

Využití pojmových a myšlenkových map ve výuce fyziky

VÁCLAV MEŠKAN

Pedagogická fakulta ZČU, Plzeň, Fakultní základní škola L. Kuby, České Budějovice

1 Úvod

S narůstajícím množstvím poznatků, se kterými se žák ve vyučování setkává, vyvstává problém, jak tyto poznatky v paměti uchovat a v případě potřeby opět vybavit. Klíčovou se zde jeví schopnost v paměti poznatky třídit prostřednictvím vzájemných vztahů mezi těmito poznatky. Je tedy nutné, aby byl ve výuce kladen důraz na **vytváření těchto vztahů**, a na vyšší úrovni pak na schopnost **utvářet vztahy nové** prostřednictvím tvůrčí činnosti. Jak dodává *Bruner* (in [5]): „Jedinou cestou, jak se vypořádat s návalem vědomostí, je **pochopení souvislostí ve vědě, a v pochopení vnitřních struktur vědních oblastí.**“ Ve vyučovacím procesu pak hovoříme o utváření vztahového rámce mezi poznatky.

Nástrojem k odstranění poznatkové roztříštěnosti (izolovanost poznatků bez chápání vztahů mezi nimi) a zároveň nástrojem ke zvýšení efektivity tvůrčího řešení různých problémů mohou být **pojmové a myšlenkové mapy**, které pozvolna nacházejí své místo v metodologii moderního školního vyučování. V tomto článku se pokusím navrhnout aplikaci tohoto nástroje při výuce fyziky na základní škole.

2 Terminologie

Spolutvůrce pojmu myšlenková či mentální mapa (*mind map*), americký psycholog *Tony Buzan*, označuje tímto pojmem nástroj ke zvýšení efektivity myšlení, plánování a snazšího zapamatování informací. K návrhu

tohoto nástroje dospěl na základě svých znalostí funkce mozku. Funkce mentální mapy zjednodušeně spočívá v grafickém znázornění myšlenkových procesů a vztahů mezi informacemi. Oddělení pojmových map od map myšlenkových je umělé, uchyluji se k němu pro potřeby tohoto článku, abych zdůraznil dvě hlavní funkce mentálního mapování, o nichž jsem se zmínil výše – vytváření vztahů mezi pojmy a grafické znázornění určitého myšlenkového procesu.

- **Pojmová mapa:** Je grafickým znázorněním vztahů mezi jednotlivými poznatky. Chápání těchto vztahů umožňuje vytvářet **vztahový rámec** pojmům, které mají být u žáka výukou vytvořeny (používám výraz „**tvorba pojmů**“ namísto „předávání poznatků“, abych zdůraznil konstruktivistický charakter tohoto procesu a zdůraznil, že je to žák, který na základě dřívějších zkušeností a zkušeností poskytnutých výukou **vytváří své vlastní pojetí těchto pojmů**).
- **Myšlenková mapa:** Je v tomto článku chápána jako grafické znázornění myšlenkových postupů při nejběžnějším tvůrčím procesu – při řešení problémů a problémových situací.

3 Psychologické odůvodnění

Buzan vysvětluje účinnost mentálního mapování s odkazem na princip mozkové synergie. Upozorňuje, že: „Mozek funguje synergeticky. V synergetickém systému platí, že celek je větší než součet jeho jednotlivých součástí. $1 + 1$ se tam rovná více než 2, přičemž v takovém systému může slůvko „více“ znamenat až nekonečno ([2] str. 46).“ Jedna myšlenka spustí v mozku „řetězovou reakci“ asociací, jejímž výsledkem je veliké množství nových myšlenek. Dodává, že: „Máme-li uvolnit svůj tvůrčí potenciál, musíme pečovat o takové myšlenkové prostředí mozku, které uvolňuje jeho synergetický způsob myšlení ([2] str. 73).“ Přitom za klíčovou, z hlediska mozkové synergie, označuje Buzan součinnost pravé a levé hemisféry. „Způsob, jakým si levá a pravá strana velkého mozku mezi sebou předávají zprávy, vytváří synergetický vzorec myšlení a růstu. Jestliže se příliš spoléháme na úkoly, které zaměstnávají jenom jednu mozkovou hemisféru, odrazujeme hemisféry od vzájemného dialogu a velmi výrazně redukuje celkový výkon svého mozku. Stručně řečeno, omezujeme jeho synergetický způsob myšlení ([2] str. 51). Vzdělávací systémy se podle Buzana soustřeďují převážně na dovednosti levého (logického) mozku a mnohem menší pozornost věnují dovednostem mozku pravého, čemuž přičítá hlavní zá-

porný vliv na naši schopnost myslet tvůrčím způsobem. „Jestliže se spoléháme jen na jednu svou mozkovou hemisféru a druhou zanedbáváme, potom drasticky omezujeme celkový potenciál svého mozku ([2] str. 45).“

Dále odůvodňuje význam mentálního mapování a tvrdí: „Mentální mapy jsou tak mocným nástrojem mimo jiné proto, že zaměstnávají obě strany mozku, neboť se v nich uplatňuje zobrazení, barva a představivost v kombinaci se slovy, čísly a logikou (. . .) Vzhledem k tomu, že všechny představy zachycené na mentální mapě jsou navzájem propojeny, může náš mozek díky asociacím provádět jinak těžko uskutečnitelné myšlenkové skoky vedoucí k rychlému porozumění a k vyvolání bohaté představivosti ([2] str. 51).“ Na jiném místě Buzan upozorňuje, že nejhorší možnou cestou k tvůrčím projevům našeho mozku je **lineární zápis** poznámek a výtčů. Řádky zde působí doslova jako mříže, jejichž vinou se mozek ocitne v pomyslném vězení, v němž se **metodicky odpojuje jedna myšlenka od druhé a brání se jakýmkoli vazbám novým**. Je to, jako bychom vzali nůžky a rozstříhali spojení mezi svými mozkovými buňkami ([2] str. 78).

4 Zásady pro tvorbu mentálních map

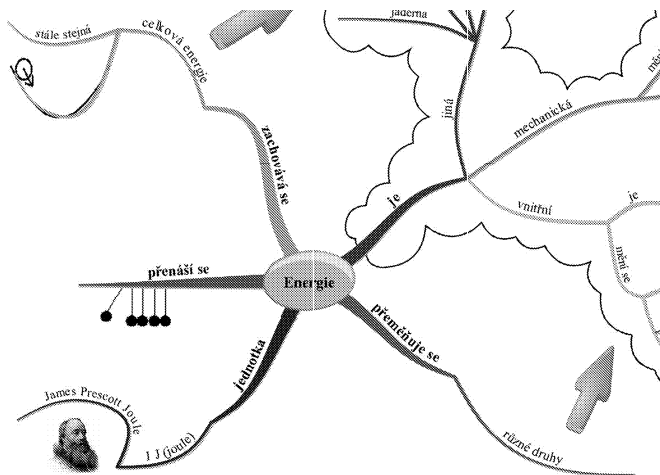
Buzan ve svém díle dále uvádí sedm kroků k vytvoření mentální mapy. Tyto zásady platí v našem případě pro tvorbu pojmových i myšlenkových map, ve výuce ovšem z časových a dalších praktických a organizačních důvodů nemusí být všechny zásady nutně splněny, uvedená doporučení považujeme v tomto směru za ideální ([2] str. 20):

1. Doporučený začátek mapy je uprostřed šikmo položeného papíru – mozek tak může svobodně působit všemi směry a vyjadřovat se svobodněji a přirozeněji.
2. Ústřední myšlenku vyobrazujte nebo doplňte obrázkem, který má, slovy autora, hodnotu tisíce slov.
3. Tvůrce mapy by měl užívat různé barvy – pro mozek jsou podle autora stejně podnětné jako názorná zobrazení, tvůrčí myšlení získává energii navíc a celý proces je zábavnější.
4. K centrálnímu obrázku se připojují hlavní větve, k nim větve druhé úrovně, třetí úrovně atd. – vysvětlení autora spočívá v tom, že mozek pracuje pomocí asociací, rád si spojuje dvě (nebo více) věci dohromady. Propojením větví vytváříme základní strukturu.
5. Větve mají být tvořeny pomocí křivek, nikoliv přímků, zakřivené organické větve jsou pro mozek mnohem atraktivnější.

6. Každé lince by mělo náležet pouze jedno klíčové slovo.
7. Celou plochu mapy by měla provázet různá vyobrazení a obrázky, jejichž funkce je stejná jako funkce centrálního obrázku.

5 Využití pojmových map ve výuce fyziky

Fyzikální pojmy patří k nejabstraktnějším, s nimiž se žák během své školní docházky setkává. Během výuky se tak potýká s celou řadou termínů, které pro něj byly do té doby buďto zcela neznámé, anebo bylo jeho chápání obsahu těchto pojmů odlišné od pojetí vědeckého, které tvoří obsah výuky. Toto „předvědecké“ chápání pojmů je během procesu výuky zpřesňováno a dále prohlubováno [3]. Cílem výuky je nabídnout žákovi prostor v podobě pečlivě připravovaných výukových aktivit, které mu poskytnou novou zkušenost a umožní korigovat své stávající představy. Tento proces nazývá Mechlová vytvářením fyzikálních pojmů u žáků a opět zde zdůrazňuje význam vytváření vztahového rámce vytvářeným pojmům [3].



Obr. 1 mová mapa – Energie

Role učitele spočívá v přípravě vhodné náplně výuky, která žáka provede ke správnému vybudování daného pojmu a objevování vztahů mezi pojmy. Pomoci přitom může zařazení pojmové mapy učiva, kterou může učitel předložit žákům například po ukončení určitého tematického celku.

Smysl pojmového mapování spočívá v grafickém zobrazení zdůrazňovaných vztahů.

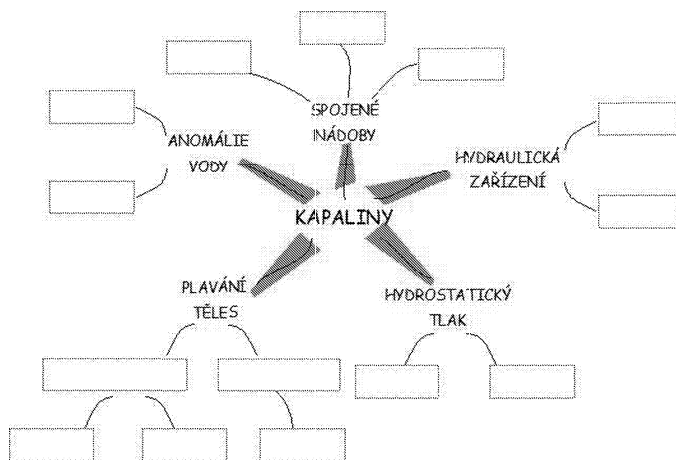
Je zde ovšem nutné uvědomit si, že **skutečný přínos takové mapy vyplyne teprve tehdy, kdy žák sám tuto mapu tvoří!** S tímto způsobem práce musí být žák ovšem seznámen, musí ovládat zásady tvorby myšlenkových map. To pochopitelně vyžaduje, aby od učitele dostal správné příklady hotových map a určitý „výcvik“ v jejich vytváření.

Výřez z pojmové mapy uvádějící vztahový rámec pojmu energie v rozsahu učiva základní školy je uveden na obr. 1. mová mapa znázorňuje vztahy mezi dílčími pojmy souvisejícími s centrálním pojmem energie a uvádí základní vlastnosti této fyzikální veličiny (chce-li čtenář vidět původní kompletní mapu, nechť se prosím obrátí na mekan@email.cz).

5. 1 Využití pojmové mapy při fixaci učiva a diagnostice

Pojmové mapy je dále možné využít v rámci diagnostiky chápání těchto vztahů a tím úrovně vybudování či osvojení daných pojmů. Příklad využití pojmové mapy pro potřeby diagnostiky uvádím na obr. 2. Žák má za úkol přiřadit k jednotlivým uzlům pojmové mapy následující pojmy:

- hustota kapaliny,
- zvedák,
- zdymadlo,
- voda u dna: 4°C ,
- vztlaková síla,
- hloubka,
- lis,
- hladina,
- ve stejné výšce,
- led plave,
- hadicová vodováha,
- hustota kapaliny,
- hmotnost tělesa,
- hustota tělesa,
- objem tělesa,
- tíhová síla.



Obr. 2 Využití pojmové mapy při diagnostice

Řešení úlohy nechávám na čtenáři. Důležité je, že žák může připojovat i další větve a doplňovat vlastní pojmy.

6 Využití myšlenkových map ve výuce fyziky

K osvojení pojmů patří též schopnost s těmito pojmy aktivně manipulovat a využívat je k řešení problémových situací, které jsou ve výuce simulovány řešením problémových úloh. Přitom je především nutné intenzivně bojovat s přirozenou tendencí žáků (především slabších) vytvářet určité algoritmy pro řešení typově podobných úloh. Praxe ukazuje, že tyto algoritmy jsou totiž mnohdy chybné a stávají se zcela nepoužitelnými v okamžiku, kdy se předkládaný problém změní. Typickým příkladem je řešení početních úloh, kdy si žák při výpočtu hodnoty určité fyzikální veličiny pamatuje pouze, jaké matematické operace má provádět a zcela zanedbává fyzikální význam zadaných čísel. Při výpočtu například hydrostatického tlaku si tak žák pamatuje pouze to, že má vynásobit tři čísla, ale význam těchto „čísel“ mu zcela uniká a zpravidla je bezradný, je-li úloha zadána problémově, nejsou-li například v úloze zadaná všechna potřebná data (úlohy s neúplným zadáním, nonverbální úlohy).

Didaktika fyziky má zpracovanou a léty ověřenou metodiku řešení fyzikálních úloh. K odstranění tendence vytvářet chybné algoritmy je ovšem možné tento standardní postup doplnit určitým diagramem myšlenkového

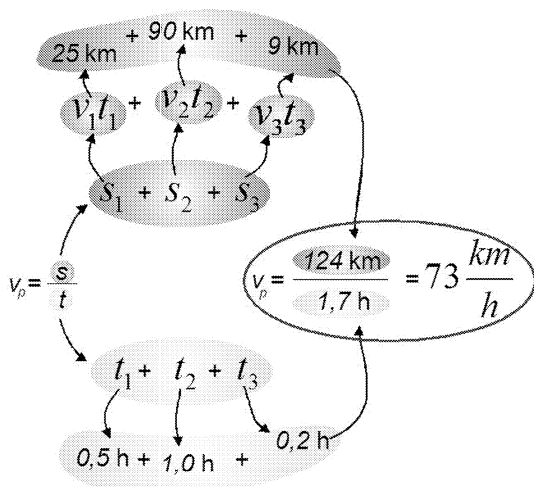
postupu – myšlenkovou mapou – například ve fázi diskuse o postupu řešení zadané úlohy. Význam použití mapy spočívá právě v zobrazení analyticko-syntetických myšlenkových postupů, které jsou typické pro řešení složitějších fyzikálních úloh.

Na dalším obrázku (obr. 3) je příklad myšlenkové mapy znázorňující analyticko-syntetický postup při řešení klasické jednoduché úlohy na výpočet průměrné rychlosti nerovnoměrného pohybu tělesa.

Zadání úlohy může znít následovně:

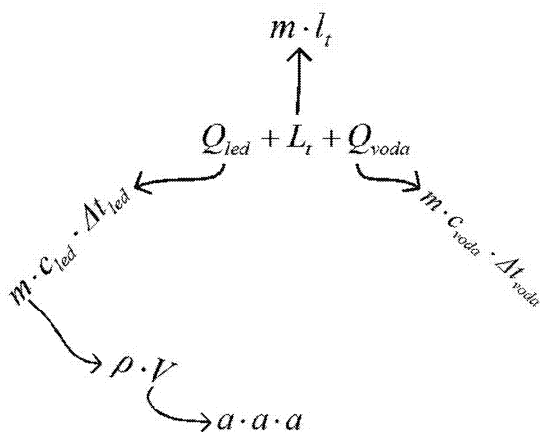
Motocyklista se na své vyjíždce pohybuje prvních 30 minut průměrnou rychlostí 50 km/h, dále se po dobu 1 h pohybuje průměrnou rychlostí 90 km/h a v posledním úseku se pohybuje průměrnou rychlostí 45 km/h po dobu 12 minut. Urči průměrnou rychlost motocyklisty na celé této trase.

Jde o jednoduchou úlohu, jaká může být zadána už na úrovni základní školy a především pak víceletém gymnáziu. Mapa znázorňuje možný analyticko-syntetický postup řešení této úlohy. Řešitel vychází z obecného vztahu pro průměrnou rychlost a dále postupuje analyticky – do vztahu postupně dosazuje dílčí vztahy tak, aby veličiny v obecném vztahu nahradil známými veličinami uvedenými v zadání úlohy. Takto vyřeší odděleně celkovou dráhu a celkový čas pohybu a poté dílčí výsledky spojí.



Obr. 3 Myšlenková mapa – Analytické řešení fyzikální úlohy

Důležité při použití myšlenkové mapy je, že **řešitel nevidí hned celou hotovou mapu, ale že je svědkem její tvorby nebo je v ideálním případě sám jejím tvůrcem**. Může tedy názorně sledovat myšlenkový proces vedoucí k řešení úlohy. Mapa je tak tvořena během procesu řešení problému nebo během diskuse o možném řešení. Učitel může například na základě diskuse se žáky postupně mapu kreslit na tabuli. Ať už mapu kreslí učitel nebo žák, postup je vždy takový, že tvůrce mapy začíná od ústředního obecného vztahu, v tomto případě vztahu pro průměrnou rychlost, a postupně rozvíjí mapu nejprve jedním směrem (řekněme „linií celkové dráhy“) a poté druhým směrem („linií celkového času“), až na závěr obě linie spojí k určení výsledku. Grafická podoba a organizace mapy je pouze na vkusu a schopnostech tvůrce, zpočátku ovšem bude zcela jistě potřebovat určitou pomoc zkušeného tvůrce – učitele – jenž by měl být na tento styl práce zvyklý. **Naším cílem by mělo být nejen názorně vysvětlit řešení určité úlohy či problému, ale především postupně naučit žáka schopnosti takovou mapu sám vytvořit, což znamená, že je schopen uvědomit si a přesně zachytit svůj vlastní myšlenkový postup.**



Obr. 4 Myšlenková mapa – struktura řešení úlohy – teplo přijaté tělesem

Řešení jiné, složitější úlohy je na obrázku 4. Jde o úlohu na výpočet tepla:

Zadání úlohy: *Určí, kolik tepla musí přijmout kostka ledu (tvaru krychle) o délce hrany 2 cm, aby se změnila na kapalinu o teplotě 10 °C. Počáteční teplota ledu je –5 °C.*

Jde o úlohu s neúplným zadáním, k jejímuž vyřešení je nutné některé údaje zjistit z jiných zdrojů (hustota ledu, měrná tepelná kapacita ledu a vody, skupenské teplo tání vody).

Uvedená mapa přehledně a srozumitelně znázorňuje základní myšlenkový postup při řešení této úlohy. Je v ní znázorněna záměrně **pouze základní struktura řešení uvedené úlohy**. Konkrétní řešení je otázkou dalšího, víceméně standardního postupu. Vzniklá mapa je výsledkem předchozí analýzy zadané úlohy, během které žáci objeví základní myšlenku řešení úlohy, a sice že je nutné rozdělit řešení na tři části – ohřev ledu z teploty –5 °C na teplotu tání vody (v mapě označeno Q_{led}), samotné tání vody, při níž těleso musí přijmout skupenské teplo tání (L_t) a ohřev vody z teploty tání na teplotu +10 °C (Q_{voda}). V tuto chvíli začínají tvořit mapu – postupně rozvíjejí jednotlivé větve, až všechny neznámé veličiny nahradí veličinami známými.

7 Závěr

Článek je pouhým nastíněním a představením jednoho z netradičních nástrojů, které mohou zvýšit efektivitu výuky nebo minimálně školní výuku zpestřit. Tvorba pojmových a myšlenkových map vlastně nevnaší do výuky nic radikálně nového. Podstata vyučovacího procesu zůstává stále stejná. Důležitost chápání vztahů mezi pojmy jistě není ničím, o čem by bylo nutné čtenáře přesvědčovat. Taktéž to, čeho jsme dosáhli využitím myšlenkové mapy při řešení úlohy, není ničím jiným než „překreslením“ použitých myšlenkových postupů. Samotný postup řešení se od tradiční metodiky nijak neliší, ani se jí nesnaží nahradit, má jí pouze vhodně doplnit. Přínos mentálního mapování ovšem spočívá především v přívětivosti pro náš mozek a v synergetickém zapojení obou hemisfér, které navíc podněcuje tvořivý přístup ke zpracovávaným informacím.

Literatura

- [1] *Buzan, T.*: Make the most of your mind. Pan Books Ltd, London 1988.
- [2] *Buzan, T.*: Mentální mapování. Portál, Praha 2007.
- [3] *Mechlová, E.*: Fyzikální pojmy. SPN, Praha 1990.
- [4] *Fisher, R.*: Učíme děti myslet a učit se. Portál, Praha 2004.
- [5] *Vachek, J., Lepil, O.*: Modelování a modely ve vyučování fyziky. SPN, Praha 1980.

Částicová struktura látek ab initio III^{*)}

Od spekulativních představ o stavbě atomu k jeho jadernému modelu

ALEŠ LACINA

Přírodovědecká fakulta MU, Brno

Jaderný model atomu formuloval 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 spojitě rozložení „kladného závaží“ v celém jeho objemu a stabilní rozmístění elektronů uvnitř něj [11].

Vzhledem k celkové neutralitě atomu pociťuje α -částice, která jej míjí, 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.

^{*)} Článek je částí rozsáhlejšího textu předneseného na konferenci *Moderní trendy v přípravě učitelů fyziky 3* (Srní 2007) a publikovaného v Československém časopisu pro fyziku [i].

Systematické experimentální studium rozptylu α -částic o kinetické energii $T = 7,7$ MeV (resp. rychlosti $v = 2 \cdot 10^7$ m·s⁻¹), jimiž byla ostřelována zlatá fólie tloušťky $d = 3 \cdot 10^{-7}$ 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.

Předběžný 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, již působí podstatně hmotnější ($m_{Au}/m_\alpha \approx 50$) „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 trajektorii je hyperbola.) Druhou nutnou podmínkou odrazu zpět je obrácení směru pohybu takové α -částice, které ovšem předpokládá její úplné zabrždění působením odpudivé síly. V bodě, v němž k němu dojde, je potenciální energie α -částice rovna její počáteční kinetické energii, tj.

$$V(R_0) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_\alpha q_{Au}}{R_0} = T. \quad [P9]$$

Tato evidentní energiová bilance umožňuje jednoduše vyjádřit veličinu R_0 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_0 také horním odhadem poloměru R „kladného závaží“:

$$R \leq R_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_\alpha q_{Au}}{T}.$$

Po dosazení číselných hodnot $q_\alpha = 2e$, $q_{Au} = 79e$ (e je elementární náboj), $T = 7,7$ MeV se dostává

$$R \leq 2,9 \cdot 10^{-14} \text{ m}. \quad [P10]$$

„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 [P11]. 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:

- **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]):

$$\frac{N(\theta)}{N} = \frac{1}{(4\pi\varepsilon_0)^2} \frac{ndq_\alpha^2 q_{\text{Au}}^2}{16L^2 T^2} \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}, \quad [\text{P12}]$$

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 [P10]) 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 [P13], že:

- **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 mikrosvěta ukončíme. Fyzikální argumentací rozdělenou do deseti kroků reprezentujících první podstatné dílčí pokroky v poznávání jeho struktury 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 [P14]. Tím se však již otevírá jiný okruh

problémů mikrosvěta, 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 [15].

L i t e r a t u r a

- [i] *Lacina, A.*: Deset kroků do mikrosvěta. Čs. čas. fyz. **57**, č. 4 (2007) 243.
- [1] *Lacina, A.*: Postrecenze učebnice „Fyzika pro gymnázia – Fyzika mikrosvěta“. Škol-
ská fyzika **VI**, č. 3 (2000) 72. Dostupné na
<<http://www.physics.muni.cz/kof/recenze/post7.pdf>>
- [2] *Lacina, A.*: Atom – od hypotézy k jistotě. Čs. čas. fyz. 48, č. 5 (1998) 282.
<http://www.physics.muni.cz/kof/clanky/atom.pdf>
- [3] *Stoll, I.*: Fyzika pro gymnázia – Fyzika mikrosvěta. 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] *Lacina, A.*: Částicová struktura látek ab initio II. Matematika – fyzika – informatika,
roč. 20 (2011), č. 7, s. 408.
- [12] *Geiger, H. – Marsden, E.*: On a Diffuse Reflection of the α -particles. Proc. Roy. Soc.
A82 (1909) 495.
Geiger, H., Marsden, E.: The Scattering of α -particles by Matter. Proc. Roy. Soc.
A83 (1910) 492.
- [13] *Rutherford, E.*: The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of
the Atom. Phil. Mag. **21** (1911) 669.
- [14] *Geiger, H. – Marsden, E.*: The Laws of Deflexion of α Particles through Large
Angles. Phil. Mag. 25 (1913) 604.
- [15] *Lacina, A.*: Bohrov model atomu. Pokroky matematiky, fyziky a astronomie 53, č. 2
(2008) 125.
- [16] *Lacina, A.*: Částicová struktura látek ab initio I. Matematika – fyzika – informatika,
roč. 20 (2011), č. 6, s. 350.

P o z n á m k y :

- [P6] Tyto experimenty navržené Ernestem Rutherfordem byly – pod jeho vedením –
systematicky prováděny od roku 1908. α -částice emitované přirozeně radioaktiv-

ním zdrojem byly zkolimovány 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 rozbíhavost 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 zasažený 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 velkoúhlového rozptylu α -částic [12]. V roce 1913 pak experimentálně verifikovali Rutherfordův vzorec pro rozptyl [14] a tím i jeho jaderný model atomu.

- [P7] Toto zdůvodnění, běžné v elementarizovaných výkladech, je podrobnějším rozvedením přímeru, 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 $0,02^\circ$.) Ve své slavné práci *Rozptyl částic α a β v látce a struktura atomu* [13] 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] Je namístě přiznat, že komentář tohoto odstavce je – pro větší stručnost formulací – poněkud zjednodušen. Slovní spojení *experimentálně prokázaný odraz zpět* zde ve skutečnosti neoznačuje rozptyl o 180° , ale – v souladu s možnostmi experimentálního zařízení – „jen“ o 150° [14]. V souvislosti s tím by bylo korektnější dále hovořit o *síle téměř nesouhlasně rovnoběžné se směrem pohybu α -částice, a – částici směřující téměř přesně na střed „kladného závaží“, úzké hyperbolické trajektorii přimykající se těsně k přímce, jež prochází středem „kladného závaží“, ...* Kostrbatost těchto formulací je však příliš vysokou, a v podstatě dosti zbytečnou, daní za jejich naprostou korektnost, která – zvláště pro úvodní výklad – nic fyzikálně nového nepřináší. (Kritičtější čtenář může na příslušnou pasáž pohlížet jako na polokvantitativní odhad.)

- [P10] 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 $q \simeq \frac{A}{2}e$ (A je atomová váha – dnes bychom řekli hmotnostní číslo) [11], jenž – jak se ukázalo později – dává v případě lehkých prvků správné výsledky, zatímco u prvků těžších vede k nadhodnocení q .

- [P11] Elementarizovaný odhad rozměrů atomu ($R_{at.} \approx 10^{-10}$ m) uvádí třeba i [3]; jeho zařazení do širších fyzikálně-historických souvislostí pak lze najít např. v [2].

- [P12] Experimentální potvrzení *Rutherfordova rozptylového vzorce* v celém detekovatelném rozsahu úhlů $\theta \in (0^\circ, 150^\circ)$ [14], bylo současně i potvrzením správnosti představitelů 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.

- [P13] Názor, že náboj atomového jádra se v řadě uspořádané podle rostoucí atomové

váhy ($\sim$ 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).

- [P14] Je zajímavé, že idea atomu jako miniaturního planetárního systému nevznikla až v souvislosti s objevením atomového jádra, ale byla jednou z prvních představ o struktuře atomu, které byly formulovány po objevu elektronu (1897). Již roku 1901 o ní spekoval 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 poukazyval na problémy s objasněním čárových atomových spekter [15, 16] z hlediska této představy, mj. řekl: „*Nejjednodušší by bylo chápat každý atom jako planetární systém sestávající z kladně nabitého centra, kolem nějž 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 této ideje byly statické koncepce komentované v [11]. Rutherfordův objev atomového jádra však tyto modely diskvalifikoval a znovu obrátil pozornost k planetární představě.

(Dokončení ze str. 512)

prvé osobně setkali v Praze. Přítel *Alberta Einsteina*, *Paula Diraca*, *Petera Debye* a *Nielse Bohra*, učitel mnoha významných vědců, ukončil svůj život předčasně na vrcholu tvůrčích sil v Leidenu 25. září 1933 sebevraždou.

Ve své vědecké práci se Paul Ehrenfest zejména zabýval aplikacemi kvantové teorie na rotující tělesa. Známy je tzv. Ehrenfestův paradox – zdánlivý myšlenkový paradox (tvrzení, které spojuje pojmy nebo výroky v běžném slova smyslu si odporující v neočekávaný, překvapivý, ale smysluplný celek) speciální teorie relativity. Ehrenfest jej poprvé uvedl v roce 1909 ve svém článku v *Physikalische Zeitschrift*. Pozastavil se nad vzdálenostmi při otáčení ideálně tuhého disku při rychlostech blížících se rychlosti světla. Podle speciální teorie relativity musí nerotující pozorovatel na kraji disku naměřit kratší obvod než $2\pi r$, kde r je poloměr disku, který kontrakci délek nepodléhá, protože se vůči

pozorovateli pohybuje pouze ve směru na sebe kolmém. Na toto téma se píší vědecké články ještě v současné době. Naposledy v roce 2000 *H. Nikolič* ukázal, že pokud se disk rozdělí na nekonečně mnoho malých kousků, jejichž chování se sleduje za pomoci obecné teorie relativity v jejich vlastních neinerciálních soustavách (kde neplatí Newtonovy pohybové zákony), celý paradox vymizí. Obvod bude skutečně kratší než $2\pi r - a$ Einstein tedy neměl pravdu.

Zjistil také, že Ampérový molekulární proudy nejsou v souladu s klasickou statistickou mechanikou. Počátkem 20. století navrhl difusní model jako statistickou interpretaci druhého zákona termodynamiky, kde entropie uzavřeného systému může pouze vzrůstat. Moderní teorie nerovnovážné termodynamiky vychází z Boltzmannových myšlenek srážek molekul a Ehrenfestovy nelineární statistické teorie.

Bohumil Tesařík