nejjednodušším zdůvodněním takové volby je poukaz na experimentální fakt, že atomární plyn (= soubor navzájem neinteragujících atomů) je za normálních podmínek izolantem, avšak po zahřátí na vysokou teplotu nebo ozáření elektromagnetickým zářením dostatečně vysoké frekvence se stává elektricky vodivým. Zatímco první část tohoto zjištění je přesvědčivým argumentem pro zpravidla blíže nekomentované tvrzení, že

6. ATOMY JSOU ELEKTRICKY NEUTRÁLNÍ,

schopnost vést elektrický proud, zmiňovaná v jeho druhé části, ukazuje na existenci volných elektrických nábojů v tomto případě. Jejich přítomnost vysvětluje J. J. Thomson již v roce 1899 slovy „... *elektrizace* [dnes bychom řekli ionizace] *v podstatě spočívá v rozštěpení atomu, při čemž se jeho část odděluje a stává se volnou...*“ a na základě toho konstatuje, že

7. **ELEKTRONY JSOU SOUČÁSTÍ ATOMŮ.**

Kromě elektronů nesoucích záporný náboj musí neutrální atom samozřejmě obsahovat stejně velký kompenzující kladný náboj. Přemýšlivý čtenář – poučen, a věrme, že i motivován, předcházejícím příběhem – nyní snad již nesklozne přímo k nazpaměť naučeným veršikům o atomovém jádru a jeho obalu, ale uvědomí si, že intelektuální poctivost vyžaduje každé takové tvrzení podložit spolehlivými argumenty. Opět je tedy nutné nejprve kvalifikovaně posoudit přinejmenším dvě základní alternativy slučitelné s předcházejícími závěry:

- Atom obsahuje tisíce elektronů, jejichž celková hmotnost je rovna polovině jeho hmotnosti, a stejný počet analogických kladně nabitých mikroobjektů (hypotetických „kladných elektronů“), které přispívají ke hmotnosti atomu druhou polovinou a kompenzují záporný náboj elektronů.
- Atom obsahuje nevelký počet elektronů, jež přispívají k celkové hmotnosti atomu zanedbatelně. Ta je téměř celá soustředěna v jeho zbytku nesoucím kompenzující kladný náboj.

Jednoduchým argumentem proti první a ve prospěch druhé možnosti je nesymetrie všech druhů emise vzhledem ke znaménku uvolňovaného náboje: Jak při zahřívání (termoemise), tak při ozařování (fotoelektrický jev) z látek vystupuje vždy jen záporný náboj (elektrony), což svědčí o různé povaze nositelů obou druhů náboje v atomu projevující se mj. relativně velkou pohyblivostí záporného náboje a malou pohyblivostí náboje kladného. S odkazem na toto experimentální zjištění lze uzavřít, že:

8. **ATOM OBSAHUJE NEVELKÝ POČET ELEKTRONŮ A „KLADNÉ ZÁVAŽÍ“** *přesně kompenzující náboj elektronů a rozhodujícím způsobem ovlivňující hmotnost atomu.* [P4]

Říci o vnitřním ustrojení atomu něco určitějšího však dosud uvedená fakta, odpovídající stavu fyzikálního poznání na sklonku devatenáctého století, neumožňují. O konkrétním rozložení hmoty a náboje v atomu se za této situace tedy lze pouze dohadovat. A v prvních letech dvacátého století se vskutku objevuje téměř současně několik spekulativních představ o stavbě atomu, které jsou dnes připomínány pod souhrnným označením *první modely atomu* [P5] už jen jako fyzikálně-historická zajímavost.

Obvyklé tvrzení o jádru a elektronovém obalu, shrnující současný názor na strukturu atomu, je teprve dalším krokem do mikrosvěta. Logicky sice bezprostředně následujícím, ale poměrně velkým a zdaleka ne samozřejmým. Jaderný model atomu formuloval až roku 1911 Ernest Rutherford na základě podrobného rozboru výsledků tzv. *rozptylových experimentů*, v nichž byl vyšetřován rozptyl svazků rychlých α -částic dopadajících kolmo na velmi tenké kovové fólie [P6]. K volbě této metodiky jej přivedlo přesvědčení, že: „*Poněvadž α -částice ... procházejí atomem, pečlivé studium odchylek „těchto střel“ od původního směru může poskytnout určitou představu o struktuře atomu, jež je za tyto odchylky zodpovědná. Rozptyl rychle letících nabitých částic atomy látky je jednou z nejslibnějších metod řešení problému stavby atomu.*“ Bezprostředním motivem tohoto experimentování pak byla snaha empiricky podložit a kvantitativně zpřesnit tehdy široce

přijímaný Thomsonův model atomu předpokládající spojité rozložení „kladného závaží“ v celém jeho objemu a stabilní rozmístění elektronů uvnitř něj [P5].

Vzhledem k celkové neutralitě atomu pocíťuje α -částice, která jej mívá, pouze velmi slabé pole elektrického multipólu, jež zřejmě nemůže nijak výrazně ovlivnit její pohyb. Podobně je tomu ovšem i tehdy, když α -částice takovým atomem prochází. 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 tedy relativně rychlá α -částice letí kolem jednotlivého thomsonovského atomu nebo jím proniká, měla by se při tom odchýlit od původního směru jen nepatrně.

Systematické experimentální studium rozptylu α -částic o kinetické energii $T = 7.7 \text{ MeV}$ (resp. rychlosti $v = 2 \cdot 10^7 \text{ ms}^{-1}$), jimiž byla ostřelována zlatá fólie tloušťky $d = 3 \cdot 10^{-7} \text{ m}$, však překvapivě ukázalo, 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 není ani 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.

Predběžný rozbor tohoto typu přivedl Ernesta Rutherforda k přesvědčení, že:

- velkoúhlový rozptyl α -částice je způsoben její interakcí s jediným terčovým atomem,
- thomsonovská představa o rozložení hmoty a náboje v atomu není správná.

A tyto závěry se staly východiskem jeho dalších úvah.

Poněvadž hmotnost α -částice m_α značně převyšuje hmotnost elektronů m_e ($m_\alpha/m_e \approx 7000$), je možné jejich vliv na její pohyb zanedbat, ať už jsou v atomu rozmístěny jakkoli [P7]. K velkoúhlovému rozptylu α -částice na atomu zlata tak může dojít jen v důsledku její interakce s jeho „kladným závažím“, bude-li ovšem silové působení mezi nimi dostatečně velké. V dalším se tedy stačí omezit jen na posouzení vzájemného působení těchto dvou objektů. Pro zjednodušení úvah se při tom na α -částici zpravidla pohlíží jako na bodový náboj (q_α) a „kladné závaží“ atomu zlata (q_{Au}) se považuje za rovnoměrně nabitou kouli o – zatím neznámém – poloměru R . Odpudivá síla, jíž působí podstatně hmotnější ($m_{\text{Au}}/m_\alpha \approx 50$) „kladné závaží“ atomu zlata (který je navíc vázán v krystalové mříži ostřelované fólie) na α -částici, má směr spojnice středů obou objektů. Její velikost narůstá – podle Coulombova zákona – s klesající vzdáleností mezi nimi, při čemž svého maxima dosahuje, octne-li se α -částice na povrchu „kladného závaží“ [P8].

Aby mohlo dojít k velmi vzácnému (avšak experimentálně prokázanému!) odrazu zpět, musí být zřejmě tato síla nesouhlasně rovnoběžná se směrem pohybu α -částice, tj. nalétávající α -částice musí směřovat přesně na střed „kladného závaží“. Jen v tomto případě je totiž přilétající α -částice působením odpudivé síly pouze bržděna a celá její trajektorie leží v přímce, jež prochází středem „kladného závaží“. (Není-li tato podmínka splněna, mění se nejen kinetická energie α -částice, ale i směr jejího pohybu – α -částice se postupně odklání od původního směru a její trajektorie je hyperbola.) Druhou nutnou podmínkou odrazu zpět je

obrácení směru pohybu takové α -částice, které ovšem předpokládá její úplné zabrzdění působením odpudivé síly. V bodě, v němž k němu dojde, je potenciální energie α -částice rovna její počáteční kinetické energii, tj.

$$V(R_o) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_\alpha q_{Au}}{R_o} = T .$$

Tato evidentní energiová bilance umožňuje jednoduše vyjádřit veličinu R_o mající význam vzdálenosti bodu obratu α -částice od středu „kladného závaží“. Jelikož je však tento bod místem nejtěsnějšího přiblížení α -částice k tomuto objektu, je R_o také horním odhadem poloměru R „kladného závaží“:

$$R \leq R_o = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_\alpha q_{Au}}{T} .$$

Po dosazení číselných hodnot $q_\alpha = 2e$, $q_{Au} = 79e$ (e je elementární náboj), $T = 7.7$ MeV se dostává

$$R \leq 2.9 \cdot 10^{-14} \text{ m} . \text{ [P9]}$$

„Kladné závaží“ atomu, tj. jeho část, která obsahuje všechny jeho kladný náboj a téměř veškerou hmotnost ($\approx 99.95\%$ hmotnosti atomu), má tedy poloměr přinejmenším o čtyři řády menší než sám atom [P10]. A poněvadž kromě „kladného závaží“, které – vzhledem k jeho nepatrné velikosti a poloze uvnitř atomu – Rutherford nazval *atomovým jádrem*, atom obsahuje už jen elektrony, lze konstatovat, že:

9. ATOM SESTÁVÁ Z MALÉHO TĚŽKÉHO Kladného JÁDRA A ROZLEHLÉHO LEHKÉHO ZÁporného (ELEKTRONOVÉHO) OBALU.

Na základě této představy o stavbě atomu Ernest Rutherford vypočítal, jaká část svazku α -částic dopadajícího na tenkou zlatou fólii by měla rozptýlena do libovolného úhlu θ (např. [4]):

$$\frac{N(\theta)}{N} = \frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2} \frac{n d q_\alpha^2 q_{Au}^2}{16 L^2 T^2} \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}} , \text{ [P11]}$$

kde N je počet α -částic dopadnuvších na fólii,

$N(\theta)$ je počet těchto částic zachycených jednotkovou plochou detektoru nacházejícího se ve směru θ a vzdálenosti L od místa dopadu svazku na fólii,

n je počet atomů zlata v objemové jednotce fólie.

Po všestranném experimentálním ověření tohoto vztahu jej bylo využito i v opačném směru: na základě známých, resp. naměřených hodnot veličin n , d , q_α , L , T , N , θ , $N(\theta)$ z něj bylo možné určit výpočtem zatím jen odhadovanou hodnotu (viz [P9]) náboje jádra q_{Au} . Příslušné experimenty [5] s fóliemi zhotovenými z různých kovů (Cu, Ag, Pt) provedl v roce 1920 Rutherfordův žák James Chadwick (1891–1974), při čemž potvrdil [P12], že:

10. NÁBOJ ATOMOVÉHO JÁDRA vyjádřený v násobcích elementárního náboje (= POČTU ELEKTRONŮ V ELEKTRONOVÉM OBALU) JE ROVEN POŘADOVÉMU ČÍSLU PRVKU V PERIODICKÉ TABULCE.

Zde svoji exkurzi do mikrosvětva ukončíme. Fyzikální argumentací rozdělenou do deseti kroků reprezentujících první podstatné dílčí pokroky v poznávání mikrosvětva jsme dospěli k základní představě o stavbě atomu, která se zpravidla označuje jako *jaderný*, resp. *Rutherfordův model atomu*. Poněvadž jde o **spolehlivě experimentálně podepřený závěr o velikosti a prostorovém rozložení hmoty a náboje v atomu**, další vývoj fyziky už na něm nic nezmění.

Je namístě ještě zdůraznit, že takto formulovaná představa není totožná s tzv. *planetárním modelem atomu*, jenž byl zvažován jako konkretizace jaderného modelu v souvislosti se snahou vysvětlit stabilitu atomu a popsat jej i z dynamického hlediska [P13]. Tím se však již otevírá jiný okruh problémů mikrosvětva, pro něž, jak se záhy ukázalo, není – na rozdíl od předchozí problematiky – fyzika začátku dvacátého století (= klasická fyzika) kompetentní. Studium těchto otázek postupně vedlo k poznání její omezené platnosti, vytyčení hranic její použitelnosti a položení základů fyziky kvantové.

Literatura:

- [1] Lacina A.: *Postrecenze učebnice „Fyzika pro gymnázia – Fyzika mikrosvětva“*. Školská fyzika VI, č.3 (2000) 72.
<http://www.physics.muni.cz/kof/recenze/post7.pdf>.
- [2] Lacina A.: *Nespojitá struktura látek – konstatovat nebo vysvětlit?*
<http://svp.muni.cz/ukazat.php?doc.Id=104>.
- [3] Štoll I.: *Fyzika pro gymnázia – Fyzika mikrosvětva*. Prométheus, Praha 2002.
- [4] Beiser A.: *Úvod do moderní fyziky*. Academia, Praha 1975.
- [5] Vanovič J.: *Atómová fyzika*. Alfa Bratislava, SNTL Praha 1980.
- [6] Zajac R., Pišút J., Šebesta J.: *Historické pramene súčasnej fyziky 2*.
Univerzita Komenského, Bratislava 1997.
- [7] Hajko V. a kol.: *Fyzika v experimentoch*. Veda, Bratislava 1988.
- [8] Jammer M.: *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*. McGraw-Hill, New York 1967. Ruský překlad: *Evoljucija ponjatij kvantovoj mechaniki*. Nauka, Moskva 1985.
- [9] Kudrjavcev P. S.: *Kurs istorii fiziki*. Prosvěščenije, Moskva 1974.
- [10] Thomson J. J.: *Cathode Rays*. Phil. Mag. **44** (1897) 293.
- [11] Geiger H., Marsden E.: Proc. Roy. Soc. **A82** (1909) 495.
- [12] Rutherford E.: *The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom*. Phil. Mag. **21** (1911) 669.
- [13] Geiger H., Marsden E.: Phil. Mag. **25** (1913) 604.

Poznámky:

- [P1] Emise elektromagnetického záření souborem navzájem neinteragujících částic (zředitelným plynem) se realizuje navzájem nesouvisejícími procesy emise záření jednotlivými členy tohoto souboru. Záření emitované plynovým tělesem je tedy prostou sumou příspěvků od těchto elementárních zdrojů. Jsou-li jimi částice (např. atomy) téhož druhu, jsou jejich příspěvky stejné. Záření emitované atomárním plynem má tudíž stejné jak spektrální složení, tak relativní intenzity jednotlivých vlnových délek jako záření emitované jednotlivým atomem a liší se od něj jen celkovou intenzitou, která je úměrná počtu atomů v zářícím plynu. (Zcela analogické úvahy lze formulovat i pro absorpci záření.) Na spektra atomárních plynů – jak emisní, tak absorpční – se pak běžně odkazuje jako na spektra atomová. Vlastnosti těchto spekter – zejména jejich čarový charakter, ale i intenzity spektrálních čar – byly známy již hluboko v devatenáctém století.
- [P2] Kolem poloviny devadesátých let devatenáctého století provedl Philipp Lenard řadu významných experimentů, jejichž motivem bylo prozkoumání vlastností katodového záření. Za nejdůležitější z nich je považován pokus, v němž skrze otvor ve stěně katodové trubice uzavřené tenkou kovovou fólií (tzv. *Lenardovo okénko*) vyvedl svazek katodových paprsků z vyčerpané trubice do vnějšího prostředí. Nečekaný byl už sám průchod katodového záření hustým materiálem fólie. Kromě toho však Lenard také detekoval jeho značný doběh v okolním vzduchu (více než 2 cm, zatímco svazek částic běžné – atomární – velikosti by měl mít, podle odhadů provedených na základě molekulárně-kinetické teorie plynů, doběh o několik řádů menší). Těmito překvapivými zjištěními Lenard nejprve mylně argumentoval proti možnosti částicového výkladu katodového záření. Po přijetí elektronové interpretace katodových paprsků (1897) se však tyto výsledky staly rozhodujícím argumentem ve prospěch nepatrné velikosti elektronu. Vysoká pronikavost elektronů látkou později Lenardovi také posloužila jako východisko při formulaci vlastní představy o stavbě atomu (*Lenardův model atomu* [P5]).
- [P3] Ke stručnému prohlubujícímu komentáři tohoto závěru by stačilo doplnění snad jedné či nanejvýš dvou výstižných vět. na tomto místě jsem se však rozhodl udělat výjimku a – čtenáři (i sobě) pro potěšení – ocituji příslušnou argumentaci v nezkráceném tvaru z Thomsonovy původní práce [10]:
„Proti názoru, že katodové paprsky jsou záporně nabitými částicemi, se obecně namítá, že až dosud nebylo pozorováno vychýlení těchto paprsků působením malé elektrostatické síly. ...Hertz nechal tyto paprsky procházet mezi dvěma rovnoběžnými kovovými deskami umístěnými ve výbojové trubici, zjistil však, že se po připojení těchto desek k pólům elektrické baterie neodchýlí [od původního směru]; při opakování tohoto experimentu jsem sám nejdříve dospěl k témuž výsledku, ale následující experimenty ukázaly, že absence výchylky je důsledkem vodivosti zbytkového plynu, která je způsobena průchodem katodových paprsků. Měřením této vodivosti bylo zjištěno, že velmi prudce klesá s rostoucím vyčerpáním trubice; zdálo se tedy, že při zopakování Hertzova experimentu při velmi vysokém [stupni] vyčerpání by mohlo být nadějně detekovat odchylku katodových paprsků způsobenou elektrostatickou silou. Když byly při vysokém vyčerpání dvě hliníkové desky připojeny k pólům malé baterie, paprsky se vychýlily: dolů, pokud byla horní deska připojena k zápornému a dolní deska ke kladnému pólu baterie, a nahoru, bylo-li zapojení opačné. Odchylka byla úměrná potenciálovému rozdílu mezi deskami, při čemž jeho hodnota nepřevýšila dva

volty.

K vychýlení tedy skutečně došlo, jen když vakuum bylo dobré. Nicméně, že absence výchylky je způsobena vodivostí prostředí, plyne až z toho, k čemu dochází, když vakuum dosahuje právě stupně, při němž se začíná objevovat výchylka. Při tomto stadiu [vyčerpání] se výchylka objeví v okamžiku připojení desek k pólům baterie, ale během dalšího trvání tohoto kontaktu se fluorescenční skvrna [= stopa paprsku na čelní stěně trubice] postupně přesouvá zpět do nevychýlené polohy. A právě tohle by se stalo, kdyby byl prostor mezi deskami vodivý, byť jen velmi špatně, neboť pak by kladné a záporné ionty mezi deskami pomalu difundovaly, dokud by se kladná deska nepokryla zápornými ionty a záporná kladnými; tak by došlo k vymizení elektrické intenzity mezi deskami a na katodové paprsky by žádná elektrostatická síla nepůsobila.

...

Nemohu se vyhnout závěru, že [katodové paprsky] jsou zápornými elektrickými náboji nesenými hmotnými částicemi.“

Tato citace, podle mého názoru, přesvědčivě ukazuje, jak lze vyučování – ovšemže jen v jednotlivých konkrétních případech – v nejlepším slova smyslu oživit. Původní fyzikální příběhy totiž až příliš často necitlivým převedením do učebnicového textu ztratily mnoho ze svého skutečného obsahu, určitosti, přesvědčivosti – i krásy.

- [P4] Úvahy o konkrétním počtu elektronů v atomech různých druhů měly dlouho víceméně jen spekulativní charakter. Tak v roce 1906 vyslovil J. J. Thomson domněnku podepřenou kvalitativně několika nezávislými teoretickými důvody, že se tento počet řádově shoduje s atomovou vahou (dnes bychom řekli hmotnostním číslem) prvku. Jeho žák Charles Glover Barkla (1877–1944) posléze tento odhad zpřesnil na přibližně polovinu atomové váhy. V roce 1912 Thomson vyšetřoval vlastnosti různých iontových svazků na primitivní embryonální verzi hmotnostního spektrometru. Při tom mj. zjistil, že „*všechny zkoumané prvky dávají násobně nabitě atomy [~ ionty], s výjimkou vodíku, u něž nebyl nikdy pozorován více než jeden [elementární] náboj*“. Na základě toho pak vyslovil – vzápětí všeobecně přijatý – názor, že nejlehčí atom vodíku obsahuje jediný elektron. Počet elektronů v těžších atomech byl přesně stanoven až později [P12].
- [P5] Na podzim roku 1903 předložil Philipp Lenard hypotézu, že se atomy různých druhů skládají z různého (nevelkého) počtu stejných komponent, jež nazval *dynamidami*. Tyto dynamidy, které si představoval jako těsné – elektricky neutrální – spojení elektronu s mnohem hmotnějším kladně nabitým objektem, 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 [P2] – Lenard konstatuje, že úhrnný objem dynamid je jen nepatrným zlomkem ($\approx 10^{-12}$) objemu celého atomu. Přestože se *Lenardův dynamidový model atomu* velmi liší od později zjištěné skutečné struktury atomu, byl Lenard prvním, kdo vyslovil správný názor, že **atomy nejsou neproniknutelné, ale skládají se z malých objektů, mezi nimiž je prázdný prostor**. Těsně před koncem téhož roku zveřejnil Hantaro Nagaoka (1865–1950) jinou představu o stavbě atomu inspirovanou podobou planety Saturn. Podle ní by měl být atom tvořen masivním kladným nábojem opásaným prstencem elektronů. I když Nagaoka tuto ideu podepřel obecnými komentáři její možné souvislosti s optickými spektry atomů a radioaktivními přeměnami, nestabilita takového rozložení hmoty a náboje jeho návrh diskvalifikovala. Historikové fyziky dnes přiznávají *Nagaokovu saturnskému modelu atomu* jistou inspirativní hodnotu: jím formulovaná **představa o centrálním kladném náboji obklopeném souborem elektronů** byla zřejmě určitým vodítkem Ernestu Rutherfordovi při vytvoření jeho jaderného modelu atomu [P7].

Ve své době nejpopulárnějším, nejpropracovanějším – a tudíž i později nejznámějším – z *prvních modelů atomu* byl *Thomsonův pudingový model*. Autorem prvotní ideje byl sice William Thomson (lord Kelvin, 1824–1907), do tvaru využitelného k dalším fyzikálním úvahám ji však rozvinul jeho jmenovec J. J. Thomson. Kladný náboj a hmota („kladné závaží“) jsou podle něj spojitě (a rovnoměrně) rozestřeny v celém objemu atomu. Elektrony jsou pak v tomto „kladném těstě“ rozptýleny jako rozinky v koláči/pudingu (odtud název). J. J. Thomson vystoupil s touto představou poprvé roku 1903. Po několik dalších let ji však postupně rozpracovával do značných detailů se záměrem vyložit pomocí ní jak chemické vlastnosti atomů, tak jejich optická spektra. (Podrobnější informace, mající však dnes už jen historický význam, lze nalézt např. v [6].)

- [P6] Tyto experimenty navržené Ernestem Rutherfordem byly – pod jeho vedením – systematicky prováděny od roku 1908. α -částice emitované přirozeně radioaktivním zdrojem byly zkoumány průchodem malými koncentrickými otvory v řadě olovených stínítek do úzkého svazku, jenž pak byl veden kolmo na kovovou fólii. Uvnitř fólie elektricky nabitě α -částice interagují s kladnými i zápornými náboji jejich atomů, v důsledku čehož dochází k odchýlení těchto střel od původního směru. Původně rovnoběžný dopadající svazek se tedy průchodem fólií rozptyluje. Kvantitativně se jeho rozšíření určuje měřením počtu α -částic odchýlených do různých směrů, které se vymezují jejich odklonem θ od směru původního. Odchýlené α -částice byly v základní verzi těchto experimentů registrovány detektorem sestávajícím ze stínítka (pokrytého tenkou vrstvou jemně polykrystalického sulfidu zinečnatého) a mikroskopu. Podstatou tohoto způsobu detekce je skutečnost, že krystalek ZnS zasazený α -částicí reaguje na její dopad malým světelným zábleskem. Na základě vizuální registrace těchto záblesků pak byla zkonstruována závislost počtu odchýlených částic $N(\theta)$ na úhlové poloze detektoru θ . Zdroji při tomto experimentování byly různé přirozeně radioaktivní zářiče emitující α -částice vždy s určitou kinetickou energií. Její typická hodnota se v těchto mnohokrát opakovaných experimentech pohybovala kolem 5 MeV. (Pro číselné odhady prováděné v základním textu je použita hodnota maximální $T = 7.7$ MeV, s níž emituje α -částice polonium.) Rovněž materiál ostřelovaných fólií byl v jednotlivých případech rozdílný. Základním kritériem jeho výběru pro rozhodující experimenty byl přirozený požadavek, co nejvíce omezit počet atomů, které by mohly ovlivnit pohyb α -částice. Z tohoto hlediska se ukázalo být nejvhodnějším materiálem zlato, z něhož se – díky jeho příznivým mechanickým vlastnostem – podařilo zhotovit nejtenčí fólie. (Jejich tloušťka činila řádově 10^{-7} m.) Část aparatury, jíž se pohybují α -částice, byla umístěna ve vakuované komůrce, aby jejich případnými nežádoucími interakcemi s molekulami atmosférických plynů nedošlo ke zkreslení experimentálních výsledků. V roce 1909 Rutherfordovi spolupracovníci Hans Geiger (1882–1945) a Ernest Marsden (1889–1970) experimentálně zjistili nečekanou existenci velkouhlového rozptylu α -částic [11]. V roce 1913 pak experimentálně verifikovali Rutherfordův vzorec pro rozptyl [13] a tím i jeho jaderný model atomu.

- [P7] Toto zdůvodnění, běžné v elementarizovaných výkladech, je podrobnějším rozvedením příoměru, který použil sám Rutherford v popularizační přednášce, v níž připodobnil pohyb α -částice mezi elektrony „*průletu dělové koule rojem komárů*“. Argumentace nesouměřitelnými hmotnostmi ovšem implicitně předpokládá, že oba interagující

objekty – tedy nejen nalétávající α -částice, ale i elektron – jsou volné. (Detailní výpočet, který lze pro tento případ nalézt na mnoha místech v učebnicové literatuře /např. [4], str. 118 /, vede k úhlu rozptylu menšímu než 0.02° .) Ve své slavné práci *Rozptyl částic α a β v látce a struktura atomu* [12] Rutherford rozebírá tento problém korektněji: Zkusmo předpokládá, že elektrony vázané v atomu jsou rozmístěny rovnoměrně kolem jeho „kladného závaží“, takže α -částice, která k němu směřuje, prochází sféricky symetrickým oblakem záporného náboje. Podrobným výpočtem pak ukazuje, že silové působení takového elektronového obalu na α -částici velmi rychle klesá s hloubkou jejího proniknutí do něj – tedy s jejím přiblížením ke „kladnému závaží“. (V domácí literatuře je tento postup stručně reprodukován např. v [7], str. 121.) K témuž závěru lze ovšem dospět i jednoduchou kvalitativní úvahou opírající se o závěr známý z elektrostatiky, že elektrické pole buzené nabitou kulovou slupkou je kdekoli uvnitř ní nulové.

[P8] Pronikne-li α -částice dovnitř „kladného závaží“ bude odpuzována od jeho středu silou,

jejíž velikost se zmenšuje od své maximální hodnoty $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_\alpha q_{Au}}{R^2}$, které nabývá

na povrchu „kladného závaží“, k nule v jeho středu. Tento pokles je důsledkem vzájemné kompenzace silového působení částí „kladného závaží“ rozložených symetricky kolem α -částice. Detailní kvantitativní rozbor opírající se o Gaussovu větu elektrostatiky, příp. o poznatek, že elektrické pole buzené nabitou kulovou slupkou

je uvnitř ní nulové, vede k závislosti $F(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_\alpha q_{Au}}{R^3} r$, kde $r \leq R$ je vzdálenost

α -částice od centra „kladného závaží“.

Z těchto jednoduchých úvah přímo plyne, že maximální síla, kterou může α -částice pocítit při svém průletu fólií – a tedy i její maximální možná odchylka od původního směru – souvisí s poloměrem R „kladného závaží“. Experimentálně zjištěná existence velkoúhlových odchylek α -částic tak svědčí o relativně malé hodnotě R , tj. o vysoké koncentraci kladného náboje v atomu.

[P9] Sám Rutherford dospěl k hodnotě poněkud vyšší ($R \leq 3.7 \cdot 10^{-14}$ m), neboť položil $q_{Au} = 100e$. V době, kdy dělal svůj rozbor výsledků rozptylových experimentů, totiž nebyla velikost náboje „kladného závaží“ atomů přesně známa. Za rozumný odhad

tehdy byla považována hodnota $q \cong \frac{A}{2} e$ (A je atomová váha – dnes bychom řekli

hmotnostní číslo) [P4], jenž – jak se ukázalo později – dává v případě lehkých prvků správné výsledky, zatímco u prvků těžších vede k nadhodnocení q .

[P10] Elementarizovaný odhad rozměrů atomu ($R_{at} \approx 10^{-10}$ m) uvádí třeba [3]; jeho zařazení do hlubších fyzikálně-historických souvislostí pak lze najít např. v [2].

[P11] Experimentální potvrzení *Rutherfordova rozptylového vzorce* v celém rozsahu úhlů $\theta \in \langle 0^\circ, 180^\circ \rangle$, bylo současně i potvrzením správnosti představ použitých při jeho odvození. Z nich za zvláštní zdůraznění stojí předpoklad kulombičnosti interakce α -částice a jádra, jenž je ekvivalentní předpokladu, že α -částice (o energii 7.7 MeV) při svém rozptylu na jádru atomu zlata do něj nevniká, tj. že hodnota R získaná pomocí jednoduché energetické úvahy má skutečně význam horního odhadu poloměru jádra.

- [P12] Názor, že náboj atomového jádra se v řadě uspořádané podle rostoucí atomové váhy (~ Mendělejevově periodické tabulce) zvyšuje od prvku k prvku o jedničku spekulativně vyslovil jako první roku 1913 Antonius Van den Broek (1870–1926). Jeho hypotézu podpořil a o rok později dokázal svou prací o rentgenových spektrech atomů Rutherfordův žák Henry Moseley (1887–1915).
- [P13] Je zajímavé, že idea atomu jako miniaturního planetárního systému nevznikla až v souvislosti s objevem atomového jádra, ale byla jednou z prvních představ o struktuře atomu, které byly formulovány po objevu elektronu (1897). Již roku 1901 o ní spekuloval Jean Perrin (1870–1942) [8], zmiňoval se o ní i Henri Poincaré (1854–1912) a s její kritikou vystoupil v roce 1905 na sjezdu německých přírodovědců a lékařů v Mnichově Wilhelm Wien (1864–1926). Ve své přednášce, v níž zejména poukázal na problémy s objasněním čarových atomových spekter z hlediska této představy, mj. řekl: „*Nejjednodušší by bylo chápat každý atom jako planetární systém sestávající z kladně nabitého centra, kolem něž obíhají elektrony jako planety. Taková soustava však nemůže být stabilní v důsledku toho, že [obíhající] elektrony vyzařují energii. Proto musíme uvažovat o systému, jehož elektrony jsou v relativním klidu nebo mají nepatrné rychlosti, i když i taková představa je značně pochybná.*“ [9]. Konkrétními dobovými realizacemi byly statické koncepce komentované v [P5]. Rutherfordův objev atomového jádra však tyto modely diskvalifikoval a znovu obrátil pozornost k planetární představě.