

ximálně využito ICT a moderních výukových prostředků. Moduly zahrnují v maximální míře interaktivní výuku s podporou ICT. Přidanou hodnotou projektu je kvalitnější počáteční vzdělání učitelů fyziky, vytvoření nových podpůrných materiálů pro studenty a možnost otevření kombinované formy studia učitelství fyziky. Vytvářené odborné a odborně didaktické kompetence usnadní využitelnost absolventa na trhu práce. Za přídavnou hodnotu lze také považovat snížení počtu neúspěšných studentů učitelství fyziky a zvýšení zájmu o toto studium. Blíže informace o projektu lze nalézt na webových stránkách projektu: <http://www.mofy.upol.cz>.

Tento článek byl zpracován s podporou projektu Evropského sociálního fondu a Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České republiky Modularizace a modernizace studijního programu počáteční přípravy učitele fyziky. Registrační číslo: CZ. 1.07/2.2.00/18.0018.

Danuše Nezvalová
PřF UP Olomouc

Z HISTORIE

Sto let Bohrova modelu atomu

Roku 1897 oznámil *J. J. Thomson* na zasedání londýnské *Royal Society* objev pranepatrné částice – elektronu – a následujícího roku přišel s představou atomu jako homogenní koule kladně nabitě látky, v níž jsou rovnoměrně rozloženy elektrony. *Ernest Rutherford* roku 1911 ovšem na základě pokusů prokázal, že atom obsahuje téměř všechnu hmotu soustředěnou v jádře, kolem něhož se pohybují elektrony. Podle klasické mechaniky se tu nabízela

k dalším úvahám jakási paralela mezi sluneční soustavou a jejím miniaturním modelem – atomem. Rozdíl obou soustav je nejen kvantitativní, nýbrž i kvalitativní. Zatímco u planet jde výhradně o silové působení gravitační, u atomu s nabitými částicemi přistupuje ještě síla coulombovská.

Planetární model atomu ale přinášel své problémy. Podle klasické elektrodynamiky náboj, který se pohybuje se zrychlením, emituje záření. Takovým nábojem je elektron pohybující se s dostředivým zrychlením, a přesto nezáří. Alespoň ne pořád. Kdyby naopak záření z tohoto důvodu emitoval, bylo by jeho spektrum spojité, a elektron by v důsledku úbytku své energie spirálovitě klesal, až by dopadl na jádro. Atom je však stabilní, sice jako planetární soustava, ale z jiného důvodu.

Balmerovo matematické řešení poloh čar ve spektru

Záření vodíkových atomů ve slunečním světle si poprvé povšiml *Hagenbach* a *Ångström* kolem roku 1853. Ve spektru shledli několik čar, jejichž vlnové délky Ångström změřil: 656,30 nm, 486,16 nm, 434,07 nm 410,12 nm. *Hagenbach* byl přesvědčen, že v těchto číslech skrytá nějaká vzájemná souvislost, nemohl na ni ale přijít, a proto svěřil problém *J. Balmerovi*, tehdy působícímu na střední škole v Basileji. Ten zjistil, že čísla v sobě obsahují jakousi pevnou část 364,56 nm a dále jsou velmi přibližně „odvoditelná“ podle následujících vztahů:

$$656,30 = 364,56 \cdot \frac{9}{5} = 364,56 \left(\frac{3^2}{3^2 - 2^2} \right),$$

$$486,16 = 364,56 \cdot \frac{16}{12} = 364,56 \left(\frac{4^2}{4^2 - 2^2} \right),$$

$$434,07 = 364,56 \cdot \frac{25}{21} = 364,56 \left(\frac{5^2}{5^2 - 2^2} \right),$$

$$410,12 = 364,56 \cdot \frac{36}{32} = 364,56 \left(\frac{6^2}{6^2 - 2^2} \right),$$

Obecný vzorec pro vlnovou délku čáry byl podle Balmera

$$\lambda = 364,56 \cdot \left(\frac{m^2}{m^2 - 2^2} \right),$$

kde $m = 3, 4, 5, 6$. Někajých 30 let zůstala tato matematická zajímavost nepovšimnuta.

Bohrovo fyzikální řešení poloh čar ve spektru

Na cestě k hledání stavby atomu možná Bohrovi pomohla náhoda. Od roku 1911 byl na jakési stáži u J. J. Thomsona v Cambridge s cílem dokončit u něho disertaci. Thomson se Bohrovi nijak nevěnoval, což ho mrzelo, a proto odešel z Cambridge k E. Rutherfordovi do Manchesteru. Tam stanul tváří v tvář autorovi tehdy nového modelu atomu. Rutherford sám v tuto dobu považoval svůj planetární model atomu za hypotézu, jež je sice podpořena rozptylovým pokusem, avšak neumožňuje vysvětlit problémy stability atomu, což je zásadní věc. Z pohledu klasické mechaniky to nedokázal ani Bohr, ale přišel na to, že touto cestou to opravdu nepůjde. To znamenalo významně změnit pohled na věc. Inspirace přišla odjinud.

Od roku 1900 do roku 1905 se kupředu posunula teorie záření absolutně černého tělesa. 14. prosince 1900 pronesl *Max Planck* přednášku *O teorii hustoty energie v normálním spektru* (tiskem [1]). V ní zavádí do vztahu pro rozdělovací funkci záření konstantu h po něm později pojmenovanou. Datum přednášky označujeme jako počátek formulování začátků kvantové mechaniky. Druhým faktem, který v tu dobu byl k dispozici, bylo vysvětlení fotoelektrického jevu *A. Einsteinem* v roce 1905. I zde již je součástí matematického popisu jevu Planckova konstanta.

Bohrovi se Planckovy a Einsteinovy výsledky hodily. Intuitivně vycítil, že čárové spektrum může být důsledkem skokového vyzařování energie. Na samém začátku své práce o chování elektronů v atomovém obalu [2] píše: „*Ať už nakonec*

změna pohybových zákonů elektronu dopadne jakkoli, zdá se být nevyhnutelným závěstem do těchto zákonů veličinu, která je cizí klasické elektrodynamice, totiž Planckovu konstantu.“ Jinak řečeno: Má-li být vyzařování ve spektru skokové, musí být skokový i přechod mezi trajektoriami elektronu, a to ne libovolnými, nýbrž nějak pevně určenými. Při přechodu elektronu z dráhy vzdálenější na dráhu bližší jádru se emituje balíček (kvantum) energie v násobcích $h\nu$, pro přechod elektronu ve směru opačném je potřeba toto kvantum energie dodat. „*Zavedením Planckovy konstanty se problém stability elektronového obalu podstatně mění, neboť tato konstanta má takový rozměr a velikost, že spolu s hmotností a nábojem částic může vést k délce požadovaného řádu velikosti [atomu – 10^{-10} m].*“ Kupodivu hodila se i balmerovská matematická formule. „*V okamžiku, kdy jsem viděl Balmerův vztah, bylo mi vše jasné*“, píše Bohr.

Výsledky Bohrovy práce vstoupily do fyziky v té nejstručnější podobě jako tři postuláty:

I. V atomu existují jen určité stacionární orbity elektronů, na nichž elektron neemituje záření. Tyto dráhy jsou charakterizovány hlavním kvantovým číslem n .

II. Poloměry drah (orbitů) jsou násobkem $h/2\pi$.

III. K emisi záření dochází pouze při přechodu ze stabilní dráhy s vyšší energií na stabilní dráhu s nižší energií.

Pro vlnočty ($1/\lambda$) Balmerovy série našel vztah

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

kde R je Rydbergova konstanta a $n = 3, 4, 5, \dots$. A co víc, zobecnění vztahu na tvar

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

z něhož pro $m = 1, 3, 4$ a 5 plynou vlnočty pro další série spektrálních čar (Lymanovu – objevena 1914), Paschenovu (1908), Brackettovu (1922) a Pfundovu

(1924)), ležící v infra-, resp. ultrafialové části vodíkového spektra. Série Brackettova a Pfundova byly skutečně později objeveny a dobře zapadaly do Bohrova schématu. Právě uvedený vztah umožňoval také výpočet Rydbergovy konstanty ze změřených vlnových délek. Toto udělalo na Einsteina velký dojem, neboť až se s Bohrovou teorií nemohl ztotožnit, výpočet přesné hodnoty konstanty nemohla být náhoda.

Problémy nekončí

Bohrem postulované diskrétní stavy elektronů v obalu byla v souladu s experimentálními zjištěními (atom byl stabilní, vyzářoval jen za určitých podmínek, jeho spektrum bylo čárové). Přesto z jeho konstrukce chování elektronu ve vodíkovém atomu číselná směs klasické mechaniky (určení charakteristik oběžných drah) a kvant (jen určitá frekvence záření a jen určité dráhy). Na to E. Rutherford hned Bohra upozornil v dopise z 20. března 1913: „... směs Planckových idejí a staré mechaniky velmi komplikuje pochopení toho, co je vlastně skutečným základem tohoto pojetí.“ Dále namítal zhruba toto: Jak může elektron vědět, jakou frekvenci má kmitat a kde se má při sestupu zastavit?

Vážným nedostatkem Bohrovy teorie bylo také to, že nebyla úspěšná při popisu atomů s více elektrony, počínaje heliem¹.

Bohr kritiku vnímal jako oprávněnou. Nedokázal sice jít dále, ale tušil, že cesta je správná. „Začínám věřit, že v tomto problému stojíme před mimořádně velkými obtížemi, které můžeme zvládnout jen tak, že ustoupíme od našich běžných představ ještě dále, než jsme to museli učinit doposud...“ V tomto duchu Bohrov model inspiroval. Především vedl k pozdějšímu nezbytnému chápání elektronu jak částice i jako vlny. *De Broglie* našel jeho vlnovou délku na orbitě, *J. Franck* a *G. Hertz* zná-

mým pokusem z roku 1914 dokázali energetické skoky elektronu mezi určitými hladinami.

Co na to Einstein a jiní

Niels Bohr tvrdě zasáhl zákony klasické fyziky, avšak nijak je nenahradil zákony novými, obecnějšími, nýbrž postuloval. To samozřejmě A. Einstein cítil: „*jakoby nám zmizela půda pod nohama a nikde nebylo vidět pevnou půdu, na níž by bylo možné stavět. Vždy se mi zdálo zázrakem, že tento rozhoupavý a rozporuplný základ postačil k tomu, aby dovolil Bohrovi, člověku s geniální intuicí a přesným citem, najít hlavní zákony spektrálních čar a elektronových slupek atomů.*“ Z osobního setkání s Einsteinem v roce 1920 v Berlíně Bohr nabyl dojmu, že Einstein stav nových fyzikálních pohledů chápal jako nedefinitivní a předvídal, že sporné otázky budou předmětem možná dlouhodobého fyzikálního výzkumu.

Bohr nebyl žádný dogmatik. „*Myslenky, které vyslovuji, nesmějí být chápány jako tvrzení, nýbrž jako otázky*“, reagoval.

Ještě v roce 1913 Bohrovi blahopřál *A. Sommerfeld*. Odhadoval, že Bohrova práce časem dozraje a stane se velkým mezníkem v teoretické fyzice. Byl to on, kdo na Bohra bezprostředně navazoval.

Do skupiny tvrdých odpůrců patřili především *M. von Laue*, *lord Rayleigh*, *W. H. Bragg*, zpočátku také *J. J. Thomson* a *M. Born*. *Otto Stern* dokonce vyhržoval, že zanechá fyziky, je-li na Bohrově teorii něco pravdivého.

Literatura

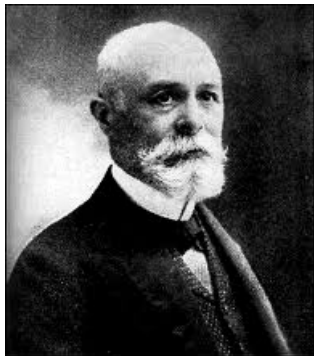
- [1] *Planck, M.*: HÜber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum. *Ann. Physik* 4(1901), 553.

¹Tento problém částečně odstranil později *A. Sommerfeld* zavedením množiny eliptických drah a dalšího kvantového čísla.

- [2] *Bohr, N.*: On the Constitution of Atoms and Molecules I–III. *Philosophical Magazine* 26(1913), 1–25, 476–502, 857–875.
- [3] *Beiser, A.*: Úvod do moderní fyziky. Praha, Academia 1978.
- [4] *Lacina, A.*: Bohrov model atomu. *Pokroky MFA* 53(2008), 125–151.
- [5] *Kuzněcov, B. G.*: Einstein – život, smrt, nesmrtnost. Praha, SPN 1984.
- [6] *Bronowski, J.*: Vzestup člověka. Praha, Odeon 1985.
- [7] *Westaway, F. V.*: Objevy bez konce, I. díl. Praha, F. Borový 1937.

František Jáchim

Eugen Goldstein – objevitel kanálových paprsků



Eugen Goldstein (1850–1930)

V dějinách fyziky se stává, že intenzivní snaha objasnit nějakou zdánlivě nepatrnou nesrovnalost ve stavu poznání nebo výsledcích naměřených údajů může přispět k zásadně novému či hlubšímu pohledu na přírodní jevy. K takové situaci došlo ke konci devatenáctého století,

kdy příroda vyslala hned několik signálů z nitra hmoty v podobě tajuplných paprsků. S jejich objevem a studiem vlastností je spjata také jméno pozapomenutého německého experimentálního fyzika židovského původu *Eugena Goldsteina*.

Vše začalo objevem tzv. katodových paprsků, což je termín, se kterým se dnes již téměř nesetkáváme. Tyto paprsky se objevují v silně vyčerpaných skleněných trubcích se zředěným plynem, do nichž jsou zataveny dvě elektrody pod vysokým napětím. Paprsky vycházejí z katody a projevují se mihotavým světélkováním plynu. Dnes se uplatňují v nejrůznějších výbojkách, rentgenových lampách i televizních obrazovkách. Za jejich objevitele v letech 1858/1859 je považován německý matematik a fyzik *Julius Plücker*, působící na univerzitě v Bonnu. Ten zároveň zjistil, že tyto „světelné sloupce“ lze vychylovat magnetem. Po něm celá řada badatelů méně či více známých jmen (*J. W. Hittorf, G. H. Wiedemann, W. Crookes, J. H. Geissler, C. F. Varley, H. Hertz, P. Lenard, W. C. Röntgen*) s katodovými paprsky experimentovala a postupně odhalovala jejich další a další vlastnosti.

Do této řady patří také protagonista našeho vyprávění Eugen Goldstein. Narodil se 5. září 1850 v hornoslezském Gleiwitzu (dnes Gliwice, Polsko) v nezámožné židovské rodině. Přesto krátce studoval na univerzitě ve Wroslavi a pak v Berlíně u jednoho z nejvýznamnějších světových fyziků a mezinárodně proslulého koryfeje německé vědy *Hermannu von Helmholtze* (mezi jeho studijní kolegy patřili mj. *M. Planck, W. Wien* či *M. I. Pupin*). V roce 1881 zde obhájil doktorskou práci a od roku 1888 po celý život působil jako asistent a později (1927) vedoucí sekce astrofyziky na berlínské a postupně observatoři. Při studiu vedení elektrického proudu v plynech a fluorescence látek využíval od roku 1898 svoji soukromou laboratoř, což byla tehdy rarita.