

## 1.1 VZNIK A VÝVOJ ATOMOVÉ TEORIE

V této kapitole se dozvíte:

- které experimentální skutečnosti si vynutily vznik atomové teorie;
- o historii vývoje modelů atomů.

Budete schopni:

- vysvětlit podstatu atomové teorie a uvést její základní východiska.

Klíčová slova této kapitoly:

*atom, atomové jádro, elektron, čárové spektrum*



Čas potřebný k prostudování učiva kapitoly:

4 + 2 hodiny (teorie + řešení úloh)

První atomovou teorii, která vychází z experimentálních poznatků (zejména ze základních chemických zákonů) podal Dalton. *Daltonova atomová teorie* představovala revoluční změnu zejména v pohledu na chemické procesy.

Později se především fyzikové snažili na základě experimentálních faktů vytvořit modely atomů. První modely, *puďinkový model* a *planetární model*, vycházely při popisu atomu z teoretického popisu na základě klasické fyziky. Protože však tyto modely nedokázaly objasnit nové experimentální skutečnosti, vytvořil Niels Bohr model atomu (*Bohrův model atomu*), ve kterém významnou roli hraje tzv. *kvantovací podmínka*, kterou není možno získat ze zákonů klasické fyziky. Tento postup byl později zobecněn v *Sommerfeldově kvantové teorii*, postavené na známých metodách klasické teoretické fyziky a na aplikaci Wilsonových-Sommerfeldových kvantovacích podmínek. Tato teorie byla použita ke zpřesnění popisu spektra atomu vodíku v tzv. *Sommerfeldově modelu atomu*. Zejména *Bohrův model atomu* představuje jedno z východisek *kvantové teorie*.

Dnes se řešení fyzikálních problémů v atomové fyzice bez kvantové teorie neobejde. Nejčastěji se vychází ze *Schrödingerovy rovnice* (SR), resp. *Pauliho rovnice*, ve které je zahrnut dodatečně vliv spinu elektronu. Přesné řešení SR v tzv. elektrostatickém přiblížení je možné získat pro *atom vodíku*. Pro *víceelektronové atomy* je nutno použít při řešení přibližných metod. Pro zpřesnění popisu spekter je sice v principu možné přejít k obecnějším teoriím (*Diracova teorie, kvantová teorie pole*), ale v praxi je většinou nezbytné nebo alespoň jednodušší započít nejdůležitější vlivy nezahrnuté v elektrostatickém přiblížení formou tzv. korekcí v rámci *poruchové teorie*.

### 1.1.1 ZÁKLADNÍ CHEMICKÉ ZÁKONY

Formulování základních chemických zákonů vytvořilo základní předpoklady pro zrod atomové teorie. Mezi tyto zákony patří:

- *zákon zachování hmotnosti;*
- *zákon zachování energie;*
- *zákon stálých poměrů slučovacích;*
- *zákon násobných poměrů slučovacích;*
- *zákon stálých poměrů objemových;*
- *zákon Avogadrův.*



#### Zákon zachování hmotnosti

Hmotnost všech látek do reakce vstupujících (reaktanty) je rovna hmotnosti všech reakčních produktů.

Poprvé tento zákon formuloval Lomonosov (1748) a později nezávisle na něm Lavoisier (1774).



#### Zákon zachování energie

Energii nelze vytvořit ani zničit.

Zákon opět poprvé formuloval Lomonosov (1748), ale ve známost vstoupil až v novější nezávislé formulaci Mayerově (1842).

Dnes víme, že vzhledem k platnosti *Einsteinova vztahu ekvivalence* mezi hmotnostmi a energií  $E = mc^2$ , představují oba zákony zákon jediný.

Celková hmotnost a energie izolované soustavy se nemění.

Změny hmotnosti  $\Delta m$ , které odpovídají měřitelným změnám energie  $\Delta E$  při chemických reakcích, jsou tak malé, že jsou prakticky neměřitelné. To vyplývá právě z Einsteinova vztahu.

Pokud celková energie a hmotnost systému před reakcí jsou  $m_1$  a  $E_1$  a po reakci pak  $m_2$  a  $E_2$ , dostaneme dosazením do Einsteinova vztahu dvě rovnice, jejichž odečtením máme  $\Delta m = \Delta E / c^2$ , kde  $\Delta m = m_2 - m_1$  a  $\Delta E = E_2 - E_1$ .



Sloučením 1 g vodíku s přibližně 8 g kyslíku na vodu se uvolní energie  $1,4 \cdot 10^5$  J, což odpovídá snížení hmotnosti o  $1,6 \cdot 10^{-12}$  kg.

#### Poznámky k Einsteinově vztahu:

- V teorii relativity není hmotnost konstantou jako v klasické (zde myšleno nerelativistické) fyzice, ale závisí na rychlosti pohybu částice  $v$  podle vztahu  $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ , kde  $c$  je rychlost světla ve vakuu. Význam konstanty

$m_0$  je zřejmý, pokud položíme  $v = 0$ ,  $m = m_0$ . Jedná se o hmotnost částice v klidu, neboli tzv. **klidovou hmotnost**.

- Nerelativistické vztahy používané v klasické mechanice představují aproximativní vztahy, které platí s dostatečnou přesností pouze při nízkých rychlostech. Relativistické vztahy jsou platné pro celý obor rychlostí od nuly až po rychlost světla.
- Dosazením vztahu závislosti hmotnosti částice na její rychlosti do výše uvedeného Einsteinova vztahu dostáváme **závislost celkové energie pro volnou částici na její rychlosti**.

### Úkol k textu

Napište závislost kinetické energie volné relativistické částice na její rychlosti. Srovnajte tento vztah s klasickým vztahem, který znáte z mechaniky.



### Úkol k zamyšlení.

Relativistické vztahy platí i pro nízké rychlosti, proč je tedy většinou nepoužíváme pro řešení nerelativistických úloh?



### Zákon stálých poměrů slučovacích

Hmotnostní poměr prvků či součástí dané sloučeniny je vždy stejný a nezávislý na způsobu přípravy sloučeniny.



Zákon byl formulován nezávisle Proustem a Daltonem (1799).

Ve vodě je poměr hmotností kyslíku a vodíku přibližně 8.



### Zákon násobných poměrů slučovacích

Tvoří-li dva prvky více podvojných sloučenin, pak hmotnosti jednoho prvku slučujícího se vždy se stejným množstvím prvku druhého jsou pro tyto sloučeniny v poměrech, které lze vyjádřit malými celými čísly.



Zákon byl formulován nezávisle Richterem (1791) a Daltonem (1802).

Kyslík, který se sloučí beze zbytku s 1 g vodíku na vodu, má hmotnost asi 8 g. Kyslík, který se sloučí beze zbytku s 1 g vodíku na peroxid vodíku, má hmotnost 16 g. Poměr hmotností kyslíku je 1:2.





### Zákon stálých poměrů objemových

Při stálém tlaku a teplotě jsou objemy plynů vstupujících spolu do reakce, popřípadě též objemy plynných produktů reakce, vždy ve stejném poměru, který je možno vyjádřit malými celými čísly.

Zákon formuloval Gay-Lussac (1805).



Kyslík s objemem  $1 \text{ m}^3$  se bezezbytku sloučí s vodíkem o objemu  $2 \text{ m}^3$  na vodu ve formě páry o objemu  $2 \text{ m}^3$ .



### Zákon Avogadrův

Ve stejných objemech plynů či par je za stejného tlaku a teploty stejný počet molekul.

Tento zákon formuloval Avogadro spolu se zavedením pojmu *molekula*.

**Molekula** představuje nejmenší částici látky, která má ještě její chemické vlastnosti, skládá se z více atomů různých prvků (**heteronukleární molekula**), z více atomů stejného prvku (**homonukleární molekula**) nebo z jednoho atomu (jednoatomová molekula).



Z platnosti Avogadrova zákona a z předchozího příkladu známých objemových poměrů vyplývá, že vodík a kyslík mají dvouatomové molekuly.

Zavedení pojmu molekula si vyžádala i *kinetická teorie*, jejíž vztahy dávají v případě řady *chemických prvků* správné výsledky pouze pokud základními částicemi plynů jsou víceatomové (nejčastěji dvouatomové) molekuly.



### Faradayův zákon elektrolýzy

Hmotnost látky  $m$  přeměněné při elektrolýze na elektrodě je úměrná prošlému náboji  $Q$ :  $m = AQ$ , kde  $A$  je elektrochemický ekvivalent (pro danou látku konstanta).

Nejmenší náboj přenesený při elektrolýze je roven elementárnímu elektrickému náboji  $e$  (celkový přenesený náboj je tedy pouze celým násobkem  $e$ ), což je důkazem kvantování elektrického náboje.

Dnes můžeme na základě atomistických představ psát  $A = \frac{M_r u}{Z e}$ , kde  $M_r$  je relativní atomová hmotnost atomu,  $Z$  je stupeň ionizace atomu (iontu) v elektrolytu (oxidační stupeň, též mocnoství),  $u$  je atomová hmotnostní konstanta a  $e$  elementární elektrický náboj. Platí totiž  $A = \frac{m}{Q} = \frac{NM_r u}{NZe}$ , kde  $N$  je počet

prošlých iontů (kationtů či aniontů), a tedy i atomů vyloučených na příslušné elektrodě (katodě či anodě). Nositeli elektrického náboje v elektrolytu jsou ionty s nábojem  $Ze$ , které na elektrodě zachytí či odevzdají elektrony a vylučují se jako atomy s hmotností  $M_r u$ .

## 1.1.2 DALTONOVA ATOMOVÁ HYPOTÉZA

Na základě rozboru *základních chemických zákonů* vyslovil Dalton domněnku, že látky se skládají ze základních stavebních částic – **atomů** (jejich existenci předpokládali již řečtí filozofové Leukippos a Demokritos). Zároveň postuloval základní vlastnosti atomů, čímž položil základy atomové teorie. Daltonovy představy o atomární struktuře látky umožnily objasnit pozorované chemické zákony a staly se východiskem pro objasnění dalších experimentálních skutečností zejména z oblasti chemie a fyziky.

### Základní postuláty Daltonovy atomové teorie:

- prvky se skládají z velmi malých dále nedělitelných částic – atomů,
- atomy téhož prvku jsou stejné, atomy různých prvků se liší hmotností, velikostí a dalšími vlastnostmi,
- v průběhu chemických dějů se atomy spojují, oddělují nebo přeskupují, přičemž ale nemohou vznikat nebo zanikat,
- slučováním dvou či více prvků vznikají chemické sloučeniny, které vznikají spojením celistvých počtů atomů.



Tyto představy později doplnil Avogadro o pojem *molekuly*. Dle současných poznatků je nutno představy původní Daltonovy teorie poněkud korigovat a doplnit. *Nedělitelnost atomu* je nutno omezit pouze na chemické děje, přičemž neměnné zůstává pouze *jádro atomu*, které identifikuje atom (viz *protonové číslo*). Hmotnost atomů daného prvku může být různá (viz *izotopy*).

### Úkol k textu

Zopakujte si skutečnosti, které vedly Daltona k formulování atomové hypotézy.



### Úkol k zamyšlení

Dvousložkový kapalný roztok obsahuje rozpouštědlo a rozpuštěnou látku. Koncentrace roztoku je určena podílem množství rozpuštěné látky a rozpouštědla. Můžeme snížením množství rozpouštěné látky v pevně daném množství rozpouštědla vytvořit roztok o libovolně nízké koncentraci? Odpověď zdůvodněte na základě poznatků atomové teorie.



### Průvodce studiem.

*Tak už víte, jak pana Daltona napadlo, že látky se skládají z atomů. Musel se opřít o tehdejší poznatky z chemie. Žádná teorie nevzniká jen tak, ale musí správně vysvětlit to, co lze skutečně pozorovat a ověřit. Pokud nejste unaveni, pokračujte studiem další části textu, ve které se dozvíte o tom, jak se vyvíjely představy o stavbě a dynamice atomu.*



### 1.1.3 THOMSONŮV MODEL ATOMU

Důležitým momentem ve vývoji představ o atomu byl *objev elektronu*.

#### Objev elektronu

V polovině 19. století pozoroval Geissler a další fyzikové tzv. katodové paprsky. Při experimentu byla používána tzv. katodová trubice, což je skleněná trubice, popř. baňka s elektrodami. Pokud byl vzduch, případně i jiný plyn, uvnitř trubice zředěn (asi na tisícinu atmosférického tlaku) a na elektrody bylo připojeno vysoké napětí (vyšší než asi 1000 V), začal plyn v trubici zářit. W. Crookes kolem roku 1870 zjistil, že při dalším snížení tlaku, začíná kromě plynu uvnitř svítět i skleněná stěna baňky v místech, která leží naproti záporné elektrodě (katodě). Předpokládal tedy, že katoda emituje záření, *katodové záření*, resp. katodové paprsky. Prováděl další experimenty, z kterých vyplynulo, že záření přenáší energii (roztáčení lopatek miniaturního „mlýnku“) a elektrický náboj (zakřivování dráhy magnetickým polem).

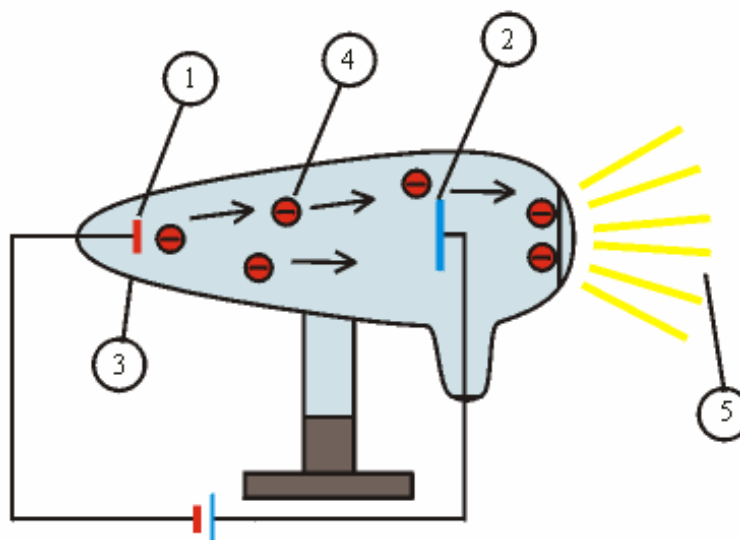


Schéma katodové trubice:

- 1 katoda,
- 2 anoda,
- 3 skleněná trubice s plynem o nízkém tlaku,
- 4 elektrony emitované katodou,
- 5 viditelné záření ("světélkování", fluorescence) emitované po dopadu elektronů na stěnu trubice.

Podstatu katodového záření odhalil v roce 1897 J. J. Thomson, který na základě výše uvedených experimentů předpokládal, že záření je tvořeno proudem malých částic (tzv. korpuskulární záření) se záporným nábojem. Studium pohybu těchto částic určil jejich hmotnost a náboj. Nové částice byly pojmenovány *elektrony*. Velikost náboje elektronu je rovna hodnotě *elementárního elektrického náboje*, který značíme  $e$ .

Elementární elektrický náboj  $e$  představuje nejmenší hodnotu elektrického náboje, která je v experimentech pozorována. Elektrický náboj se může přenášet nebo měnit pouze po celistvých násobcích této hodnoty. (U *kvarků* se sice

předpokládají hodnoty  $1/3 e$ , resp.  $2/3 e$ , tyto částice ale nebyly pozorovány jako volné).

Mezi experimenty, které potvrzují existenci elementárního elektrického náboje patří elektrolýza, při které je nejmenším přeneseným nábojem  $e$  (viz **Faradayův zákon elektrolýzy**), **objev elektronu**, který má velikost elektrického náboje rovnu  $e$ , a zejména **Millikanův experiment**.

### Millikanův pokus

Millikan v letech 1910 – 1913 prováděl následující experiment. Umístil ve vzduchu dvě ploché elektrody nad sebou. Mezi ně rozprášíl kapičky oleje. Působením ultrafialového záření rozštěpil molekuly vzduchu na elektricky nabitě ionty. Pokud se na elektrody připojilo vysoké napětí (asi 1 000 V), mohly se ionty působením elektrické síly pohybovat. Pohyb bylo možno sledovat, pokud ionty narazily na kapičku oleje, či byly zachyceny kapičkou oleje, kterou bylo možno pozorovat pod mikroskopem.

Pro určení elektrického náboje  $q$  částičky (v daném případě olejové kapky) je možno využít situaci, kdy se kapičky při určité hodnotě elektrického napětí vznášejí („levitují“) mezi elektrodami.

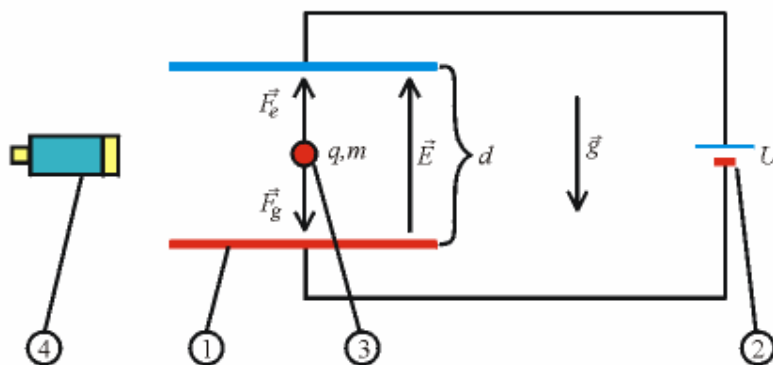


Schéma Millikanova experimentu:

- 1 rovinné elektrody,
- 2 zdroj napětí,
- 3 nabitá částička,
- 4 pozorovací mikroskop.

Veličiny v obrázku:  $U$  - elektrické napětí,  $d$  - vzdálenost elektrod,  
 $\vec{E}$  - elektrická intenzita,  $q$  - elektrický náboj částičky,  $m$  - hmotnost částičky,  
 $\vec{g}$  - gravitační zrychlení. Při vhodně zvoleném napětí elektrická síla  $\vec{F}_e$   
přesně kompenzuje gravitační sílu  $\vec{F}_g$  a částička se vznáší "levituje".

Na částičku ve směru svislice (osa  $z$ ) působí jednak elektrická síla  $F_{e,z} = qE_z$ , jednak gravitační síla  $F_{g,z} = -mg$ , kde  $E_z$  je složka intenzity elektrického pole,  $m$  je hmotnost částičky a  $g$  gravitační zrychlení. Pokud se částička nepohybuje, platí podmínka rovnováhy  $F_{e,z} + F_{g,z} = 0$ .

Pro intenzitu elektrického pole mezi dvěma rovinnými elektrodami, jejichž vzdálenost je  $d$  a na které je připojeno napětí  $U$ , platí vztah  $E_z = \frac{U}{d}$ . Hmotnost kapiček můžeme určit např. ze známé hustoty oleje určením jejich objemu. Z podmínky rovnováhy pak dostáváme pro elektrický náboj:  $q = \frac{dmg}{U}$ .

Obdobným způsobem Millikan zjistil, že nejmenší náboj kapiček, který je možno naměřit, je  $e$ . Ostatní hodnoty byly pak pouze celistvým násobkem této základní hodnoty.

Existence elementárního elektrického náboje se dá považovat za jeden z projevů kvantové povahy látek podobně jako sama existence atomů.

### Absorbční a emisní spektra látek

Látky mohou vyzařovat (**emise**) nebo pohlcovat (**absorpce**) elektromagnetické záření.

#### Spektrum,

zde emisní (resp. absorpční) elektromagnetické spektrum látky, je závislost intenzity elmg. záření vyslaného (resp. pohlceného) látkou, případně závislost jiné veličiny s touto intenzitou jednoznačně spojené (např. absorpčního koeficientu) na frekvenci elmg. záření  $\nu$ , případně na jiné veličině s touto frekvencí jednoznačně spojené (např. na úhlovém kmitočtu, vlnové délce, vlnočtu, energii).

Při znázornění spektra se ovšem často omezujeme pouze na vyznačení oblastí nenulových hodnot intenzity. Obdobně v nejjednodušších typech spektrometrů detekujeme pouze oblasti nenulové intenzity. Podle rozložení těchto oblastí pak dělíme spektra na několik typů:

- **Spojité spektrum.** Intenzita záření v celém rozsahu frekvencí není nikde nulová.
- **Pásové spektrum.** Ve spektru existují intervaly frekvencí, pro které je intenzita nulová. (Ve spektrometru pozorujeme pásy.)
- **Čárové spektrum.** Ve spektru existují frekvence, pro které je intenzita nenulová. Pro ostatní frekvence je intenzita nulová. (Ve spektrometru pozorujeme čáry odpovídající příslušným frekvencím).

#### Poznámky:

- Termín *spojité spektrum* se používá i v případě, že intenzita je nenulová pro určitý vybraný interval frekvencí, např. oblast viditelného záření (spojité optické spektrum).
- Termín *pásové spektrum* se používá i v případě velmi mnoha blízkých čar, které tak vytváří souvislý „pás“ (uvnitř tohoto pásu je spektrum *kvazispojité*).



- Experimentálně pozorované **čárové spektrum** tvoří vždy čáry konečné šířky (tenké „pásy“ v okolí příslušné frekvence), toto rozmytí čar může být způsobeno různými fyzikálními efekty a chybou měření (např. Dopplerův jev, Heisenbergovy relace neurčitosti).

### Experimentálně pozorovaná spektra

Nejdříve byla proměřena optická spektra, později též další oblasti elmg. spektra.

- **Čárové spektrum atomů.** V případě volných atomů (např. v plynu) bylo zjištěno, že jejich optická spektra jsou čárová. Později bylo zjištěno, že pro atomy pozorujeme čárové spektrum i v dalších oblastech elmg. spektra.
- **Pásové spektrum molekul v infračervené oblasti.** Ve spektrech molekul byly pozorovány kvazispojité pásy blízkých čar, především v infračervené oblasti spektra.
- **Spojité optické spektrum pevných látek.** U pevných látek pozorujeme spojitě optické spektrum, jedná se o spektrum tzv. tepelného záření (v případě emise), viz **záření černého tělesa**. V infračervené oblasti pak můžeme pozorovat pásy (např. polovodiče) a v rentgenové oblasti čáry, které odpovídají změnám energetických stavů uvnitř atomu.

Fyzikové vytvářeli první modely atomu, především na základě v té době dosažitelných experimentálních poznatků o struktuře atomu. Tyto modely ovšem musí dávat výsledky, které jsou nejdříve alespoň v kvalitativním souladu s pozorovanými experimentálními skutečnostmi. Objasnění čárového spektra atomů představovalo nejtvrďší oříšek pro fyziky, kteří navrhovali modely atomů.

Na základě **objevu elektronu**, lehké částice se záporným elektrickým nábojem, která může být emitována elektroneutrálním atomem, navrhl Thomson první model struktury atomu. Thomsonovy představy o struktuře atomu můžeme dnes formulovat asi takto:

### Thomsonův pudinkový model atomu

- Hlavní část hmotnosti atomu představuje látka s kladným elektrickým nábojem.
- Hmotnost a kladný elektrický náboj jsou spojitě rozloženy v celém objemu atomu.
- Velmi lehké elektrony jsou umístěny v rovnovážných polohách uvnitř kladně nabitě látky.



### Poznámka:

Uvedený model připomíná pudink (ten odpovídá kladně nabitě látce), v němž jsou zamíchány rozinky (ty představují elektrony). Odtud název tohoto modelu atomu.

Na základě těchto představ se pokusil interpretovat některé v té době známé jevy.

- **Ionizaci** – jako emisi elektronu z atomu. Dodáním energie je možné uvolnit elektron z rovnovážné polohy.

- **Spektrum záření emitovaného atomem**, na základě představy, že elektrony kmitají s určitými frekvencemi kolem rovnovážných poloh a budí elektromagnetickou vlnu s toutéž frekvencí.

#### Nedostatky Thomsonova modelu:

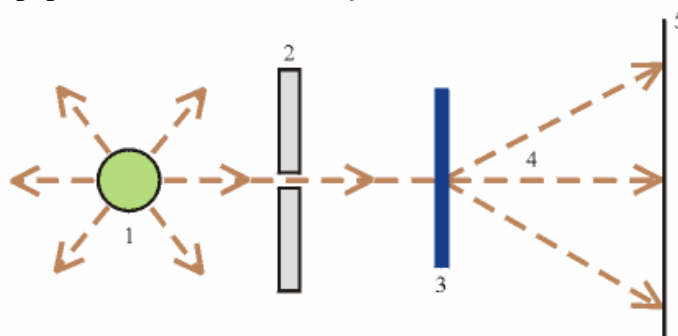
- Výpočty už v případě Thomsonova modelu atomu vodíku (elektron uprostřed spojitě kladně nabitě koule) ukázaly, že frekvence kmitů elektronů nemají žádnou souvislost s frekvencemi v experimentu pozorovaných spektrálních čar. (Poznámka: Ironií je, že současná názorná představa založená na výsledcích kvantové mechaniky je téměř opačná, kladně nabitě jádro uprostřed atomu „obalené záporným elektronovým oblakem“).
- Definitivně byl Thomsonův model atomu vyvrácen **Rutherfordovým experimentem**, který prokázal, že kladně nabitá látka tvořící téměř veškerou hmotnost atomu je soustředěna v malém objemu v centrální části atomu, tzv. **atomovém jádře**.

### 1.1.4 RUTHERFORDŮV MODEL ATOMU

Neméně důležitým momentem ve vývoji představ o struktuře atomu byl **Rutherfordův experiment**.

#### Rutherfordův pokus

Roku 1909 zkoumali na Rutherfordův návrh jeho asistenti Geiger a Marsden pohlcování tzv. paprsků alfa (viz **záření alfa**) v kovech.



#### Schéma Rutherfordova experimentu:

- 1 radioizotopový zdroj částic alfa,
- 2 olověný kolimátor pro vymezení úzkého svazku částic,
- 3 kovová fólie,
- 4 rozptýlené částice alfa,
- 5 scintilační stínítko pro detekci částic alfa.

Jednalo se o proud částic alfa (jádra  ${}^4\text{He}$ ), které byly emitovány zářičem při radioaktivním rozpadu. Pomocí kolimátoru (soustava stínítek) byl vytvořen úzký svazek částic alfa, které dopadaly na tenkou kovovou folii (v původním pokusu zlatá folie o tloušťce asi  $0,1\ \mu\text{m}$ ). Pomocí scintilačního stínítka, na kterém se po dopadu částice objeví záblesk, bylo zjišťováno (počítáním záblesků), kolik částic fólií projde. Bylo pozorováno, že většina částic prochází fólií poměrně snadno. Později bylo zjištěno, že menší počet částic se značně odchyluje od původního směru letu nebo se dokonce odráží zpět před folii, což bylo v rozporu s představami **Thomsonova modelu atomu**, dle kterého kladná hmotná část atomu měla být rozprostřena rovnoměrně v objemu atomu (srážky s lehkými elektrony jsou pro rozptyl poměrně těžkých částic alfa nepodstatné).

### Závěry plynoucí z Rutherfordova experimentu

Rutherford předpokládal, že podstatná část hmoty atomu je soustředěna v kladně nabitém jádře, tj. v centrální oblasti atomu, jehož objem je velmi malý ve srovnání s objemem atomu.

Později byla provedena detailní měření počtu rozptýlených částic v závislosti na rozptylovém úhlu. Rutherford provedl teoretický výpočet pro rozptyl dvou bodových částic s kladným elektrickým nábojem, tzn. s využitím **Coulombova zákona**. Výsledky souhlasily s experimentálně zjištěnými hodnotami. Ze znalosti energie částic alfa  $E_\alpha$  pak bylo možno určit minimální vzdálenost  $r_{\min} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 E_\alpha}$ , na kterou se částice alfa s nábojem  $q_1 = 2e$  mohou přiblížit jádru s nábojem  $q_2 = Ze$ . Vzdálenost  $2r_{\min}$  odpovídá dle Rutherfordových představ rozměru jádra.

**Lineární rozměr atomového jádra** je řádově  $10^{-14}$  až  $10^{-15}$  m, zatímco lineární rozměr atomu je řádově  $10^{-10}$  m.

Uvedené představy Rutherford rozpracoval v tzv. **planetárním modelu atomu**. Na základě rozboru rozptylových experimentů (**Rutherfordův pokus**), usoudil Rutherford (v roce 1911), že atomy mají jádro, které má kladný náboj a na které připadá téměř celá hmotnost atomu, ale na rozdíl od **Thomsonova modelu atomu**, musí jádro zaujímat pouze malou část objemu atomu. S využitím těchto skutečností vytvořil Rutherford model atomu s následujícími předpoklady.

### Rutherfordův planetární model atomu

- Elektrony obíhají kolem těžkého a velmi malého jádra.
- Elektrony se záporným elektrickým nábojem jsou přitahovány k jádru s kladným elektrickým nábojem elektrostatickou silou popsanou **Coulombovým zákonem**.



Tento model atomu se označuje jako planetární, protože elektrony obíhají kolem jádra analogicky jako planety kolem Slunce. Planety jsou na oběžné dráze kolem Slunce drženy gravitační silou popsanou **Newtonovým gravitačním zákonem**.

### Nedostatky Rutherfordova modelu atomu

- Z modelu vyplývá spojité spektrum, zatímco v experimentu pozorujeme čárové spektrum atomů.

V Rutherfordově modelu atomu se může poloha elektronu  $\vec{r}$  i jeho rychlost  $\vec{v}$  měnit spojitě, bude se tedy podle tohoto modelu spojitě měnit i celková energie atomu, která je spojitou funkcí.



Např. u atomu vodíku můžeme pro celkovou energii atomu (resp. elektronu, jádro je v prvním přiblížení nepohyblivé) psát:

$$E = E_{\text{Kinetická}} + E_{\text{Potenciální}} = \frac{m_e v^2}{2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

Předpokládejme kruhovou dráhu elektronu se středem v jádře atomu. Pro pohyb po kružnici platí pro velikost dostředivé síly vztah  $F_d = \frac{m_e v^2}{r}$ , kde  $r$  je poloměr kružnice a  $v$  je rychlost částice – elektronu.

V případě Rutherfordova modelu hraje úlohu dostředivé síly Coulombická elektrostatická interakce. Podle Coulombova zákona tedy platí  $F_d = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$ .

Porovnáním obou vztahů dostáváme  $m_e v^2 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$ . Po dosazení tohoto výsledku

do vztahu pro celkovou energii máme

$$E = \frac{1}{2} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} = -\frac{1}{2} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}. \text{ Při spojitě změně } r \text{ se mění spojitě i } E.$$

- Elektron v Rutherfordově modelu atomu by ztrácel energii a pohyboval by se po spirále směrem k jádru, s nímž by se nakonec spojil. Atom by tedy zanikl. Z výpočtu plyne, že by se tak stalo v čase řádově  $10^{-10}$  s.

Protože elektrony, které obíhají kolem jádra (např. v nejjednodušším případě po kruhové dráze) se pohybují se zrychlením (u pohybu po kružnici to je dostředivé zrychlení), musí jako částice s elektrickým nábojem vyzařovat energii ve formě elektromagnetického záření.

Rutherfordův model je vzhledem k uvedeným nedostatkům nesprávný jakožto model popisující dynamiku atomu, jako model vnitřní struktury atomu (elektrony obíhající kolem jádra s kladným nábojem, velkou hmotností a velmi malým rozměrem) zůstává v platnosti.

### 1.1.5 BOHRŮV MODEL ATOMU

Tento model atomu vychází z představ *Rutherfordova modelu* atomu a pojmů klasické mechaniky. Aby Bohr mohl odstranit hlavní nedostatky Rutherfordova modelu, musel postulovat platnost tzv. *kvantovací podmínky*, kterou nebylo možno získat ze základních zákonů klasické fyziky. Bohr v roce 1913 navrhuje svůj model atomu vodíku. Model je použitelný i pro tzv. vodíku podobné ionty (jádro atomu s jedním elektronem).

#### Bohrův model atomu



- elektrony se pohybují jen po kruhových drahách, pro které je splněna **kvantovací podmínka**:

$$2\pi m_e r v = n h, \quad n = 1, 2, 3, 4, 5, \dots;$$

kde  $m_e$  je hmotnost elektronu,  $r$  **poloměr** kruhové dráhy a  $v$  je rychlost elektronu. Veličina  $n$  se označuje jako kvantové číslo a  $h$  je **Planckova konstanta** ( $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ ),

- elektrony při pohybu po drahách splňujících kvantovací podmínku nevyzařují energii,
- energie může být vyzářena, resp. přijata pouze při přechodu elektronu z jedné dráhy na druhou.

Na základě uvedených předpokladů je možno odvodit **kvantovací podmínku pro energii atomu vodíku**:

$$E_n = -\frac{1}{2} \frac{m_e e_0^4}{\hbar^2 n^2},$$

která je ve shodě s experimentem. Význam symbolu  $\hbar$  je vysvětlen v níže uvedeném odvození.

#### Odvození energetického spektra pro Bohrův model atomu vodíku



Vyjdeme ze skutečnosti, že dostředivá síla při pohybu po kruhové dráze je realizována elektrostatickou silou popsanou Coulombovým zákonem, a také z Bohrovy kvantovací podmínky.

$$\frac{m_e v^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad \text{a} \quad 2\pi m_e r v = n h .$$

Je to soustava dvou rovnic pro dvě neznámé  $r$  a  $v$ ;  $n$  je parametr. Pro zjednodušení výpočtu je výhodné zavést si konstanty  $\hbar = h/2\pi$  a  $e_0^2 = e^2/4\pi\epsilon_0$ . Vyřešením soustavy vzhledem k těmto neznámým dostáváme kvantovací podmínky pro poloměr dráhy  $r$  a rychlost elektronu  $v$ :

$$v_n = \frac{e_0^2}{\hbar} \cdot \frac{1}{n} \quad \text{a} \quad r_n = \frac{\hbar^2}{m_e e_0^2} \cdot n^2.$$

Po dosažení těchto podmínek do vztahu pro celkovou energii atomu vodíku

$E = \frac{1}{2} m_e v^2 - \frac{e_0^2}{r}$ , která je v případě přiblížení nekonečně těžkého a tudíž nepohyblivého jádra celkovou energií elektronu v poli jádra dostáváme kvantovací podmínku pro energii, neboli energetické spektrum:

$$E_n = -\frac{1}{2} \frac{m_e e_0^4}{\hbar^2} \frac{1}{n^2}.$$

S rostoucím  $n$  se zvyšuje hodnota energie, která je záporná, až k nule pro  $n \rightarrow \infty$ , což odpovídá volnému elektronu (ionizace atomu). V přírodě spějí systémy samovolně do základního energetického stavu, což je stav s nejnižší energií.

V případě Bohrova modelu atomu vodíku je základním stavem první hladina

( $n = 1$ ) s energií  $E_1 = -\frac{1}{2} \frac{m_e e_0^4}{\hbar^2}$ , což odpovídá kvantové dráze s nejmenším

poloměrem, který se označuje jako Bohrov poloměr atomu

$$a_0 \stackrel{DEF}{=} r_1 = \frac{\hbar^2}{m_e e_0^2}$$

( $a_0 = 5,2917709 \cdot 10^{-11}$  m).

Z výše uvedených vztahů vyplývá, že s rostoucím  $n$  vzdálenost mezi dráhami narůstá, zatímco vzdálenost energetických hladin klesá (pro vysoké  $n$  lze spektrum považovat za kvazispojité).

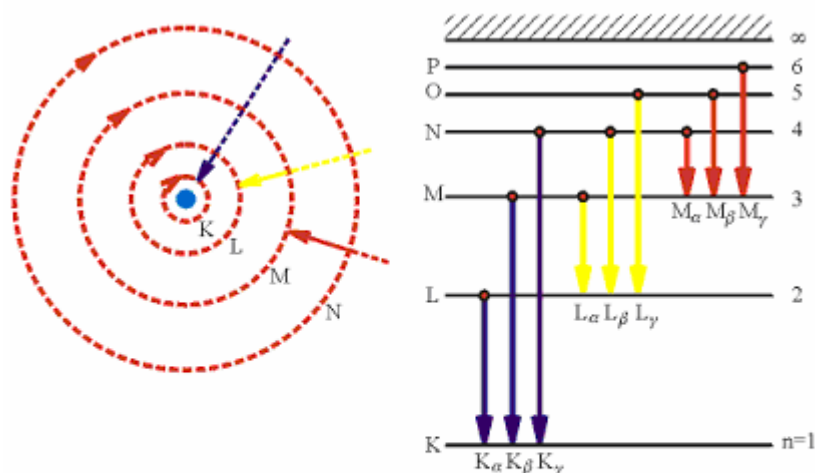
Výsledky lze použít i v případě spektra vodíku podobnému iontu (ionizovaný atom s protonovým číslem  $Z$  a jedním elektronem), pokud provedeme substituci  $Ze_0^2 \leftrightarrow e_0^2$ . Vztahy byly spočteny v limitě nekonečně těžkého jádra (hmotnost jádra  $m_J \rightarrow \infty$ ). Pohyb jádra je možné zohlednit nahrazením hmotnosti elektronu

tzv. **redukovanou hmotností**  $\mu$ , která je definována vztahem  $\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_e} + \frac{1}{m_J}$ .

Ze znalosti energetického spektra můžeme určit absorpční či emisní **elektromagnetické spektrum atomu vodíku**.

### Objasnění čárového spektra atomu vodíku

Při odvození emisního, resp. absorpčního spektra atomu vodíku vycházíme ze znalosti jeho energetického spektra a skutečnosti, že k emisi, resp. absorpci elektromagnetického záření může dojít dle Bohrových předpokladů pouze při přechodu z vyšší energetické hladiny na nižší (emise fotonu, deexcitace atomu), resp. z nižší energetické hladiny na hladinu vyšší (absorpce fotonu, excitace atomu). Energie fotonu  $E_f$ , tj. energie kvanta elektromagnetického záření, je v obou případech rovna (podle zákona zachování energie) změně energie atomu. Tedy  $E_f = \Delta E = E_j - E_i$  při přechodu z  $i$ -té hladiny na  $j$ -tou.



### Bohrův model atomu

Vlevo jsou znázorněny dovolené kruhové dráhy elektronu. Vpravo jsou jim odpovídající hladiny energie (energetické spektrum). Na obou schématech jsou znázorněny šipkami přechody atomů odpovídající spektrálním čárám. Rozlišujeme série čar: K neboli Lymanovu (modře), L neboli Balmerovu (žlutě), M neboli Paschenovu (červeně) a další.

Podle Planckova předpokladu (viz **záření černého tělesa**) je úhlová frekvence fotonu  $\omega = \frac{E_f}{\hbar}$  (pro kmitočet  $\nu = \frac{E_f}{h}$ ). Odtud po dosazení ze vztahu pro

**energetické spektrum atomu vodíku** dostáváme:  $\omega_{ij} = -\frac{1}{2} \frac{m_e e_0^4}{\hbar^3} \left( \frac{1}{j^2} - \frac{1}{i^2} \right)$ .

Ve spektroskopii se používá tzv. vlnočet, což je reciproká hodnota vlnové délky  $\lambda$ . Mezi frekvencí a vlnovou délkou fotonu platí vztah  $\nu = \frac{c}{\lambda}$ , kde  $c$  je rychlost světla ve vakuu, a tedy  $\omega = 2\pi\nu = 2\pi \frac{c}{\lambda}$ . Potom je možno zapsat vztah pro vlnočet

$$\left( \frac{1}{\lambda_{ij}} \right) = -R \cdot \left( \frac{1}{j^2} - \frac{1}{i^2} \right), \quad \text{kde } R = \frac{1}{2} \frac{m_e e_0^4}{\hbar^3 2\pi c} = \frac{1}{8} \frac{m_e e^4}{\epsilon_0^2 \hbar^3 c} \text{ je Rydbergova konstanta.}$$

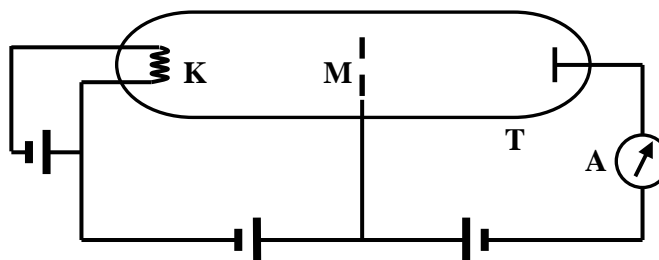
Opět lze provést opravu na pohyb jádra nahrazením hmotnosti elektronu **redukovanou hmotností**.

Odvozené spektrum v hlavních rysech odpovídalo tomu, co bylo pozorováno v experimentu. Při použití spektroskopů s vyšším rozlišením se ale čáry rozpadají na několik blízkých čar, tzv. **jemná** a **hyperjemná struktura spektra**.

J. Franck a G. Hertz provedli v letech 1913 – 1914 sérii pokusů, v nichž prokázali existenci kvantovaných energetických hladin v elektronových obalech atomů. Svými výsledky tak potvrdili správnost předpovědí nedlouho předtím formulovaného **Bohrova modelu atomu vodíku** nespektroskopickou metodou.

### Franckův-Hertzův pokus

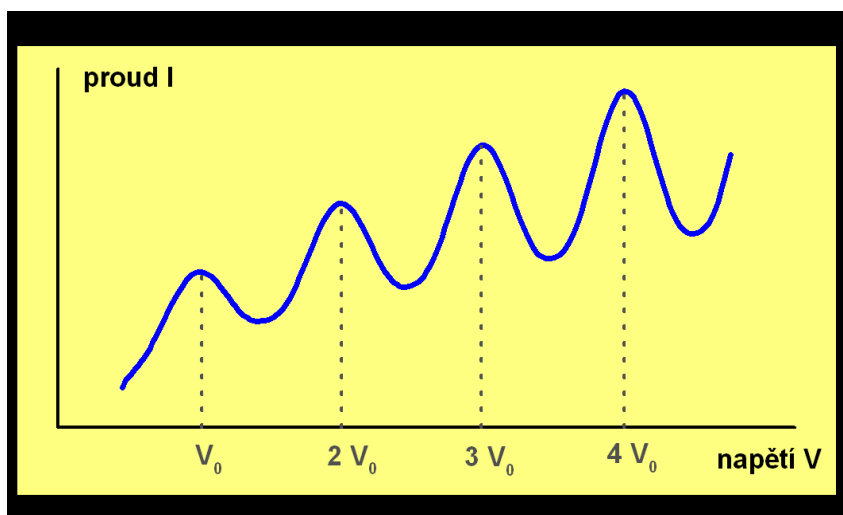
Obecné schéma pokusů prováděných Franckem a Hertzem je uvedeno v následujícím obrázku.



Triodu T plnili Franck a Hertz parami různých prvků. V základní literatuře se obvykle uvádějí výsledky získané pro páry rtuti. Ze žhavené katody K vystupují elektrony a jsou unášeny elektrickým polem ke kladně nabitě mřížce M. Potenciálový rozdíl mezi katodou a mřížkou označme symbolem  $U$ . Na své cestě se elektrony srážejí s atomy par vyplňujícími vnitřní prostor triody, přičemž tyto srážky mohou být jak pružné, tak i nepružné. Slabé brzdící napětí mezi mřížkou a anodou způsobí dále, že jen elektrony s jistou minimální kinetickou energií dopadnou na anodu a přispějí k proudu tekoucímu galvanometrem A. Elektrony s menší kinetickou energií k anodě nedospějí a jsou odvedeny mřížkovou větví obvodu.

### Výsledky Franckova-Hertzova experimentu

Franck a Hertz měřili v takto sestaveném obvodu závislost proudu tekoucího galvanometrem A na napětí  $U$  mezi katodou a mřížkou. Získali tak voltampérové charakteristiky podobné té, kterou pro ilustraci uvádíme na následujícím obrázku.



Franckův - Hertzův pokus - voltampérová charakteristika

### Interpretace výsledků experimentu

Výsledek experimentu je na první pohled nepochopitelný v rámci představ klasické fyziky. Podle ní bychom totiž ve shodě s *Ohmovým zákonem* očekávali spíše monotónní závislost proudu na mřížkovém napětí. Výrazná lokální maxima



na experimentální křivce, navíc víceméně pravidelně rozložená na ose napětí, jsou pochopitelná pouze, přijmeme-li Bohrovu představu o kvantování energie uvnitř elektronových obalů atomů. Popišme si proto procesy, které v triodě probíhají, podrobně.

Elektrony vystupující z katody jsou, jak již bylo uvedeno výše, urychlovány elektrickým polem mezi katodou a mřížkou. Kdyby nebylo srážek s atomy par vyplňujícími vnitřní prostor triody, pohybovaly by se rovnoměrně zrychleně s energií rostoucí lineárně se vzdáleností od katody. Zmíněné srážky ovšem charakter pohybu elektronů ovlivňují. Pružné srážky mění jeho směr. Vzhledem k velkému rozdílu mezi hmotnostmi elektronů a atomů, nedochází během pružných srážek k téměř žádným změnám kinetické energie elektronů. Naopak ve srážce nepružné, která je doprovázena excitací elektronového oblaku srážejícího se atomu, se kinetická energie elektronů mění – zmenšuje. A zde je třeba hledat původ oněch záhadných maxim a minim na voltampérových charakteristikách změřených Franckem a Hertzem.

Je-li energie elektronů v elektronových obalech atomů kvantována, může se měnit jen skokem. Navíc je naprostá většina atomů za běžných pokojových teplot ve stavu s nejnižší přípustnou energií (v základním stavu). Ve Franckově-Hertzově pokusu se tedy elektrony srážejí právě jen s atomy v základním stavu. Označme rozdíl energií mezi základním a prvním excitovaným stavem  $\Delta E$ . Pak ovšem elektron s kinetickou energií nižší než  $\Delta E$  nemůže atom, s nímž se sráží, excitovat. Proto pro urychlující napětí  $U < \Delta E / e$ , kde  $e$  je elementární elektrický náboj, nedochází v prostoru mezi katodou a mřížkou k žádným nepružným srážkám. Pro jednoduchost předpokládáme, že elektrony vystupují z katody s nulovou počáteční rychlostí. Situace se ovšem zcela změní, dosáhne-li napětí  $U$  hodnoty  $\Delta E / e$ . Pak totiž elektrony mají po urychlení tímto potenciálem dostatečnou kinetickou energii na to, aby mohly během srážky atom páry excitovat. Při urychlujícím napětí  $U = \Delta E / e$  proto dochází poblíž mřížky k velkému počtu nepružných srážek elektronů s přítomnými atomy par, ve kterých elektrony ztrácejí téměř beze zbytku svou kinetickou energii. Nemohou pak ale překonat brzdicí napětí mezi mřížkou a anodou a dochází proto k prvnímu prudkému poklesu proudu tekoucího galvanometrem A. První pokles na voltampérové charakteristice změřené Franckem a Hertzem tedy nutně odpovídá napětí  $U = \Delta E / e$ . Podobně i další poklesy proudu tekoucího galvanometrem A odpovídají ztrátám energie elektronů v nepružných, tentokrát násobných srážkách s atomy par. Za druhý pokles odpovídají první nepružná srážka někde v polovině vzdálenosti mezi mřížkou a katodou a druhá u mřížky. Urychlující napětí je v tomto případě  $U = 2\Delta E / e$ . Třetí pokles proudu je způsoben třemi nepružnými srážkami, a to v třetině a dvou třetinách vzdálenosti katoda – mřížka a u mřížky. Urychlující napětí je tentokrát  $U = 3\Delta E / e$ . A tak dále.

Pro páry rtuti zjistili Franck a Hertz, že první pokles proudu nastává pro mřížkové napětí  $U = 4,9$  V. Energetický rozdíl mezi základní a první excitovanou hladinou v atomu rtuti by tedy měl být podle Francka a Hertze  $\Delta E = 4,9$  eV. V dokonalém souladu s tímto závěrem pozorujeme v absorpčním spektru rtuťových par spektrální čaru o vlnové délce 253,6 nm, jíž odpovídá energie fotonu rovná právě oněm 4,9 eV.

### Nedostatky Bohrova modelu atomu

Bohrův model atomu, přestože dává principiálně správné výsledky pro energetické spektrum (totožné s řešením *Schrödingerovy rovnice* pro atom vodíku v elektrostatickém přiblížení) je dnes již překonán, posloužil jako jedno z východisek tehdy vznikající *kvantové teorie*, která popisuje stav systému (tedy i např. atomu) jiným způsobem, než to činila klasická mechanika. Podle této nové teorie je např. v případě atomu neudržitelná představa, že elektron obíhá po přesně určené dráze (trajektorii). Často se uvádí skutečnost, že Bohrův model atomu neobjasňuje jemnou strukturu spekter a že je obtížné jej zobecnit pro víceelektronové atomy. Tyto nedostatky ale nejsou hlavními důvody pro zavržení Bohrova modelu. První nedostatek se částečně podařilo odstranit v *Sommerfeldově modelu atomu*, který můžeme chápat jako snahu o rozpracování postupů založených na pojmech a aparátu klasické fyziky, ovšem s využitím kvantovacích podmínek. Mezitím se ale rozvinula kvantová teorie, která byla obecně platnou a logicky konstruovanou fyzikální teorií a ne pouze jednoúčelově zaměřeným modelem. Druhý nedostatek je obecným problémem v případě řešení úloh většího počtu vzájemně na sebe působících částic, ať už se jedná o oblast klasické či kvantové fyziky (viz *víceelektronové atomy*).

Pro názornost Bohrova modelu je zobrazení elektronů na drahách stále používáno. Dnes jej ale musíme chápat pouze jako schéma, které nás informuje o stavbě atomového obalu, nikoliv jako skutečný obraz reálného atomu. Vztah je tedy analogický vztahu skutečného elektrického obvodu a jeho schématu zakresleného pomocí značek (odpor nemusí být váleček, stejně jako elektron není kulička). Pro úspornost schématu se často nedodrzuje růst poloměru kvantové dráhy s druhou mocninou kvantového čísla  $n$ .

### 1.1.6 SOMMERFELDŮV MODEL (RELATIVISTICKÝ)

Přestože *Bohrův model atomu* v hrubých rysech správně popisoval energetické spektrum atomu vodíku a iontů s jedním elektronem, případně po určitých úpravách i vodíku podobných atomů (tzv. alkalické kovy, které mají jeden elektron ve valenční slupce  $s$ ), zjistilo se, že u mnoha atomů včetně atomu vodíku se při použití spektrometrů s vyšším rozlišením začala pozorovat tzv. **jemná struktura spekter**, ukázalo se, že některé spektrální čáry jsou ve skutečnosti skupiny blízkých čar, tzv. **multipty**.

#### Sommerfeldův model atomu

- Sommerfeld se pokusil objasnit *jemnou strukturu spekter* představou oběhu elektronů po *eliptických drahách*.



- Bylo nutné vyjít z **kvantovacích podmínek** zobecněných pro případ obecných drah elektronů, tzv. **Sommerfeldovy-Wilsonovy kvantovací podmínky**.
- V rámci **nerelativistického řešení** je spektrum atomu vodíku v Sommerfeldově modelu atomu totožné se spektrem **Bohrova modelu atomu**.
- V rámci **relativistického řešení** spektrum atomu vodíku částečně objasňuje **jemnou strukturu spekter**.

Sommerfeld zobecnil původní jednoduchou **Bohrovu kvantovací podmínku** pro moment hybnosti na případ pohybu částice po libovolné uzavřené dráze; tzv. **Sommerfeldovy-Wilsonovy kvantovací podmínky** tvoří základ **Sommerfeldovy kvantové teorie**, která pracuje s aparátem klasické (nekvantové) fyziky. Kvantovací podmínky jsou v rámci této teorie doplněny jako dodatečný postulát, jehož aplikace pak vede zprostředkovaně i ke kvantování dalších fyzikálních veličin, např. energie.

Aby objasnil jemnou strukturu spekter, předpokládal Sommerfeld, že elektrony se mohou pohybovat i po eliptických drahách. Na rozdíl od pohybu po kruhové dráze, při kterém se nemění vzdálenost elektronu od jádra a lze tudíž vystačit s popisem pomocí jediného stupně volnosti, musíme při pohybu po elipse uvažovat stupně volnosti dva. Je tedy třeba uvažovat na rozdíl od Bohrova modelu dvě kvantovací podmínky s dvěma kvantovými čísly. Sommerfeld dále předpokládal, že energie bude záviset na obou kvantových číslech a objasní pozorované multiplety.

### Relativistické řešení Sommerfeldova modelu pro atom vodíku

Konkrétní výpočet provedený pro atom vodíku bez uvážení efektů **teorie relativity** vedl k energetickému spektru, které bylo shodné se spektrem získaným v rámci Bohrova modelu.

Teprve když vzal Sommerfeld v úvahu relativistickou závislost hmotnosti elektronu  $m$  na jeho rychlosti  $v$   $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ , začala celková energie elektronu

záviset na dvou kvantových číslech.

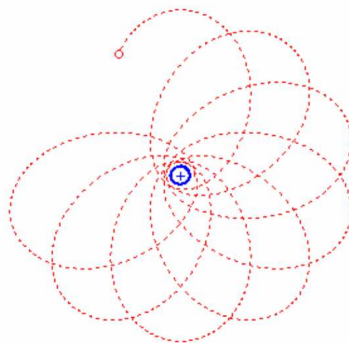
Vzhledem k rychlostem elektronu v atomu není možno relativistické efekty zanedbat, a proto celková energie elektronu v poli jádra s Coulombovým potenciálem  $U$  je dána jako funkce velikosti rychlosti  $v$  či hybnosti  $p = mv$ :

$$E = mc^2 + U = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r} = \sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4} + U(r).$$

První člen vztahu zahrnuje jak kinetickou, tak klidovou energii elektronu, proto při srovnání s nerelativistickými vztahy musíme klidovou energii  $m_0 c^2$  odečíst.

### Pohyb relativistického elektronu v Sommerfeldově modelu

Z řešení relativistických pohybových rovnic vyplývá, že elektron se v Sommerfeldově relativistickém modelu již nepohybuje po eliptické dráze, ale poddráze ve tvaru růžice.



Kinematicky lze dráhu elektronu získat jako složení pohybu elektronu po elipse s ohniskem v jádře, jejíž poloosa se otáčí s konstantní úhlovou rychlostí.

### Energetické spektrum Sommerfeldova modelu atomu

Pokud vyjdeme z řešení získaného metodami nekvantové relativistické fyziky, pak aplikací kvantovacích podmínek po úpravách dostaneme následující vztah pro kvantování energie:

$$E_{n,l} = m_0 c^2 \left[ 1 + \frac{(Z\alpha)^2}{\left( n_r + \sqrt{n_\varphi^2 - (Z\alpha)^2} \right)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \doteq \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 + \frac{(Z\alpha)^2}{n^2} \left( 1 + \frac{(Z\alpha)^2}{n \cdot l} \right)}}$$

kde  $\alpha = \frac{e_0^2}{\hbar c} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} = \frac{e^2}{2\pi\epsilon_0 \hbar c} \doteq \frac{1}{137}$  je tzv. **konstanta jemné struktury**,

$n = n_r + n_\varphi$  a  $l = n_\varphi$  jsou hlavní a vedlejší kvantové číslo.

Uvedený model ovšem dokázal objasnit jemnou strukturu spekter pouze částečně, nedokázal např. objasnit dublety (dvojice blízkých čar) u atomu vodíku, které souvisí s existencí **spinu elektronu**.

Ukázalo se, že představa pohybu elektronu s určitou hybností po určité dráze je neudržitelná, viz též **Heisenbergovy relace neurčitosti**. Proto se kvantová teorie rozvíjela na bázi vlnových rovnic a modely na bázi **Sommerfeldovy kvantové teorie** se dále nerozvíjely.

Energetické spektrum získané na základě Sommerfeldova modelu zahrnuje z **relativistických korekcí** pouze **relativistickou hmotnostní korekci**. Spektrum je analogické se spektrem získaným řešením **Kleinovy-Gordonovy rovnice**, což je relativistická vlnová rovnice, nezahrnující spin částic.

**Test**

**Návod.** Níže uvedená zadání úkolů obsahují několik začátků tvrzení (jsou označena velkými písmeny) a varianty konce tvrzení (označena malými písmeny). Vaším úkolem je vybrat ke každému začátku tvrzení, takové varianty jeho konce, které dají tvrzení pravdivé. Příslušné varianty vyznačte (křížkem, zakroužkováním) do souhrnné tabulky za posledním úkolem v tomto testu. Správnost vašich odpovědí si můžete ověřit v klíči. Obdobné úkoly najdete i v dalších kapitolách, řiďte se při jejich řešení stejným návodem. Úkoly budou pro vaši lepší orientaci číslovány průběžně.

**Úkol 1.****V**

- A. Thomsonově modelu atomu
- B. Rutherfordově modelu atomu
- C. Sommerfeldově relativist. modelu atomu

**se předpokládá, že**

- a) se elektrony pohybují po kruhových drahách
- b) se elektrony pohybují po eliptických drahách
- c) se elektrony pohybují pouze po drahách splňujících kvantovací podmínku
- d) elektrony kmitají kolem rovnovážných poloh
- e) elektrony jsou soustředěny v malé oblasti uprostřed atomu
- f) jádro je spojitě rozprostřeno v celém objemu atomu
- g) jádro je záporně nabitě kontinuum
- h) jádro zaujímá velmi malou část celého objemu atomu
- i) jádro představuje jen malou část celkové hmotnosti atomu
- j) v jádře je obsažena téměř celá hmotnost atomu
- k) je nutno počítat se změnou hmotnosti elektronu při rychlostech blízkých rychlosti světla
- l) klasický vztah pro kinetickou energii elektronu není použitelný

**Úkol 2.****Přínos**

- Thomsonova modelu atomu
- A. Rutherfordova modelu atomu
- B. Sommerfeldova relativist. modelu atomu

**oproti vývojově předcházejícímu modelu spočívá v tom, že**

- a) to byl vůbec první model struktury atomu
- b) vysvětluje výsledky Rutherfordova experimentu
- c) vysvětluje existenci čárového spektra atomu
- d) vysvětluje pozorovanou stabilitu atomu
- e) částečně objasňuje jemnou strukturu spektra atomu
- f) popírá existenci jemné struktury spektra atomu
- g) vysvětluje přítomnost neutronů v atomovém jádře
- h) vysvětluje existenci spojitěho spektra atomu

**Úkol 3.**

**Nedostatky**

- A. Thomsonova modelu atomu  
 B. Rutherfordova modelu atomu  
 C. Sommerfeldova relativist. modelu atomu

oproti vývojově následujícímu modelu spočívají v tom, že

- a) neobjasňuje uspokojivě rozptyl svazku alfa částic na tenké kovové folii  
 b) nevysvětluje pozorovaná čárová spektra atomů  
 c) atom v krátké době zaniká v důsledku pádu elektronu do jádra  
 d) neobjasňuje hyperjemnou strukturu spektra atomu  
 e) vůbec neobjasňuje jemnou strukturu spektra atomu  
 f) atom se rozpadá v důsledku srážek elektronů  
 g) dochází k rozpadu jádra atomu vlivem radioaktivních procesů  
 h) pohlcuje fotony

**Tabulka pro označení správných odpovědí.**

<b>1. A</b>	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l
<b>1. B</b>	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l
<b>1. C</b>	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l
<b>2. A</b>	a	b	c	d	e	f	g	h				
<b>2. B</b>	a	b	c	d	e	f	g	h				
<b>2. C</b>	a	b	c	d	e	f	g	h				
<b>3. A</b>	a	b	c	d	e	f	g	h				
<b>3. B</b>	a	b	c	d	e	f	g	h				
<b>3. C</b>	a	b	c	d	e	f	g	h				

**Otázky**

- Chemické zákony.** Vyjmenujte základní chemické zákony, které měly vliv na rozvoj atomové teorie. Uveďte znění těchto zákonů a vysvětlete, v čem spočívá jejich význam pro rozvoj atomové teorie.
- Zákon zachování hmotnosti a energie.** Objasněte souvislost mezi oběma zákony. Proveďte rozbor platnosti zákona zachování hmotnosti: a) v chemických reakcích, b) v jaderných reakcích. V obou případech objasněte k jakým změnám hmotnosti dochází pro izolovaný systém a systém s výměnou energie (energie systému se nezachovává).
- Daltonova atomová teorie.** Objasněte východiska Daltonovy teorie. Vyjmenujte postuláty této teorie. Uveďte znění těchto postulátů. Srovnajte Daltonovy představy se stavem současných znalostí. Uveďte, co zůstává v platnosti a co je třeba v postulátech opravit či doplnit.
- Molekuly.** Vysvětlete pojem molekuly. Objasněte rozdíl mezi molekulou a atomem. Z čeho vyplynula nutnost zavedení pojmu molekuly? Objasněte termíny heteronukleární a homonukleární molekula.

5. **Elementární elektrický náboj.** Jmenujte experimenty, ve kterých byla prokázána existence elementárního elektrického náboje. Objasněte stručně princip těchto experimentů.
6. **Elmg. spektrum.** Definujte pojem elektromagnetické spektrum. Vysvětlete rozdíl mezi emisním a absorpčním spektrem. Uveďte typy spekter, které můžeme v přírodě pozorovat. Uveďte jaký typ spekter pozorujeme u atomů, molekul, pevných látek. Jaký typ spektra má tzv. absolutně černé těleso<sup>1</sup>? Uveďte tvar vyzařovacího zákona absolutně černého tělesa.
7. **Energetické spektrum.** Definujte pojem energetické spektrum. Objasněte vztah energetického a elmg. spektra. Odvoďte z tvaru energetického spektra v Bohrově modelu atomu vztah pro elektromagnetické spektrum – Rydbergova konstanta.
8. **Rutherfordův experiment.** Nakreslete schéma a stručně popište uspořádání tohoto experimentu. Uveďte, jaký výsledek experimentu bychom mohli očekávat na základě Thomsonova modelu atomu. Uveďte výsledky Rutherfordova experimentu. Jak byly tyto výsledky interpretovány? Čím experiment přispěl pro rozvoj představ o stavbě atomu?
9. **Katodové paprsky.** Popište experiment, ve kterém byly pozorovány katodové paprsky. Objasněte podstatu katodových paprsků. V čem spočívá význam objevu elektronu pro rozvoj představ o struktuře atomu?
10. **Thomsonův model atomu.** Uveďte experimentální skutečnosti, které vedly Thomsona k vytvoření pudinkového modelu atomu. Nakreslete schéma Thomsonova modelu atomu a objasněte na něm tehdejší Thomsonovy představy o stavbě atomu. Popište, jak je možné v rámci tohoto modelu interpretovat ionizaci atomu a vznik emisního spektra. Které experimentální skutečnosti a proč nebylo možno na základě Thomsonova modelu objasnit? Zejména uveďte experiment, jehož výsledky vyvrátily Thomsonovy představy o stavbě atomu.
11. **Rutherfordův model atomu.** Uveďte experiment a jeho výsledky, na základě kterých navrhnul Rutherford planetární model atomu. Nakreslete schéma modelu a objasněte na něm Rutherfordovy představy o stavbě atomu. Uveďte dva významné nedostatky tohoto modelu – tj. ty důsledky modelu, které jsou v rozporu s experimentem. Co zůstává z tehdejších Rutherfordových představ v platnosti dodnes?
12. **Bohrův model atomu.** Uveďte experimentální skutečnosti, které vedly Bohra k vytvoření jeho modelu atomu vodíku. Uveďte základní předpoklady Bohrova modelu. Které z předpokladů vychází z Rutherfordova modelu a které představují dodatečné postuláty? Vysvětlete, proč Bohr tyto dodatečné postuláty přidává. Odvoďte na základě Bohrova modelu vztah pro kvantování poloměru dráhy, rychlosti a (celkové) energie elektronu (energetické spektrum). Objasněte na základě vztahu pro kvantování energie tvar elmg.

---

<sup>1</sup> Absolutně černé těleso – viz též následující kapitola.

spektra atomu vodíku. Srovnajte spektrum Bohrova modelu se spektrem získaným z SR (v elstat. přiblížení) a s experimentálním spektrem.

13. **Sommerfeldův model atomu.** Uveďte experimentální skutečnosti, které vedly Sommerfelda k vytvoření jeho modelu atomu. Uveďte předpoklady nerelativistického a relativistického Sommerfeldova modelu atomu. Srovnajte obě verze modelů – hlavně energetické spektrum. Které experimentální skutečnosti je možné objasnit v rámci těchto modelů?



### Korespondenční úkol

Zpracujte písemně otázky zadané tutorem, řiďte se přitom jeho pokyny.



### Shrnutí kapitoly

Představa, že se látka skládá z dále nedělitelných částic, není nová. Již ve starém Řecku vznikla první atomová hypotéza. V té době však neexistovaly prostředky k jejímu ověření. Teprve na základě analýzy empiricky ověřených základních chemických zákonů mohl Dalton formulovat atomovou hypotézu, jejíž základní postuláty byly později ověřeny i fyzikálními metodami. Nové poznatky zejména z jaderné fyziky ovšem vedly k nutnosti korigovat detaily této původní atomové teorie.

Další objevy ve fyzice umožnily rozvíjet modelové představy o stavbě a později i dynamice atomů. Nové objevy a nesoulad se známými experimentálními daty vedl k postupnému korigování a upřesňování modelů. Objev elektronu přiměl Thomsona k vytvoření modelu atomu se spojitě rozloženou hmotou. Rutherfordův experiment ovšem ukázal, že téměř všechna hmota je v malém jádře atomu. Rutherfordův planetární model s představou elektronů obíhajících kolem jádra nedokázal objasnit čárové spektrum atomů a navíc byl podle něj atom nestabilní.

Bohr vyšel z planetárního modelu atomu, doplnil jej ovšem o dodatečné postuláty, zejména tzv. kvantování podmínku, která umožnila vysvětlit pozorované čárové spektrum. Sommerfeld pak kvantovací podmínky využil ke zpřesnění popisu spektra atomu vodíku, i když jen s částečným úspěchem.

Kvantovací podmínky zprvu představovaly jen jakýsi nesourodý doplněk tehdejších fyzikálních teorií. Teprve později se ukázalo, že se jedná o projev zákonitostí obecnější kvantové teorie, která byla kromě poznatků z atomové fyziky podpořena i dalšími experimentálními fakty.



