

## Mikrosvět aktivně

ZDEŇKA KOUPILOVÁ

Katedra didaktiky fyziky MFF UK, Praha

### Abstrakt

*Na fyziku mikrosvěta se obvykle nahlíží jako na obtížnou partii, ve které je obtížné až nemožné experimentovat či nějak jinak aktivně zapojit do výuky žáky. Příspěvek popisuje 8 aktivit a experimentů z této oblasti (kvantová, atomová a jaderná fyzika, fyzika elementárních částic), které byly nachystány v rámci tří diplomových prací obhájených v tomto a minulém akademickém roce. Aktivit jsou nachystané tak, aby byla pro učitele minimalizována časová náročnost jejich přípravy. Všechny jsou určeny pro středoškolské žáky, ale polovina z nich má i jednodušší variantu určenou pro poslední ročníky ZŠ.*

### Úvod

Mnoho učitelů vnímá témata ve fyzice mikrosvěta jako obtížná a špatně uchopitelná, zejména pokud je jejich cílem zapojit žáky do výuky aktivně. Pravděpodobně k tomu přispívá i skutečnost, že řada učitelů si sama v těchto tématech není po odborné stránce úplně jistá, ale také to, že sami na základní a střední škole výuku tohoto tématu často ani nezažili. Nepřekvapí nás tedy, že k tématu fyzika mikrosvěta nalezneme jen velmi málo námětů na experimenty či aktivní zapojení žáků. Pro úplnost dodejme, že jednou z příčin je i fakt, že se tomuto tématu nevěnuje na základních a středních školách tolik prostoru jako klasičtější mechanice či optice.

A právě na tuto „mezeru“ v nabídce výukových materiálů cílily diplomové práce Tomáše Popka [1], Marty Nocarové [2] a Jany Legerské [3]. V uvedených pracích naleznete ke všem níže uvedeným aktivitám detailní teoretický i praktický popis experimentů/činnosti žáků včetně obrazové dokumentace, bezpečnostních upozornění, návodů na provedení a metodických pokynů pro učitele, ale také pracovní či záznamové listy pro žáky a odkazy na další zdroje. Zde se omezíme pouze na jejich stručný popis.

Veškeré obrázky a fotografie v toto článku jsou převzaty z uvedených prací.

### Fotoelektrický jev s plechovkami [1]

Jedná se o experiment, který stál u zrodu kvantové mechaniky a jehož vysvětlení, jehož autorem je *Albert Einstein*, vychází z částicové povahy světla. Velmi stručně řečeno: elektrony v látkách mohou absorbovat energii elektromagnetického záření jen po určitých „balíčcích“ (kvantech, dnes hovoříme o fotonech), jejichž velikost je úměrná frekvenci dopadajícího záření. Fotony dopadající na kov jsou pohlcovány elektrony, ale pouze při absorbování fotonu s dostatečnou energií může elektron opustit povrch materiálu. Hodnota této potřebné energie se nazývá výstupní práce  $W_0$  a charakterizuje daný materiál. [4]



Obr 1 Plechovka na stojánku a s hliníkovými lamelami, které detekují, zda je elektricky nabitá

Experiment je navržen tak, že žáci záporně elektricky nabijí hliníkovou plechovku<sup>1</sup> (obr. 1) a pak na ní postupně svítí různými zdroji záření – od běžné žárovky s významnou složkou viditelného světla až po germicidní lampičku, která vyzařuje významně i v UVC oblasti. Při svícení na záporně nabitou plechovku lze pozorovat, že při použití UVC lampičky se plechovka vybíjí pozorovatelně rychleji než při použití zdrojů záření bez UVC složky. V další části experimentu žáci zkoumají, že k urychlení vybíjení plechovky nedojde, pokud

---

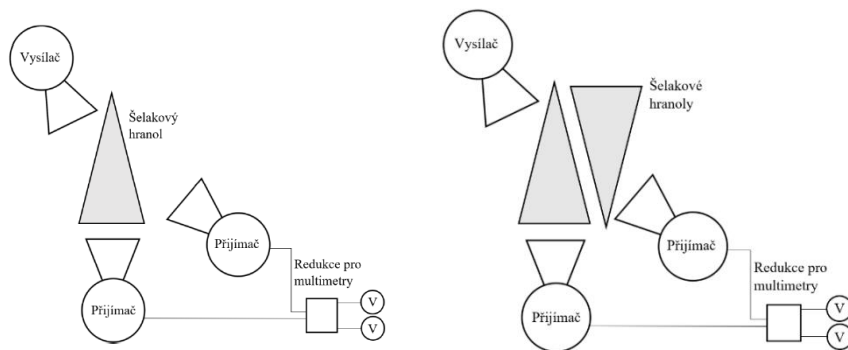
<sup>1</sup> Vhodné jsou plechovky od nápojů, ze kterých je na místě, kam budou žáci svítit, odstraněna povrchová úprava (lak, barva). Protože dochází k poměrně rychlé oxidaci, je nutné před každým experimentem plechovku na tomto místě ještě „očistit“ smirkovým papírem.

svítíme na plechovku přes sklo, které většinu UV záření pohltí. V případě kladně nabitě plechovky k urychlení vypíjení nedochází (na povrchu plechovky je elektronů nedostatek, případné uvolnění elektronu by naopak nabilo plechovku ještě kladněji).

Hliník má výstupní práci rovnu přibližně 4,1-4,2 eV (záleží na povrchové konfiguraci atomů [5]). Fotony s touto energií odpovídají záření o vlnové délce přibližně 300 nm, jedná se o lidským okem nezachytitelné blízké ultrafialové záření<sup>2</sup>. Pro porovnání: výstupní práce železa 4,6-4,9 eV a fotoelektrický jev je s uvedenými zdroji záření nepozorovatelný.

### Tunelový jev s mikrovlnným zářením [1]

Ukázka tunelového jevu s použitím mikrovlnné soupravy využívá totálního odrazu vlnění na šelakovém hranolu. [4] Kromě odraženého signálu je měřen i prošlý signál pomocí druhého přijímače, který je velmi malý. Následně žáci přiblíží k odrazné stěně hranolu druhý hranol (viz nákres na obr. 2), tak aby vznikla úzká vzduchová mezera. Když je šířka vzduchové mezery srovnatelná s vlnovou délkou použitých mikrovln (zde cca 3 cm), dochází ke značnému poklesu odraženého signálu, a naopak se zesílí signál prošlý. Dochází tak k tunelovému jevu.



Obr. 2 Schéma demonstrace tunelového jevu s mikrovlnnou soupravou (bez znázorněného zdroje napětí)

<sup>2</sup> Dílčí dělení blízkého UV spektra: UVA 320-400 nm, UVB 280-320 nm, UVC 200-280 nm.

Klasická teorie elektromagnetického pole říká, že na rozhraní dvou izotropních optických prostředí musí být určité složky elektrického a magnetického pole spojité. Z tohoto faktu můžeme odvodit, že pokud na rozhraní dopadá rovinná harmonická vlna, tak i v případě, kdy dochází k totálnímu odrazu, musí nějaké pole pronikat i do druhého prostředí (nemůže okamžitě klesnout na nulu). Jedná se o tzv. evanescentní vlnu, jejíž amplituda se vzdáleností od rozhraní velmi rychle klesá a zároveň směrem od rozhraní nepřenáší žádnou energii. Pokud ale do této oblasti vložíme materiál s indexem lomu, který je vyšší než index lomu prostředí mezi hranoly (vzduch), můžeme evanescentní vlnu zachytit. Dopadající vlnění se opět rozdělí na dvě vlny – odraženou a prošlou.

Pokud budeme tedy elektromagnetické pole popisovat vlnově, nedostáváme nic překvapivého. Jiný popis ale nabízí kvantová mechanika, kdy na elektromagnetické záření nahlížíme jako na tok fotonů. Totální odraz znamená, že fotony nemají dostatečnou energii, aby mohly pronikat do druhého prostředí – do vzduchu, resp. překonaly vzduchovou mezeru mezi hranoly. Přesto pozorujeme, že část fotonů tuto mezeru překoná. Tomuto jevu se říká tunelový jev.

### **Akustická analogie rastrovacího tunelového mikroskopu [1, 6]**

I když je princip funkce rastrovacího tunelového mikroskopu STM<sup>3</sup> základní myšlenkou této aktivity, ve skutečnosti spíše uvedená aktivita žákům představuje myšlenku, že v mikrosvětě máme k dispozici pouze nepřímá měření a na základě jejich vyhodnocení si vytváříme představu, jak věci v mikrosvětě „vypadají“ či „fungují“.

V této aktivitě jsou atomy na povrchu zkoumaného vzorku modelovány pravidelně rozmístěnými malými plastovými lahvičkami. Žáci využijí dva „chytré“ telefony (jeden jako vysílač zvuku, druhý jako přijímač), kterými pohybují nad lahvičkami, a proměřují intenzitu zvuku o frekvenci dané rezonanční frekvencí lahviček. Nad lahvičkou dochází k rezonanci, tj. zesílení zvu-

---

<sup>3</sup> Rastrovací tunelový mikroskop (STM = *scanning tunneling microscope*) byl vynalezen roku 1981 a používá se při zkoumání struktur o velikosti srovnatelné s velikostí atomů. Jeho základní částí je sonda ve tvaru velmi ostré jehly, jejíž pohyb je řízen pomocí velmi přesných piezokrystalů. Mezi jehlu a vodivý vzorek je přivedeno elektrické napětí, které ale není dostatečné, aby zde proběhl výboj. Přesto díky tunelovému jevu prochází obvodem proud – některé elektrony dokážou překonat onu vzduchovou mezeru. Velikost tohoto proudu velmi silně závisí na vzdálenosti sondy od vzorku, tj. malé změny vzdálenosti způsobují velké změny proudu, a tak nám měření proudu umožňuje „skenovat povrch vzorku“ s velkou přesností. Ve skutečnosti ale zjišťujeme spíše hustotu rozložení elektronů a z ní odvozujeme polohu jednotlivých atomů na povrchu vzorku.

ku, a tím je možné její polohu detekovat. Je-li lahvička z části naplněná vodou, změníme tím jejich rezonanční frekvenci a nedojde nad ní k tak velkému zesílení zvuku. Takto můžeme modelovat odlišné atomy na povrchu vzorku.

Žáci při této aktivitě nejprve skenují řadu 4-5 lahviček, ale poté také analyzují předložený sken dvoudimenzionální struktury, případně se snaží určit, které lahvičky obsahují vodu (obr. 3).



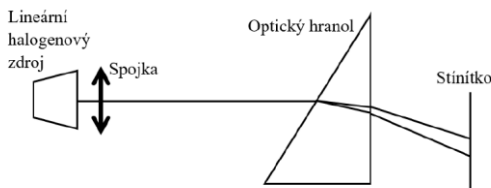
Obr. 3 Vlevo – akustický model STM s pěti lahvičkami (atomy), telefon s viditelnou obrazovkou je přijímač, druhý telefon (skrytý za prvním) je vysílač, mikrofon přijímače a reproduktor vysílače se nacházejí v těsné blízkosti kelímků, vpravo – matice lahviček (atomů) 4×4 s pěnovou šablonou

### Záření černého tělesa [1, 7]

V tomto případě se jedná o demonstrační experiment, který názorně ukazuje vyzařovací zákony absolutně černého tělesa. Světlo z lineárního halogenového zářiče<sup>4</sup> se láme přes optický hranol, čímž se vlivem disperze světla zobrazí spojité světelné spektrum (viz nákres na obr. 4). Snížením napětí na zářiči (pomocí stmívače) se sníží teplota vlákna, a tím se jednak sníží celková intenzita záření (Stefanův-Boltzmannův zákon), ale díky posunu maxima vyzařované energie směrem k větším vlnovým délkám (Wienův posunovací zákon) se původně bílé světlo zářiče změní na světlo oranžové a ve spektru pozorujeme úplné vymizení fialových a modrých odstínů. Lidské oko je citlivější na zelenou barvu, a proto se se nám jeví intenzivnější, než ve skutečnosti je, ale je dobré si uvědomit, že na kvalitativní výsledek pokusu to nemá významný vliv.

---

<sup>4</sup>Vhodný je např. halogenový reflektor, který lze zakoupit v hobby marketech, který je uvnitř natřený černou žáruvzdornou barvou, aby se omezilo odrážení světla.



Obr. 4 Schéma demonstrace zákonů popisujících záření černého tělesa

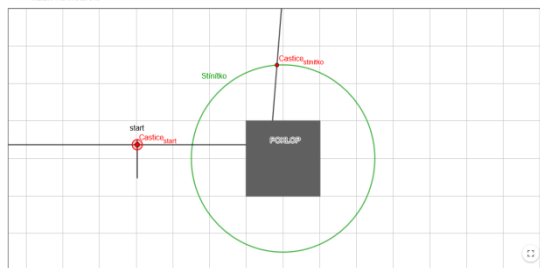
### Rutherfordův rozptyl [2, 8]

Rutherfordovy experimenty hrály významnou roli ve vývoji našeho poznání atomu. Kromě zajímavého příběhu poskytují i příležitost seznámit studenty s myšlenkou nepřímého zkoumání atomu a jiných podobně velkých či menších struktur.



Rutherford - uhodni 1

Autor: marfincarcia



Obr. 5. Rampa a terčíky vytištěné na 3D tiskárně pro experiment Rutherfordův (nahore), aplikace v GeoGebře „simulující“ stejný experiment (dole)

Základ aktivity tvoří terčík skrytý pod deskou. Úkolem žáků je zjistit o terčíku co nejvíce (jeho polohu, velikost, odhadnout tvar, ...) jen pomocí kuliček, které pouští z připravené „rampy“. Jedná se tedy o model ostřelování jednoho atomu zlata alfa částicí. Vzhledem k mnoha vlivům, které na kuličku

působí (valivý odpor, nerovnosti podložky, nepřesně stanovená výška spuštění, ...) je vhodné tento pokus využít k otevření diskuze, co lze tímto způsobem zjistit, jak se náš model liší od skutečného Rutherfordova experimentu a jak obtížné je na základě naměřených údajů zjistit, co se skrývá pod deskou, resp. jaká je struktura atomu.

Kromě speciální sady rampy a terčů, kterou lze vytisknout na 3D tiskárně, je v aktivitě popsána i realizace pomocí dětských hracích kostek a kusu kartónu, ale také dva připravené aplety v GeoGebře, na kterých si mohou žáci svůj odhad vyzkoušet.

### Kvarky [2, 9]

Pokud bychom chtěli žáky seznámit s teorií, která tvoří základ kvarkového modelu složení hadronů, vyžadovalo by to mnoho let intenzivního studia. Místo toho žáci dostanou v této aktivitě speciální skládačku, která má uvedená matematická pravidla skrytá ve tvarech svých dílků. Úkolem žáků je skládat dva typy částic – mezony a baryony tak, aby dodržely pravidla skládání a na základě svých výsledků vyvodit vlastnosti, které tyto částice mají. Skládačka umožňuje odhalit celočíselný elektrický náboj a „bezbarvosť“ reálných částic. Poté mohou hledat, jak byly částice, které se jim podařilo složit, pojmenovány, případně hledat možnosti, jak získané částice uspořádat.



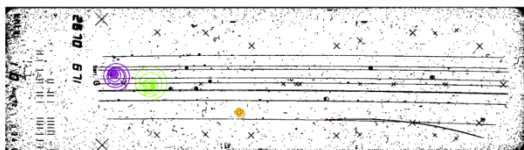
Obr. 6 Plastová skládačka kvarků (3D tisk, vlevo), žáci pracující s papírovou verzí skládačky (vpravo)

Podobně jako v předchozí aktivitě není cílem žáky seznámit s kvarkovou teorií jako takovou, ale spíše jim představit myšlenku, že z teorie/modelu mohou odvozovat další závěry, které jsou teprve experimentálně ověřitelné.

### Bublinová komora [2]

Tato aktivita se skládá ze dvou částí. V první části žáci pracují s připravenými texty a pomocí tzv. skládkového učení se postupně seznamují (a navzájem seznamují) jak s fungováním bublinové komory, vlastnostmi pozorovaných částic, tak si také připomínají dříve probírané fyzikální zákony, které budou v další části potřebovat.

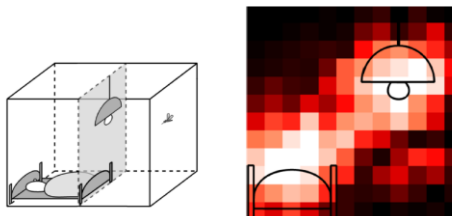
V druhé části žáci pracují ve skupinách s pracovním listem, který obsahuje skutečné snímky z bublinové komory, na kterých hledají vybrané jevy nebo se snaží vysvětlit pozorované stopy.



Obr. 7 Ukázka úkolu z pracovní listu k aktivitě Bublinová komora

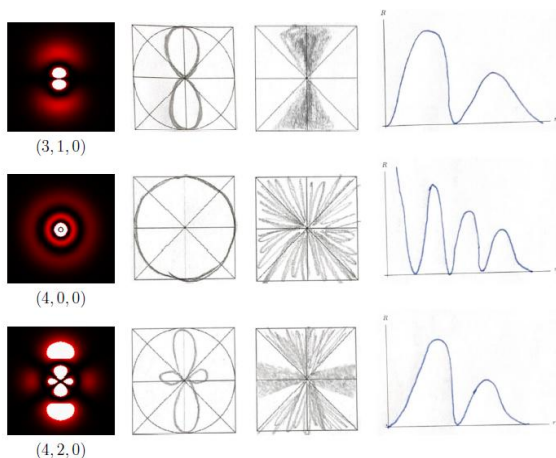
### Orbitály atomu vodíku [3]

V tomto případě se jedná se o plán dvou vyučovacích hodin, který vychází ze staršího materiálu[10] a je určen žákům na střední škole. V první části je pomocí rozboru pohybu oscilátoru a mouchy v místnosti žákům představena hustota pravděpodobnosti nalezení. V druhé části žáci pracují různými druhy grafů tak, aby si vytvořili představu, jak vypadá hustota pravděpodobnosti nalezení elektronu v atomu vodíku pro konkrétní stacionární stavy.



Obr. 8 Obrázky využité k zavedení pojmu hustota pravděpodobnosti nalezení





Obr. 9 Ukázka úkolu s žákovským řešením

## Závěr

Výše prezentované výsledky uvedených tří diplomových prací, ale i více než desítka větších či menších projektů a návrhů na jednotlivé aktivity mě přesvědčuje, že navzdory obecnému názoru nastíněnému v úvodu tohoto příspěvku, je možné fyziku mikrosvěta učit zajímavě, přístupně i mladším žákům, ale hlavně s jejich aktivním zapojením. Pro učitele, kteří by se chtěli dozvědět více, ale hlavně si vše vyzkoušet i vlastníma rukama, je připraven kurz v rámci DVPP [11], který poprvé bude otevřen na podzim roku 2023.

## Literatura

- [1] Poppek T.: *Sady pro demonstrační experimenty ve středoškolské výuce fyziky mikrosvěta*. Diplomová práce (ved. práce Z. Koupilová), MFF UK 2021. Dostupné online [cit. 7. 9. 2022]  
<https://dspace.cuni.cz/handle/20.500.11956/127722>
- [2] Nocarová M.: *Aktivity z částicové fyziky na střední škole*. Diplomová práce (ved. práce Z. Koupilová), MFF UK 2021. Dostupné online [cit. 7. 9. 2022]  
<https://dspace.cuni.cz/handle/20.500.11956/174006>

- [3] Legerská J.: *Atom vodíku na vysokoškolské a středoškolské úrovni*. Diplomová práce (ved. práce Z. Koupilová), MFF UK 2021. Dostupné online [cit. 7. 9. 2022] <https://dspace.cuni.cz/handle/20.500.11956/173940>
- [4] Reichl J., Všetická M.: *Encyklopedie fyziky* [online]. [Cit. 22. 10. 2021]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/>
- [5] *Workfunction*. Wikipedie. [Cit. 16. 11. 2021]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Work\\_function](https://en.wikipedia.org/wiki/Work_function)
- [6] EULER, Manfred. *Getting in touch with the nanoworld: Hands-on experiments and models to visualize nano scale structures*[online]. Science and technology Education for the 21st Century, 2014. DOI: 10.13140/2.1.1728.2881.
- [7] Nadace České spořitelny, 2016, Doc. RNDr. Zdeněk Bochníček, Dr., PřF MU Brno, Youtube video. [Cit. 22. 10. 2020]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=hzqR81UB6pY&list=PLNn4rgcKoGfp9VX-55cWubyFqovsRyv05&index=6>
- [8] S'cool LAB. *Scattering Experiment*. [Cit. 22. 10. 2020]. Dostupné z: <https://scoollab.web.cern.ch/scattering-experiment>
- [9] E. Gettrust, *The Quark Puzzle: A Novel Approach to Visualizing the Color Symmetries of Quarks*, The Physics Teacher 48 (2010) no. 5, 312–315, <https://doi.org/10.1119/1.3393062>.
- [10] Koupilová Z.: *Projekt Orbitaly*. [Cit. 22. 10. 2020]. Dostupné z: <http://kdf.mff.cuni.cz/~koupilova/orbitals/?lang=CZ>
- [11] *Kurz DVPP: Fyzika mikrosvětá – základy*.