



**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ
FAKULTA**
Univerzita Karlova

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Tomáš Popek

**Sady pro demonstrační experimenty ve středoškolské výuce
fyziky mikrosvěta**

Katedra didaktiky fyziky

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Koupilová Zdeňka, Ph.D.

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Učitelství fyziky – Učitelství matematiky

Praha 2021

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat vedoucí této diplomové práce RNDr. Zdeňce Koupilové, Ph.D. za mnoho cenných rad při vytváření experimentálních sad, metodických a pracovních listů, za komentáře, poznámky a dohled nad vypracováním této práce.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

V Praze dne 17. 5. 2021

Tomáš Popek

Název práce: Sady pro demonstrační experimenty ve středoškolské výuce fyziky mikrosvěta

Autor: Tomáš Popěk

Katedra / Ústav: Katedra didaktiky fyziky

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Zdeňka Koupilová, Ph.D., Katedra didaktiky fyziky

Abstrakt: Zaměřením této diplomové práce bylo vyhledání a zhodnocení informačních zdrojů dostupných pro učitele v kontextu vytváření či provádění demonstračních a žákovských experimentů z fyziky mikrosvěta na střední škole. Dalším cílem práce bylo vytvoření čtyř sad pomůcek pro experimenty z různých oblastí fyziky mikrosvěta probíraných na střední škole. Tyto sady obsahují pokyny pro učitele a pracovní listy pro žáky. Dalším cílem bylo vytvořit sady tak, aby byly přenosné, což splňují všechny čtyři. Součástí této práce je popis vytvořených experimentálních sad, pracovní listy pro žáky a texty pro učitele. Experimentální sady budou uloženy v prostorách Katedry didaktiky fyziky a budou dostupné učitelům k vypůjčení pro účely výuky.

Klíčová slova: demonstrační experimenty, fyzika mikrosvěta, výuka fyziky

Title: Experimental sets for teaching physics of microworld on secondary school level

Author: Tomáš Popěk

Department: Department of Physics Education

Supervisor: RNDr. Zdeňka Koupilová, Ph.D., Department of Physics Education

Abstract: The focus of this thesis was to find and evaluate the information resources available to teachers, in the context of creating or conducting demonstrational and student experiments in the Physics of the Microworld at high school. Another goal of the thesis was the creation of four sets of aids for experiments from various areas of microworld physics taught at the high school level. These sets contain instructions for teachers and worksheets for pupils. Another goal was to make the sets portable, which all four met. Part of this work is a description of the created experimental sets, worksheets for pupils and texts for teachers. The experimental sets will be stored on the premises of the Department of Physics Education and will be available for loan to teachers for teaching purposes.

Keywords: demonstrational experiments, microworld physics, teaching physics

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Rešerše.....	2
3. Jednotlivé experimenty	11
3.1. Akustická analogie STM	12
3.2. Fotoelektrický jev s plechovkami.....	14
3.3. Wienův posunovací zákon.....	16
3.4. Tunelový jev.....	18
4. Zhodnocení experimentů středoškolskými učiteli fyziky	20
5. Závěr.....	23
6. Seznam použité literatury.....	24
7. Seznam tabulek	31
8. Přílohy	32

1. Úvod

Prvním cílem této práce bylo vyhledání a zhodnocení vhodných informačních zdrojů popisujících demonstrační experimenty z oblasti fyziky mikrosvěta se zaměřením na kvantovou mechaniku, které jsou dostupné pro středoškolského učitele fyziky.

Hlavním cílem této diplomové práce bylo vytvoření čtyř experimentálních sad použitelných ve výuce fyziky mikrosvěta se zaměřením na kvantovou mechaniku na střední škole. Pokud to povaha obsažených pomůcek dovolí, pak by tyto sady měly být přenosné a po dohodě s vedoucími Katedry didaktiky fyziky MFF UK budou učitelům k dispozici pro zapůjčení. Přínos této práce pro středoškolského fyzikáře je v tom, že si klade za cíl zpřístupnění vybraných experimentů z kvantové mechaniky pro výuku na středních školách.

Téma této diplomové práce jsem si zvolil z mnoha důvodů. Prvním z důvodů je moje dosavadní praxe při výuce fyziky, kdy žáci projeví větší zájem o téma, pokud bylo prezentováno s demonstračními experimenty. Dalším důvodem je má osobní zkušenost z dob studia na střední škole, kde byla kvantová fyzika vyučována bez užití demonstračních experimentů. Na výběru tématu se dále podílela i má obliba kvantové mechaniky.

Tato práce se sestává z pěti kapitol, seznamu použité literatury, seznamu tabulek a příloh. V první (této) kapitole jsou popsány cíle samotné práce, motivace k jejímu vytvoření a její struktura. Druhá kapitola popisuje cíle, výsledky a závěr rešerše. Třetí kapitola je stručným rozbohem jednotlivých experimentálních sad a příslušných doplňujících materiálů. Čtvrtá kapitola popisuje zhodnocení experimentálních sad a doplňujících materiálů zkušenými středoškolskými učiteli fyziky. V závěrečné kapitole je shrnuto vypracování této práce a diskuse dosažení cílů stanovených v úvodní kapitole. Přílohy obsahují textové materiály k vytvořeným experimentálním sadám.

2. Rešerše

Cíle této rešerše byly tři: najít vhodné zdroje, které se zabývají experimenty použitelnými na střední škole v oblasti fyziky mikrosvětla, s důrazem na základní principy kvantové fyziky, posoudit množství, dostupnost a aplikovatelnost těchto zdrojů z hlediska běžného středoškolského učitele fyziky a zhodnotit, na kolik se případné zdroje zabývaly možností vlastního experimentování žáků a následným (sebe)hodnocením jejich práce. Druhý cíl má svá opodstatnění, jelikož některé zdroje jsou svojí dostupností omezené a jsou přístupné jen pro vědecké organizace či univerzity (např. některé články z *European Journal of Physics* nebo *American Journal of Physics*). I tyto zdroje zde jsou uvedeny, jelikož tento podrobnější soupis lépe ilustruje množství a různorodost zdrojů, na které by učitel při vyhledávání mohl narazit.

Hledání vhodných zdrojů probíhalo s použitím klíčových slov jako např. quantum demonstration experiment, quantum hands-on experiments, lecture quantum demonstration, didactic quantum experiment, quantum project apod., a při hledání česky psaných zdrojů klíčová slova: experiment z kvantové fyziky, demonstrační pokusy z kvantové fyziky, praktické pokusy z kvantové fyziky, studentské pokusy z kvantové fyziky apod. Byly prohledávány internetové časopisy, knihy, diplomové práce, volný net a videa na YouTube.

Z hlediska již vydaných knižních zdrojů bylo objeveno velmi málo zdrojů, které se zabývají experimenty vhodnými nejen k demonstraci učitelem, ale umožňující i samostatnou žákovskou práci. Jedním z nich je *Exploring quantum physics through hands-on projects* od Davida Prutchiho [1]. Tato kniha není zatím přeložena do češtiny. Svým rozsahem pokrývá mnoho aktivit a několik experimentů, pro mnohé z nich je však zapotřebí nákladného vybavení, které je těžko dostupné a běžný středoškolský učitel se s ním neseťká. Kniha není v Česku rozšířená (čemuž napovídá chybějící překlad do češtiny) a jako zdroj má pro českého středoškolského učitele fyziky omezenou použitelnost.

Velmi rozšířená středoškolská učebnice *Fyzika mikrosvětla* od Ivana Štolla [2] nabízí překvapivě pouze dva vhodné demonstrační experimenty z oblasti kvantové fyziky, a to Millikanův experiment, který je uveden se schématem i laboratorním uspořádáním (fotografií přenosné laboratorní sestavy), a pozorování čárových spekter atomů (v knize uvedeno jako laboratorní cvičení 1). Pozorování spekter atomů není na

pomůcky náročné, jsou zapotřebí pouze výbojové trubice s plyny, školní spektrometr, Ruhmkorffův transformátor, zdroj nízkého stejnosměrného napětí (cca 8 V), vodiče a zdroj světla k osvětlení stupnice spektrometru. Pro druhou část experimentu potřebujeme běžnou žárovku, barevné filtry, kyvety a vodní roztoky různých chemických sloučenin, např. modré skalice. Většina těchto pomůcek by měla být součástí vybavení kabinetu/laboratoře fyziky. Toto laboratorní cvičení je opatřeno úvodní teorií, postupem práce a závěrečnou diskusí. Oproti tomu Millikanův experiment není takto rozpracován (není součástí laboratorního cvičení) a přenosná školní sestava Millikanova přístroje není běžnou školní pomůckou, jelikož je velmi nákladná. Ostatní experimenty objasňující principy kvantové mechaniky (např. fotoelektrický jev s fotonkou) jsou pouze vysvětleny a opatřeny schématem pokusu či obrázkem očekávaného výsledku. Kniha v těchto případech učitelé nenabízí fotografii vhodného demonstračního uspořádání či analogii vhodnou k demonstraci.

Sbírka *Pokusy z fyziky na střední škole 4* od Emanuela Svobody a kol. [3] obsahuje z oblasti kvantové fyziky pokusy zaměřující se na čárová spektra emisní a absorpční, na fotoelektrický jev a Franckův-Hertzův experiment. Emisním čárovým spektrům jsou věnovány tři navzájem podobné experimenty, a podobně jako v knize *Fyzika mikrosvěta* [2] by neměly být náročné na pomůcky, snad kromě rtuťové výbojky s tlumivkou, potřebné v třetím pokusu. Absorpčním čárovým spektrům se věnují pokusy dva. První z pokusů je velmi podobný druhé části pokusu popsáném v [2] a druhý pokus se zaměřuje na Fraunhoferovy čáry ve spektru slunečního záření. Tyto experimenty by měly být se základní výbavou kabinetu fyziky alespoň ve zjednodušené podobě proveditelné. Pro provedení Franck-Hertzova experimentu je však zapotřebí příslušné školní sestavy. Fotoelektrický jev je přiblížen v šesti jednoduchých experimentech. Jeden je popsán v kapitole Elektromagnetické záření a jeho energie, nazývá se O 58 Ultrafialové záření a vnější fotoelektrický jev. K jeho provedení je třeba několik pomůcek, z nichž např. rtuťová výbojka či fotonka na stojanu nejsou běžné. Zbylých pět experimentů se nacházejí v kapitole Kvantová povaha elektromagnetického záření. Dva se věnují vnějšímu fotoelektrickému jevu. K prvnímu je zapotřebí elektroskop, zinková destička, zdroj UVB nebo UVC záření (např. horské slunce) a pomůcky k demonstraci elektrostatiky (konkrétně pro ze elektrování tyče). Tyto pomůcky kromě zmíněných UV zdrojů by měly být součástí běžné výbavy školy. K druhému experimentu je již zapotřebí speciální fotonka a měřič Q , U , I , který je schopen

měřit proud v řádech 10^{-7} A až 10^{-8} A. Tyto pomůcky již běžné nejsou. Další dva pokusy jsou věnovány vnitřnímu fotoelektrickému jevu, kde se ve velmi jednoduchém zapojení demonstruje funkce fotorezistoru a fotodiody. Poslední experiment demonstruje s užitím fotodiody hradlový fotoelektrický jev (fotovoltaický jev). Poslední tři experimenty jsou na pomůcky a provedení nenáročné, svou jednoduchostí by se daly všechny provést i v rámci jedné vyučovací hodiny nebo jedné hodiny laboratorních cvičení z fyziky, kdy by experimenty prováděli sami žáci. Popis experimentů vždy obsahuje seznam potřebných pomůcek, popis přípravy a provedení experimentu, závěr a případné poznámky, schéma či fotografii uspořádání pokusu.

Kniha *Quantum mechanics: theory and experiment* od Marka Becka [4] z hlediště experimentů nabízí pět komplexních laboratorních cvičení (Spontaneous Parametric Downconversion, „Proof“ of the Existence of Photons, Single-Photon Interference, Quantum State Measurement, Testing Local Realism). Každé cvičení je dopodrobna popsáno, obsahuje doplňující otázky a reference na knihy a články popisující dané experimenty. Tyto experimenty jsou zaměřené svou odborností na vysokoškolské studenty a jsou pro demonstrační využití na střední škole nevhodné, a to i pro svou finanční náročnost pomůcek (např. čítače jednotlivých fotonů). Kniha nemá český překlad.

Kniha *A guide to experiments in quantum optics* od Hanse-A. Bachora a Timothyho C. Ralpha [5] poskytuje teoretický základ klasických a kvantových modelů světla, popis principů optických součástek a popisuje různé experimenty kvantové optiky. Kniha je primárně zaměřena na vysokoškolsky vzdělané čtenáře, nicméně základní principy kvantové mechaniky (vlnově-korpuskulární dualismus, nerozlišitelnost částic), které lze do jisté míry prezentovat i na střední škole, jsou s příslušnými experimenty popsány ve dvanácté kapitole, ovšem bez fotografií experimentálních uspořádání. Popsané experimenty jsou navíc pro středoškolské žáky příliš náročné na pochopení a jsou náročné i na pomůcky. I pro absenci českého překladu není kniha příliš vhodná jako zdroj inspirace pro středoškolského učitele fyziky.

Nově vydaná kniha (podzim 2020) *Optics Experiments and Demonstrations for Student Laboratories* od Stephena G. Lipsona [6] se svým obsahem zaměřuje na experimenty pro vysokoškolské studenty. Desátá kapitola s názvem Basic experiments in quantum optics popisuje čtyři pokusy, z nichž tři jsou vhodné i pro středoškolské

žáky (pokud vezmeme v úvahu jistá zjednodušení). Prvním experimentem je Measuring the Planck constant, kdy s pomocí polovodičového laseru s proměnným zdrojem napětí je hledáno minimální napětí, při kterém laser začne svítit, což lze pozorovat okem v zatemněné místnosti či pomocí detektoru. Ze znalosti hodnoty tohoto napětí a vlnové délky emitovaného světla je možno určit Planckovu konstantu. V obvodu experimentu je k laseru připojen i ampérmetr, kterým lze pozorovat nárůst elektrického proudu při první emisi světla. V popisu pokusu chybí fotografie či schéma uspořádání pokusu. Tento pokus je principiálně velmi podobný pokusu s LED diodami popsaném v [22]. Druhým experimentem je Laser modes, ve kterém je demonstrován přechod mezi spontánní a stimulovanou emisí. Ve spektru laseru (podobném jako v předchozím experimentu), získaném pomocí difrakčního spektrometru, je při změně napětí pozorováno zviditelnění úzké spektrální čáry laseru. Opět zde chybí schéma uspořádání experimentu a jsou zde uvedeny pouze fotografie výsledků. Třetím experimentem je The spectrum of black-body radiation. V něm pomocí hranolového spektrometru a CCD kamery je proměřováno spektrum slunečního záření. Autor popisuje kalibraci sestavy pomocí klasické žárovky a různých spektrálních filtrů. Dále očekával maximální intenzitu v oblasti okolo 550 nm, ale naměřil 600 nm. Tento rozdíl přisuzuje tomu, že fotony nižších vlnových délek odpovídají větším kvantům energie a jejich počet (pro danou intenzitu) je tedy nižší. Autor dále navrhuje, že tento experiment vyžaduje dodatečné úpravy pro zpřesnění měření. Opět zde chybí schéma pokusu a jsou uvedeny pouze fotografie výsledků. Pro nedostatek schémat/fotografií experimentálního uspořádání a absenci českého překladu není tento zdroj vhodný.

Přesuňme se nyní od knih ke článkům. Velmi málo článků se zabývalo testováním žákovského pochopení demonstrovaných principů a většina článků se zaměřovala pouze na samotný popis experimentů. Do první kategorie lze zařadit článek *Using frustrated internal reflection as an analogue to quantum tunneling* napsaný Aernoutem Van Rossumem a Edem Van Den Bergem [7]. Zde se objevují rozhovory se studenty, kterým byl tento pokus demonstrován společně s PhET apiletem Quantum Tunneling and Wave Packets [8]. V tu dobu byl však demonstrován s použitím mikrovlnného zdroje a studenti si jen s potížemi vytvořili spojitost mezi kvantovým tunelováním a mikrovlnnou demonstrací. Ukázalo se, že 40–50 % žáků (ze 112 žáků v předuniverzitních vědeckých seminářích z 5 středních škol, které z popisu v článku částečně odpovídají maturitním seminářům z fyziky v ČR) si ponechalo nebo získalo

miskoncepci ohledně energií částic, které prošly potenciálovou bariérou. Jednou z těchto miskoncepcí bylo, že částice ztratí část své energie, aby prošla bariérou. Později byl tento mikrovlnný model vylepšen a byl demonstrován s užitím laserů svítících ve viditelném spektru.

Podobný experiment je popsán např. i v článku *A visual classroom demonstration of frustrated total internal reflection as an analogue to optical tunnelling* od Rabiyy Salmana, Shamy Rashida a Muhammada Sabieha Anwara [9] v *European Journal of Physics* a zmíněné knize od Davida Prutchiho, kterou článek cituje. Zde však zpětná reflexe studentů chybí.

Článek *Single photon quantum erasing: a demonstration experiment* od T. L. Dimitrovové a A. Weise [10] představuje další experiment a demonstrační sestavu. Tento experiment je směřován na vysokoškolské studenty. V textu je uvedena potřebná znalost studentů a skutečností, na které je třeba studenty během experimentu upozornit. Avšak ani ve starším článku od jmenovaných autorů s názvem *Lecture demonstrations of interference and quantum erasing with single photons* [11] není zmíněna zpětná vazba studentů či výsledky podobného testování jako v případě článku od A. V. Rossuma a Eda Van Der Berga.

Článek *Entangled γ -photons—classical laboratory exercise with modern detectors* od Jakuba Hetfleíše, Jindřicha Lněničky a Jana Šlégra [12] popisuje alternativu pro detektory beta a gama radiace s využitím moderních polovodičů. Zmiňují možnost demonstrace těchto detektorů a provázanosti fotonů pro studenty bakalářských programů vysokých škol, avšak opět bez dalších průzkumů studentského porozumění.

Na zácích testovanou demonstrační aktivitu popisuje María José Carreño a kol. [13] v článku *An instrument-free demonstration of quantum key distribution for high-school students*, publikovaný v *Physics Education*. Tato aktivita přibližuje koncepty kvantového provázání, kvantování spinu, kvantových stavů apod. Činnosti se aktivně účastní čtyři žáci a učitel/instruktor. Následně je ukázán rozdíl mezi neprovázanými a provázanými částicemi. Jedná se o „hranou“ verzi Bellova testu. Autory je doporučeno, aby po demonstraci následovalo kvalitativní vysvětlení vztahu provázanosti a šifrování. Tato nízkonákladová aktivita byla otestována v devátých ročnících dvou čilských státních středních škol. Výsledky písemného testování žáků (před a po aktivitě) ukázaly pozitivní vliv aktivity na žákovské porozumění provázanosti, kvantové

kryptografie a jednoduchých kvantových konceptů. Dále testy ukázaly zvýšení zájmu žáků o fyziku a jejich uznání role fyzikálního výzkumu ve světě technologií a běžném životě. Autoři dále v práci slibují pokračování v analýze žakovských hodnocení. Tato aktivita je levná a snadno proveditelná, navíc jsou žáci její aktivní součástí. Problém realizace této aktivity v kontextu českého středoškolského učitele fyziky je nejen angličtina, ale i nesnadná dohledatelnost článku.

Článek *A didactic proposal about Rutherford backscattering spectrometry with theoretic, experimental, simulation and application activities* od Fredericka Corniho a Marisy Micheliniové [14] publikovaný v *European Journal of Physics* je zmíněn navzdory tomu, že se věnuje spíše částicové fyzice. Popisuje aktivity a experimenty vhodné pro středoškolské žáky a vysokoškolské studenty, v nichž jsou prezentovány základní principy potřebné pro porozumění RBS (Rutherford backscattering spectrometry). Škálu experimentů a aktivit prochází od jednoduchých a levných po složité a náročnější na pomůcky. Článek zároveň popisuje možné programy vzdělávání středoškolských učitelů, studentů bakalářských programů vysokých škol a program pro středoškolské žáky. V programu pro středoškolské žáky jsou vysvětlovány pojmy jako pružná srážka atomových jader, kinematický faktor, účinný průřez, rozptyl na tuhé kouli apod., a na závěr se žáci učí interpretovat spektra RBS se simulačním softwarem. Tyto aktivity byly vytvořeny na základě modulů, které autoři použili v rámci výzkumu na letních školách pro středoškolské učitele a pro nadané žáky. Tento text je ale publikován v časopise s placeným přístupem, což jej fakticky znepřístupňuje běžnému středoškolskému učiteli.

Internetové stránky physlab.org [15] vytvořených Lahore University of Management Sciences (LUMS) v Pakistánu nabízejí nápady pro převážně vysokoškolské experimenty, ale některé z nich by mohly být použitelné i na střední škole (např. již zmíněná analogie tunelového jevu). Popisy některých experimentů jsou doplněny krátkými videy. Nejsou zde však žádné návody či podrobné popisy experimentů, z nichž pro mnohé je třeba nákladné specializované vybavení. Autoři stránek z LUMS si zjevně uvědomují roli experimentů ve výuce, ale míra použitelnosti materiálů nabízených na stránce pro českého středoškolského učitele je minimální.

Článek *Employing real experiments and modern viewpoints in the teaching of modern physics* publikovaný na *The Physics Teacher* od Muhammada Sabieha

Anwara [16] popisuje integraci demonstračních experimentů do hodin výuky moderní fyziky a vliv těchto experimentů na výsledky studentů v roce 2013 na univerzitě LUMS. Popsané experimenty jsou vysokoškolské úrovně. I přes nepoužitelnost popsáných experimentů ve výuce na střední škole je na této práci zajímavé, že i u tématu kvantová fyzika autor zjistil pozitivní vliv experimentů na známky a přístup studentů.

Článek *Teaching quantum mechanics on an introductory level* z *American journal of physics* od Rainera Müllera a Hartmuta Wiesnera [17] popisuje vyučování kvantové mechaniky na gymnaziální úrovni, kde základní principy byly demonstrovány s použitím virtuálních laboratoří (apletů). Přestože žáci experimenty prováděli jen v rámci těchto apletů, bylo při testování pozorováno značné zlepšení v pochopení základních principů kvantové mechaniky oproti kontrolní skupině, která tyto experimenty nedělala. Opět se ale jedná o článek z časopisu s placeným přístupem.

T. L. Dimitrovová a A. Weis popisují v článku *The wave-particle duality of light: A demonstration experiment* [18] publikovaném v *American Journal of Physics* modifikaci Mach-Zehnderova interferometru, s kterým je možné současně demonstrovat částicovou i vlnovou povahu světla. Experiment je spíše vysokoškolský, možná vhodný pro velmi nadané středoškolské žáky, a na pomůcky je náročnější. Reflexe studentů zde opět chybí.

Z česky psaných zdrojů je zaměřena na středoškolské žáky stránka *Kvantová fyzika středoškolsky a aktivně* [19], která nabízí nejenom nápady pro aktivity ve výuce, ale také pracovní listy, dodatečné materiály, řešení úloh apod. Pracovní listy jsou koncipovány tak, aby si žáci sami „objevili“ kus kvantové fyziky. Součástí materiálů jsou i odkazy na aplety.

Diplomová práce Olgy Smetanové na téma *Jednoduchá fyzikální měření s tabletem nebo chytrým telefonem* [20] popisuje 8 jednoduchých měření, z nichž jedno se týká kvantové mechaniky. Je to analogie rastrovacího tunelového mikroskopu (STM). Autorka byla inspirována akustickým modelem Manfreda Eulera, který je popsán v článku *Getting in touch with the nanoworld: Hands-on experiments and models to visualize nanoscale structures* [21], kde je zároveň popsán i model na principu Braillova písma. Tento experiment je nenáročný na pomůcky a žáci jej mohou provádět sami. V diplomové práci ani v článku není uvedena zpětná vazba žáků.

Diplomová práce Lukáše Matěny s tématem *Fyzika mikrosvěta v Interaktivní fyzikální laboratoři* [22] se věnuje vytvořením experimentů vhodných pro středoškolské žáky. K těmto pokusům sepsal autor i pracovní listy a otestoval je na dvou žácích pražského Gymnázia nad Alejí. Tyto experimenty jsou však vázány na prostory Interaktivní fyzikální laboratoře v prostorách Matematicko-fyzikální fakulty, kterou je možné navštívit se skupinou žáků. Na základě některých pokusů popsanych v této diplomové práci byl vytvořen jeden z nabízených programů Interaktivní fyzikální laboratoře, a to Kvantování v mikrosvětě.

Stránky vzdálených experimentů Projektu e-laboratoř [23] nabízejí seznam experimentů vytvořených se softwarovou stavebnicí iSES Remote Lab SDK a školním experimentálním systémem ISES. Tyto experimenty je možné pomocí připojení přes počítač a ovládání přes webové rozhraní využít (např. promítnutím obrazovky na plátno) ve třídě. Experiment mohou ovládat i sami žáci. Některé experimenty mají v popisu i video. Šest experimentů (Heisenbergův princip neurčitosti, Vnější fotoefekt, Einsteinův – de Haasův pokus, Spektra, Franckův-Hertzův experiment, VA charakteristiky LED diod – Měření Planckovy konstanty) tematicky patří do kvantové fyziky.

Podobné stránky vzdálených experimentů vytvořilo Gymnázium J. Vrchlického v Klatovech [24] a také Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci [25]. Vhodnými experimenty z kvantové mechaniky uvedenými na stránkách [24] jsou Voltampérová charakteristika LED (přibližné určení Planckovy konstanty) a Zatěžovací charakteristika solárního článku. Žádný z pěti nabízených experimentů na stránkách [25] se netýká kvantové mechaniky. Stránky [25] se odkazují na další experimenty (např. na experimenty z [23]), vhodné experimenty (Fotoelektrický jev, Pozorování elektronové difrakce) mají však nefunkční odkazy a lze otevřít pouze soubor s pracovními listy.

Jako zdroj inspirace pro experimenty mohou sloužit i stránky Základního fyzikálního praktika [26]. V archivu zadání je možné dohledat v části Praktikum IV pro OF (NOFY030) zadání úloh z fyziky mikrosvěta. Úlohy z oblasti kvantové fyziky, jejichž základní princip je vysvětlitelný na úrovni střední školy, jsou „(A9) Studium fotoelektrického jevu. Určení Planckovy konstanty.“, „(A12) Měření náboje elektronu Millikanovou metodou“, „(A15) Studium atomových emisních spekter“, „(A16) Měření rezonančního a ionizačního potenciálu rtuti. Franckův-Hertzův pokus.“

K demonstraci principů těchto pokusů jsou s výjimkou studia atomových spekter (vyžadující jen běžné školní pomůcky) potřeba aparatury, které jsou finančně náročné, a nejsou proto součástí běžné školní výbavy. K získání podrobného popisu úloh je navíc zapotřebí se přihlásit pomocí přihlašovacích údajů z CAS (Centrální autentizační služba UK). Neautorizovaný uživatel si tedy může prohlédnout pouze popis pracovních úkolů a v případě úlohy (A9) i stručný popis měření. Z tohoto důvodu je použitelnost zdroje omezena. Navíc podrobnější popis jediného vhodného pokusu „(A15) Studium atomových emisních spekter“ nabízí i zdroj [2].

Vedle textových zdrojů je možno nalézt i videa na Youtube. Vhodných videí je spousta, proto jsou uvedeny jen některé ukázky videí, která popisují např. fotoelektrický jev (*Simple Photoelectric Effect Demo* [27], *Photoelectric Effect Demonstration* [28], *photoelectric effect in aluminium* [29]), který je demonstrován s minimem pomůcek, nebo tunelový jev (*How to Make a Quantum Tunnel In Real Life* [30]), kde potřebnou pomůckou je pouze sklenice vody. Video lze použít jako demonstrační. Přirozeně videa neobsahují zpětnou vazbu žáků či studentů.

Výsledky rešerše zdrojů inspirace pro experimentování v kvantové fyzice na středoškolské či vysokoškolské úrovni jsou následující: Nepřekvapivě výsledky rešerše nebyly příliš rozsáhlé (v porovnání s množstvím materiálů popisujících experimentování např. v mechanice či termodynamice) a velmi mnoho zdrojů se zaměřuje pouze na vysokoškolské studenty. Pokud se zdroj zaměřuje na středoškoláky, pak jsou většinou experimenty modelovány prostřednictvím appletů [17, 19] nebo se využívá vzdáleného přístupu [23, 24]. Pokud jsou experimenty koncipovány tak, aby byly fyzicky proveditelné během vyučování či je mohli dělat přímo žáci, objeví se problém dostupnosti pomůcek [2] a potřebných materiálů [12] nebo je zdroj informací pro běžného středoškolského fyzikáře velmi těžko dostupný či dohledatelný [1, 13]. Zdroje, popisující alespoň jeden vhodný pokus a vhodnými zdroji i z hlediska snadného přístupu jsou [2, 3, 20, 21, 22, 23, 24, 27, 28, 29, 30].

3. Jednotlivé experimenty

V této kapitole jsou popsány vytvořené experimentální sady a doplňující textové materiály. U každého experimentu je stručně popsán jev, který demonstruje, a dále je u nich popsána motivace k vytvoření dané sady. Jelikož není účelné opakovat veškeré informace obsažené v teoretické části listů pro učitele, je popis principů jevů v následujících podkapitolách zkrácen. Podrobnější popis experimentů a jevů, které demonstrují, fotografie a schémata lze najít v příslušných listech v příloze.

Pracovní listy pro žáky byly vytvářeny tak, aby co nejvíce podporovaly jejich aktivní práci. Text vždy obsahuje stručnou motivaci k demonstrovanému jevu, seznam potřebných pomůcek, úkoly, pokyny pro experimentování a závěr, ve kterém žáci vlastními slovy shrnují průběh a ideu experimentu. Texty obsahují doprovodné otázky, které buď mají za cíl zopakovat látku, kterou by žáci již měli znát, nebo pomáhají žákům formulovat výsledky experimentování. V případě experimentální sady *Wienův posunovací zákon*, která je pouze demonstrační (tj. experiment provádí učitel před třídou) a neobsahuje proto pracovní list pro žáky, je součástí listu pro učitele soubor otázek k demonstračnímu provedení, které cílí na aktivní zapojení žáků. Učitel může tyto otázky využít k diskusi nebo je lze využít jako kratší pracovní list pro žáky.

Texty pro učitele byly vytvářeny tak, aby obsahovaly dostatek informací potřebných pro provedení experimentu (teorie jevů, pokyny k provádění experimentů apod.), a zároveň nezahlcovaly učitele přebytečným textem. Listy vždy obsahují seznam pomůcek obsažených v kufříčích, ve kterých jsou experimentální sady skladovány. Ve dvou případech je uveden i seznam dalších potřebných pomůcek, které učitel musí opatřit sám, jedná se však vždy o běžně dostupné pomůcky (např. vodiče, multimetry). Texty dále obsahují stručně popsanou teorii pro učitele (*Teorie v několika větách*), popis učiva, kterou žáci musí před provedením experimentů znát (*Co by žáci měli znát*), podrobnější popis látky pro učitele (*Teorie podrobněji*), zdroje a doporučenou literaturu pro zájemce o dodatečné informace. Pokud to povaha experimentu vyžaduje, obsahuje text poznámky k pokusu, resp. k jeho demonstračnímu provedení před třídou, a vzorové výsledky experimentů, např. u *Akustické analogie STM*.

Experimenty jsou uloženy v kufříčích pro jejich snadnější uskladnění a přenos při vypůjčení. Kufříky jsou uskladněny v prostorách Katedry didaktiky fyziky MFF UK.

3.1. Akustická analogie STM

Akustická analogie STM [21] přibližuje žákům funkci rastrovacího tunelového mikroskopu (STM – scanning tunneling microscope), který se používá při zkoumání struktur o velikosti srovnatelné s velikostí atomů. Tento přístroj byl vynalezen roku 1981 a jeho základní částí je sonda ve tvaru velmi ostré jehly, která má na špičce jediný atom [31]. Pohyb této jehly je řízen pomocí piezokrystalů. Mezi jehlu a vodivý vzorek je přivedeno elektrické napětí. Obvod je rozpojený, protože je mezi vzorkem a jehlou mezera (vzduchová či vakuová) a přivedené napětí není dostatečné, aby zde proběhl výboj. Přesto díky tunelovému efektu [32] prochází obvodem proud, jehož velikost se mění v závislosti na vzdálenosti vzorku a sondy.

V akustickém modelu STM představují atomy na povrchu zkoumaného vzorku kelímky od nápoje. Žáci budou měřit s použitím dvou telefonů [20] (vysílače a přijímače), které budou držet blízko sebe. Telefony plní funkci jehly mikroskopu, tedy vysílač vysílá budící signál dané frekvence (odpovídající přivedenému napětí mezi jehlou STM a vzorkem), přijímač analyzuje změnu hlasitosti signálu, která odpovídá změně tunelového proudu procházejícího jehlou STM. V kelímcích dochází k rezonanci. Jsou-li kelímky z části naplněné vodou, změníme tím jejich rezonanční frekvenci. Takové kelímky představují atomy odlišné od atomů, které znázorňují kelímky prázdné. Budou reagovat méně na budící frekvenci vysílače, protože se nejedná o jejich rezonanční frekvenci. Analogicky při daném napětí se pro různé atomy na povrchu vzorku liší tunelový proud procházející jehlou STM.

Existují dva základní módy měření se STM: mód konstantního tunelového proudu a konstantní výšky. Pro měření v módu konstantního proudu je nutno mít v obvodu zpětnovazební smyčku, která mění vzdálenost sondy a vzorku tak, aby se udržovala konstantní hodnota proudu. V naší analogii by to znamenalo aktivně pohybovat telefony tak, aby se neměnila hlasitost vysílaného zvuku, což je velmi náročné a nepřesné. V aktivitě modelujeme měření v módu konstantní výšky a metoda konstantního proudu je zmíněna pouze v bonusové úloze č. 7.

Tento experiment byl zvolen pro svoji nenáročnost na pomůcky (je zapotřebí pouze dostatek vhodných kelímků – např. od jogurtového nápoje Actimel či podobných, vody a dvou chytrých telefonů). Dalším důvodem byla vhodnost této analogie pro demonstraci funkce STM oproti např. analogii slepecké hole [21]. Jednou

z nevýhod analogie slepecké hole je, že by si žáci mohli vytvořit chybnou představu, že se jehla STM vzorku dotýká a tím zjišťuje polohu atomů.

K experimentu byl kromě pracovních listů a textu pro učitele [33, 34, 35, 36] vytvořen manuál k aplikacím, kde je žákům popsána práce s aplikacemi v chytrých telefonech sloužících k vysílání, přijímání a analyzování zvuku. Tyto aplikace byly vybrány na základě použití v diplomové práci [20] a jejich testování v rámci této práce ukázalo jejich vhodnost i pro účely vytváření této sady. Tyto aplikace ovšem nejsou jediné, se kterými experiment lze provést. V listu pro učitele je zdůrazněno, že pokud má učitel již zkušenosti s jinými aplikacemi, může je dle svého vlastního uvážení použít.

Při vytváření úlohy č. 5 bylo cílem nasimulovat fakt, že při měření STM danou strukturu dopředu neznáme. Toto lze částečně vyřešit překrytím kelímků jemnou neprůhlednou látkou, např. látkovým kapesníkem. Ovšem tím se grafy, které mají být výsledkem měření, výrazně zploští, tj. maxima přestanou být tolik výrazná a začne být obtížné rozlišit maximum prázdného kelímku od maxima kelímku částečně plného. Toto měření je proto velmi náročné a jeho výsledky jsou často nepřesvědčivé. Byly vyzkoušeny různé textilní látky (bavlna, vlna, flanel) a nejpříznivější výsledky vycházely s bavlněnými kapesníky. Vhodnou alternativou jsou i papírové kapesníčky. Čím tenčí (resp. čím méně vrstev mají) tím více je rozdíl v zesílení zvuku znatelnější. S jednovrstvými kapesníčky se však hůře manipuluje, jelikož i lehké fouknutí může kapesníček z kelímků shodit a prozradit tak polohu atomů. S kancelářským papírem toto měření provádět nelze vůbec. Kvůli často nepřesvědčivým výsledkům nabízí úloha alternativu, kdy se vysílá bílý šum a žáci mohou analyzovat zesílené rezonanční frekvence pomocí sluchu či pomocí aplikace pro spektrální zvukovou analýzu, a tím mohou odlišit „atomy“ ve struktuře. V tomto uspořádání zůstávají plné kelímky, i přes jejich zakrytí látkovým kapesníkem, dobře rozlišitelné.

3.2. Fotoelektrický jev s plechovkami

Fotoelektrický jev s plechovkami přibližuje žákům jev, který stál u zrodu kvantové mechaniky [2]. Vysvětlení fotoefektu vychází z částicové povahy světla. Byl poprvé pozorován roku 1887 Heinrichem Hertzem. Albert Einstein roku 1905 publikoval myšlenku, že elektrony mohou absorbovat energii elektromagnetického záření jen po určitých „balíčcích“ (kvantech), a byl za to roku 1921 oceněn Nobelovou cenou za fyziku. Při vnějším fotoelektrickém jevu [37, 38] (vnější fotoefekt) se vlivem záření elektrony uvolňují ven z materiálu. Jsou-li elektrony uvolňovány uvnitř materiálu (vnitřní fotoelektrický jev), mohou se podílet na vedení elektrického proudu [39]. 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 [40, 41].

Žáci v průběhu experimentu budou svítit na elektricky nabitou plechovku [27] různými zdroji záření (od viditelného po UVC). Při svícení na záporně nabitou plechovku se fotoefekt výrazně projeví až při osvětlení UVC lampičkou. Elektrony může uvolňovat i část spektra UVB, avšak zářivka přiložená k experimentu září v těchto částech spektra UVB jen velmi slabě. Žárovky tzv. černého světla jsou pro demonstraci fotoefektu na hliníkových plechovkách nedostačující. Při svícení na kladně nabitou plechovku, kdy je na povrchu plechovky elektronů nedostatek, nelze pozorovat pokles allobalového indikátoru náboje vlivem fotoefektu, jelikož případné uvolnění elektronu by naopak nabilo plechovku ještě více kladněji.

Pro provedení experimentu je klíčové, aby použitá plechovka byla hliníková. Na povrchu plechovky však může vznikat s časem oxidová vrstva, kterou je třeba před provedením experimentu jemně obrousit přiloženou brusnou houbičkou. Železné plechovky s pomůckami obsaženými v experimentální sadě nefungují, protože mají příliš vysokou hodnotu výstupní práce. Pro jejich použití by bylo potřeba užít záření s ještě kratšími vlnovými délkami, než má přiložená UVC lampička. Aby aktivitu mohli provádět žáci, je třeba dbát na bezpečnost experimentu, a proto do „tvrdšího“ UV záření jít nelze. Komerčně prodávaná UVC lampička je tedy nejtvrdší možný zdroj UV.

Při výrobě této experimentální sady se uvažovalo nad zakoupením fotonky či fotodiody, které by reagovaly již na UVA záření. Tyto součástky by byly však příliš nákladné a náchylné na neopatrné zacházení, proto se od jejich použití upustilo. Navíc

by vyžadovalo toto uspořádání vytvoření samostatné aparatury, a obdobná aparatura již byla sestavena v rámci diplomové práce [22], která se nyní nachází v prostorách Interaktivní fyzikální laboratoře (IFL) MFF UK.

Pro účely tohoto experimentu byly vytvořeny sady přívodních kabelů s objímkami pro žárovky/zářivky viditelného, UVA a UVB světla. S těmito kabely by však žáci nemohli z bezpečnostních důvodů pracovat samostatně a rozhodně by je nemohli sami zasouvat do zásuvky. Toto by velmi zpomalovalo průběh experimentu a vyžadovalo by to mnoho pozornosti učitele. Z tohoto důvodu byly tyto zdroje nahrazeny ručními LED svítilnami ve viditelném spektru a ruční UVA svítilnou. Jediné zdroje světla, které se nepovedlo nahradit ručními zdroji a jsou nadále napájené ze zásuvky, je výkonná UVA žárovka (experimentální sada tedy obsahuje dva různě výkonné zdroje UVA záření) a kompaktní zářivka UVB. Tyto zdroje zapojuje do zásuvky učitel a sám s nimi nadále manipuluje. V pracovních listech, a i v listech pro učitele, je upozorněno na bezpečnost práce při experimentování.

Tento experiment byl zvolen i pro svoji relativní nenáročnost na pomůcky (jedinými neběžnými pomůckami jsou zdroje UVB a UVC záření, tj. kompaktní zářivka UVB pro chov plazů v teráriích a ruční germicidní [42] UVC lampička. Dalším důvodem pro volbu tohoto experimentu byla i klíčová role, kterou sehrál fotoelektrický jev při vzniku kvantové mechaniky.

3.3. Wienův posunovací zákon

Experimentální sada s názvem Wienův posunovací zákon demonstruje vyzařovací zákony absolutně černého tělesa [43], tj. Planckův vyzařovací zákon, Wienův posunovací zákon a Stefan-Boltzmannův zákon. V experimentu je využíváno lineárního halogenového zářiče, jako zdroje světla, které se přes optický hranol láme, čímž se vlivem disperze světla zobrazí spojité spektrum. Při snížení napětí na zářiči se sníží teplota vlákna a tím se jednak sníží celková intenzita záření, ale díky posunu maxima vyzařované energie směrem k větším vlnovým délkám, se změní i relativní zastoupení barev ve spektru. Proto se původně bílé světlo zářiče změní na světle oranžové. Doc. RNDr. Zdeněk Bochníček, Dr. ve videu [48] upozorňuje na fakt, že lidské oko je citlivější na zelenou barvu, proto se lidskému oku jeví ve zobrazeném spektru intenzivnější, než ve skutečnosti je. Na kvalitativní výsledek pokusu toto však nemá významný vliv.

Při dané termodynamické teplotě T vyzařuje absolutně černé těleso elektromagnetické záření sice všech vlnových délek (jedná se o spojité spektrum), ale s různou intenzitou. Toto spektrum popisuje Planckův vyzařovací zákon [2, 44, 45, 46], který Max Planck odvodil na základě tzv. kvantové hypotézy, tedy že vyzařování energie může probíhat pouze po „balíčcích“ energie – kvantech. Tento zákon udává spektrální hustotu intenzity vyzařování H_λ ve tvaru

$$H_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1},$$

kde $h \cong 6,63 \cdot 10^{-34}$ J s je Planckova konstanta, c je rychlost světla ve vakuu, $k \cong 1,38 \cdot 10^{-23}$ J K⁻¹ je Boltzmannova konstanta, T je termodynamická teplota a λ je vlnová délka vyzařovaného záření.

Tomuto zákonu historicky předcházela Rayleigh-Jeansův zákon

$$H_\lambda = c_1 \frac{T}{\lambda^4},$$

kde c_1 je konstanta. Tento zákon však platí přibližně a pouze pro dlouhovlnnou část spektra, v krátkovlnné části dochází k tzv. „ultrafialové katastrofě“, kdy by podle něho mělo dojít k neomezenému nárůstu intenzity vyzařování pro krátké vlnové délky.

Další zákon, který předcházel Planckovu zákonu, byl zákon Stefan-Boltzmannův, který popisuje celkovou intenzitu vyzařovaného záření tělesem v závislosti na jeho termodynamické teplotě T . Má tvar

$$I = \sigma T^4,$$

kde I je celková intenzita záření a konstanta $\sigma \cong 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ je tzv. Stefan-Boltzmannova konstanta. Výraz σT^4 odpovídá ploše pod grafem Planckova vyzařovacího zákona.

Wienův posunovací zákon byl také známý již před Planckovým zákonem. Ten popisuje posun vlnové délky λ_{\max} nejintenzivněji vyzařovaného záření ve spektru záření AČT v závislosti na termodynamické teplotě T a má tvar

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T},$$

kde $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m K}$ je konstanta.

Tento experiment byl pro zpracování zvolen díky faktu, že demonstruje tři vyzařovací zákony najednou. Tyto zákony, obzvláště Planckův, odvozený na základě kvantové hypotézy, hrály významnou roli při vzniku kvantové mechaniky. Dalším důvodem je jeho relativní nenáročnost na pomůcky. Např. nejméně běžnou pomůcku, halogenový reflektor, lze zakoupit např. v hobby marketech. Ten je však dále třeba pro užití v tomto experimentu upravit. Mezi tyto úpravy patřilo uchycení na stojan, vytvoření stínítka a nabarvení vnitřku reflektoru černou žáruvzdornou barvou pro omezení odrazu světla uvnitř reflektoru [47, 48]. Dále je třeba zásuvkového stmívače, který umožňuje měnit přivedené napětí do reflektoru. Zbylé pomůcky jako např. optický hranol pro rozklad bílého světla a spojná čočka by měly být součástí středoškolského kabinetu nebo laboratoře fyziky.

Experiment je na rozdíl od zbylých zcela demonstrační, tj. experiment provádí učitel před žáky. Z tohoto důvodu nebyl k tomuto experimentu vytvořen pracovní list pro žáky, ale pouze metodický materiál pro učitele obsahující návrhy vhodných otázek, které může učitel při provádění experimentu žákům položit.

3.4. Tunelový jev

Tato experimentální sada demonstruje tunelový jev s použitím mikrovlnné soupravy, která již byla k dispozici na KDF MFF UK. Často je tento experiment v anglicky psaných zdrojích označován jako frustrated total internal reflection (FTIR) [49]. Tento název, resp. i jeho český překlad, by ovšem mohl středoškolského učitele zmást, jelikož není na první pohled jednoduché spojit si název tohoto experimentu s tunelovým jevem, proto byl zvolen název jednodušší.

Mezi mikrovlnný vysílač a jeden z přijímačů je vložen šelakový hranol tak, aby na něm docházelo k totálnímu odrazu [50, 51]. Odražený signál je měřen pomocí druhého přijímače. Následně žáci přiblíží ke stěně hranolu, kde dochází k totálnímu odrazu mikrovln, druhý šelakový hranol a tím vznikne úzká vzduchová mezera. Když je vzduchová mezera velikosti srovnatelné s vlnovou délkou použitých mikrovln (cca 3 cm), dochází ke zdatnému poklesu odraženého signálu, a naopak se zesílí signál prošlý. Dochází tak k tunelovému jevu.

Vysvětlení tohoto jevu lze najít i s pomocí klasické elektrodynamiky, resp. vlnové optiky. Teorie elektromagnetického pole říká, že na rozhraní dvou izotropních optických prostředí musí být určité složky elektrického a magnetického pole spojitě. Z toho faktu můžeme odvodit, že pokud na rozhraní dopadá rovinná harmonická vlna, tak i v případě, kdy dochází k totálnímu odrazu, proniká do druhé prostředí elektromagnetická vlna, jejíž amplituda se vzdáleností od rozhraní klesá exponenciálně a zároveň je střední tok energie směrem od rozhraní nulový. Jedná se o tzv. evanescentní vlnu. Pokud v dostatečné blízkosti k hranolu, na kterém dochází k totálnímu odrazu, přiložíme hranol z materiálu, který má vyšší index lomu, než je index lomu prostředí mezi hranoly (zde vzduch), můžeme zachytit evanescentní vlnu. Ta se ale díky vyššímu indexu lomu tohoto prostředí již nadále chová jako obyčejná elektromagnetická vlna, a tím je totální odraz překonán. Pro kvantitativní analýzu můžeme použít tzv. Fresnelovy vzorce [52, 53], které nám umožní určit koeficient propustnosti T , vyjadřující podíl energie, která projde do druhého hranolu.

Jiné vysvětlení poskytuje kvantová mechanika, kdy na elektromagnetické záření budeme nahlížet jako na tok fotonů. Popsaný jev poté nazýváme tunelový jev [33, 34], protože fotony se dostávají i do míst, kam by se z hlediska klasické mechaniky, tj. pokud bychom je popisovali jako hmotné body, neměly dostat, protože nemají

dostatečnou energii na překonání bariéry (vzduchové mezery), která tato místa odděluje. Koeficient propustnosti T je pak pravděpodobnost, že foton bariérou projde. Pro vysvětlení tohoto experimentu byl zvolen tento přístup. Samotnou vzduchovou mezeru mezi hranoly jako potenciálovou bariéru („zakázané území“ pro fotony) nedokáže kvantová mechanika vysvětlit, na to je třeba poznatků z kvantové elektrodynamiky (QED), která teprve popisuje interakci fotonů s látkou.

Tento experiment byl zvolen, jelikož potřebné pomůcky k jeho realizaci byly již dostupné na KDF MFF UK. Před kompletací experimentální sady bylo třeba opravit výstupy přijímačů pro měření ručičkovým voltmetrem. Dále byla vytvořena redukce, která mění pětikolíkový výstup z přijímačů na standardní výstup pro měření s běžnými multimetry. Dále byl vytvořen rozbočovač pro napájení vysílačů a přijímačů. Pro účely tohoto experimentu byly i vytvořeny parafinové hranoly metodou odlévání, avšak experiment s užitím těchto hranolů vykazoval nepřesvědčivé výsledky, proto se od jejich používání upustilo. Přesná příčina nebyla objevena, avšak jistý vliv se připisuje nedokonalostem při odlévání hranolů a při následném tuhnutí parafinu.

Původním záměrem bylo vytvořit podobný experiment s použitím viditelného laseru a optických hranolů [7, 9, 49]. Toto uspořádání je ale velmi náročné na přesnost. Bylo by zapotřebí velmi dobře vyleštěných hranolů a velmi pevných úchytů s mikrometrickým šroubem pro nastavení vzdálenosti hranolů. I přes zakoupení kvalitních optických hranolů a vynaloženou snahu se nepodařilo tuto verzi experimentu zprovoznit. Nakoupené hranoly jsou nyní využity k demonstraci totálního odrazu, jako součásti jednoho úkolu v pracovním listu pro žáky v rámci této experimentální sady.

4. Zhodnocení experimentů středoškolskými učiteli fyziky

Z důvodu protiepidemických opatření vytvořených vládou ČR, spojených s onemocněním COVID-19 bylo znemožněno přímé testování vytvořených experimentálních sad se středoškolskými žáky. Alternativou tohoto testování se proto stalo odborné zhodnocení experimentálních sad a doplňkových materiálů zkušenými středoškolskými učiteli.

Oslovení učitelé byli nejprve dotázáni na jednoduché otázky týkající se jejich výuky fyziky mikrosvěta:

„Jak dlouho jste učitelem/učitelkou?“,

„Na jakém typu školy vyučujete?“,

„Jaký důraz kladete na výuku fyziky mikrosvěta?“.

Poté měli za úkol pročíst si materiály vytvořené k experimentálním sadám, tj. pracovní listy a texty pro učitele, a dále zodpovědět na dotazník obsahující následující otázky:

„Je aktivita srozumitelná?“,

„Myslíte si, že bude pro žáky přínosná? Přiblíží žákům daný pojem?“,

„Zařadil/a byste aktivitu do své výuky (byť jen její část)?“.

Na žádosti o expertní zhodnocení odpověděli čtyři učitelé, respondent s 21letou zkušeností vyučující na střední průmyslové škole sdělovací techniky, respondent s 12letou zkušeností vyučující na střední odborné škole s IT zaměřením, respondent s 38letou zkušeností ze všeobecného gymnázia a respondent s 6letou zkušeností ze všeobecného gymnázia (ten však hodnotil pouze dvě sady, a to *Fotoelektrický jev* a *Tunelový jev*). Všichni respondenti považují fyziku mikrosvěta za nedílnou součást výuky fyziky na jejich škole.

Odpovědi na dotazník týkající se experimentálních sad byly ve většině případů velmi pozitivní. Následující tabulka 4.1 shrnuje odpovědi respondentů na otázky k experimentálním sadám a textovým materiálům.

		Je aktivita srozumitelná?	Myslíte si, že bude pro žáky pří- nosná? Přibliží žákům daný pojem?	Zařadil/a byste aktivitu do své výuky (byť jen její část)?
Akustická analogie STM	Respondent č. 1	ano	ano	ano
	Respondent č. 2	ano	nevím	ano
	Respondent č. 3	ne	ne	ne
	Respondent č. 4	nehodnotil		
Fotoelektrický jev	Respondent č. 1	ano	ano	ano
	Respondent č. 2	ano	ano	ano
	Respondent č. 3	ano	ano	ano
	Respondent č. 4	ano	ano	ano
Wienův posunovací zákon	Respondent č. 1	ano	ano	ano
	Respondent č. 2	ano	ano	ano
	Respondent č. 3	ano	ano	ano
	Respondent č. 4	nehodnotil		
Tunelový jev	Respondent č. 1	ano	ano	ano
	Respondent č. 2	ano	ano	ano
	Respondent č. 3	ne	ne	ne
	Respondent č. 4	ano	ano	ano

Tabulka 4.1: Shrnutí odpovědí respondentů na otázky týkajících se experimentálních sad

Jako lehce problematickou úlohu vnímají učitelé *Akustickou analogii STM*, kde popisovali její náročnost na zručnost při samotném experimentování. Jedním z návrhů bylo použití této úlohy výhradně ve výběrovém semináři z fyziky. Jeden z respondentů označil sady *Akustická analogie STM* a *Tunelový jev* za příliš náročné i z hlediska teorie, jelikož tunelový jev na své škole z časových důvodů nevyučuje, a považuje jej za

spíše vysokoškolské učivo. Aktivita přibližující STM jej přesto zaujala. Další poznámkou respondentů byla neuvedená časová náročnost úloh.

Na základě mnoha dalších dílčích komentářů hodnotících učitelů (nad rámec položených otázek) byly doplňkové texty k experimentálním sadám upraveny. Nejednalo se však o výrazné zásahy do původních textů. Jelikož nebylo možné s žáky experimentální sady otestovat a tím stanovit časovou náročnost experimentů, zůstaly materiály bez uvedené časové náročnosti.

5. Závěr

V rámci této diplomové práce byly naplněny stanovené cíle, uvedené v úvodu práce. Byly nalezeny vhodné informační zdroje popisující demonstrační experimenty z fyziky mikrosvěta se zaměřením na kvantovou mechaniku v kontextu středoškolského učitele fyziky. Tyto zdroje nejsou příliš rozsáhlé ve srovnání s dostupnými materiály popisující experimentování např. v mechanice či termodynamice.

Byly vytvořeny čtyři přenosné experimentální sady s názvy *Akustická analogie STM*, *Fotoelektrický jev s plechovkami*, *Wienův posunovací zákon* a *Tunelový jev*. K těmto sadám byly vytvořeny příslušné materiály, tj. pracovní listy pro žáky a informační listy pro učitele. Tyto sady jsou uloženy v prostorách Katedry didaktiky fyziky MFF UK. Jejich stručný popis je sepsán ve třetí kapitole této práce a podrobnější popis se nachází v příslušných informačních listech pro učitele, které se nacházejí v přílohách této práce.

Doplňkové materiály vytvořené k popsáným experimentálním sadám byly zhodnoceny čtyřmi zkušenými učiteli fyziky na středních školách a na základě jejich hodnocení a komentářů byly tyto materiály upraveny a doplněny. Hodnocení učitelů byla ve většině případů kladná, a až na výjimky by učitelé experimentální sady použili ve své výuce.

Vhodným rozšířením této diplomové práce by bylo vytvoření dalších experimentálních sad a zpracování příslušných doplňkových materiálů.

Dalším vhodným rozšířením by bylo otestování vytvořených experimentálních sad a materiálů ve výuce fyziky na střední škole, a tím určení časové náročnosti jednotlivých aktivit. Toto a podobná testování byla v čase vytváření této diplomové práce znemožněna, z důvodu protiepidemických opatření vytvořených vládou ČR, spojených s onemocněním COVID-19.

Možnost práce s vytvořenými sadami bude po krátké pilotáži se žáky propagována mezi učiteli, kterým budou sady k dispozici.

6. Seznam použité literatury

- [1] PRUTCHI, David a PRUTCHI, Shanni R. *Exploring quantum physics through hands-on projects*. Hoboken: Wiley, 2012. ISBN 978-1-118-14066-6.
- [2] ŠTOLL, Ivan. *Fyzika pro gymnázia. Fyzika mikrosvěta. 3. přepracované vydání*. Praha: Prometheus, 2002. ISBN 80-7196-241-4.
- [3] SVOBODA, Emanuel a kolektiv. *Pokusy z fyziky na střední škole 4. 1. vydání*. Praha: Prometheus, 2001. ISBN 80-7196-010-1.
- [4] BECK, Mark. *Quantum mechanics: theory and experiment*. New York: Oxford University Press, 2012. ISBN 978-0-19-979812-4.
- [5] BACHOR, Hans-A., RALPH, Timothy C. *A guide to experiments in quantum optics*. Weinheim: Wiley-VCH, 2004. ISBN 3-527-40393-0.
- [6] LIPSON, Stephen G. *Optics Experiments and Demonstrations for Student Laboratories*. London: IOP Publishing Ltd, 2020. ISBN 978-0-7503-2298-0.
- [7] ROSSUM VAN, Aernout a VAN DEN BERG, Ed. *Using frustrated internal reflection as an analogue to quantum tunneling*. Annual Girep Conference, Budapest 1.-5. 7. 2019
- [8] MALLEY, Chris, MCKAGAN, Sam, PERKINS, Kathy a WIEMAN, Carl. Quantum Tunneling and Wave Packets. *PhET: Free online physics, chemistry, biology, earth science and math simulations* [online]. ©2020 University of Colorado. Poslední změna 21. 9. 2020 [Cit. 21. 9. 2020]. Dostupné z: <https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/quantum-tunneling>
- [9] SALMAN, Rabiya, RASHID, Shama a ANWAR, Muhammad Sabieh. A visual classroom demonstration of frustrated total internal reflection as an analogue to optical tunnelling. *European Journal of Physics* [online]. 2013, **34**(6), 1439-1443 [Cit. 7. 7. 2020] ISSN 0143-0807. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/0143-0807/34/6/1439>
- [10] DIMITROVA, T. L. a WEIS, A. Single photon quantum erasing: a demonstration experiment. *European Journal of Physics* [online]. 2010, **31**(3), 625-637

[Cit. 7. 7. 2020]. ISSN 0143-0807. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/0143-0807/31/3/020>

[11] DIMITROVA, T. L. a WEIS, A. Lecture demonstrations of interference and quantum erasing with single photons. *Physica Scripta* [online]. 2009, **T135**

[Cit. 17. 7. 2020]. ISSN 0031-8949. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/0031-8949/2009/T135/014003>

[12] HETFLEIŠ, Jakub et al. Entangled γ -photons—classical laboratory exercise with modern detectors. *European Journal of Physics* [online]. 2018, **39** 025403.

[Cit. 17. 7. 2020]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1361-6404/aa8c10>

[13] CARREÑO, María José et al. An instrument-free demonstration of quantum key distribution for high-school students. *Physics Education* [online]. 2019, **54** 065006.

[Cit. 17. 7. 2020]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ab377c>

[14] CORNI, Federico a MICHELINI, Marisa. A didactic proposal about Rutherford backscattering spectrometry with theoretic, experimental, simulation and application activities. *European Journal of Physics* [online]. 2018, **39** 015501. [Cit. 17. 7. 2020].

Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1361-6404/aa9053>

[15] Lahore University of Management Sciences, *Class Demonstrations* [online].

©2016 PhysLab, Lahore University of Management Sciences. Poslední změna 26. 8. 2020 [Cit. 26. 8. 2020]. Dostupné z: <https://physlab.org/class-demos/>

[16] ANWAR, Muhammad Sabieh. Employing real experiments and modern viewpoints in the teaching of modern physics. *arXiv* [online]. Cornell University. Poslední změna 21. 8. 2013 [Cit. 17. 7. 2020]. Dostupné z: <https://arxiv.org/pdf/1308.4359.pdf>

[17] MÜLLER, Rainer a WIESNER, Hartmut. Teaching quantum mechanics on an introductory level. *American Journal of Physics* [online]. 2002, **70**(3), 200-209

[Cit. 26. 8. 2020]. ISSN 0002-9505. Dostupné z: <http://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.1435346>

[18] DIMITROVA, T. L. a WEIS, A. The wave-particle duality of light: A demonstration experiment. *American Journal of Physics* [online]. 2008, **76**(2), 137-142

[Cit. 26. 8. 2020]. ISSN 0002-9505. Dostupné z: <http://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.2815364>

[19] KOUPILOVÁ, Zdeňka. Kvantová fyzika středoškolsky a aktivně. *Katedra didaktiky fyziky* [online]. Matematicko-fyzikální fakulta UK. Poslední změna 27. 9. 2020 [Cit. 27. 9. 2020]. Dostupné z: <http://kdf.mff.cuni.cz/~koupilova/kvantovka.php>

[20] SMETANOVÁ, Olga. *Jednoduchá fyzikální měření s tabletem nebo chytrým telefonem*. Olomouc, 2019. Diplomová práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Katedra experimentální fyziky.

[21] EULER, Manfred. *Getting in touch with the nanoworld: Hands-on experiments and models to visualize nanoscale structures* [online]. Science and technology Education for the 21st Century, 2014 [Cit. 10. 7. 2020]. Dostupné z: 10.13140/2.1.1728.2881.

[22] MATĚNA, Lukáš. *Fyzika mikrosvěta v interaktivní fyzikální laboratoři*. Praha, 2015. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze, Matematicko-fyzikální fakulta, Katedra didaktiky fyziky.

[23] LUSTIG, František, SCHAUER, František a OŽVOLDOVÁ, Miroslava. *Vzdálená laboratoř* [online]. ©2020. Poslední změna 19. 3. 2018 [Cit. 26. 8. 2020]. Dostupné z: <https://www.ises.info/index.php/cs/laboratory>

[24] PANOŠ, Miroslav, LUSTIG, František, KRÁTKÝ, Adam, HRABÍK, Václav, PATLEJCH, Karel. *Vzdálená laboratoř GymKT: Remote-LAB GymKT* [online]. ©2011-2020 Remote-LAB GymKT. Poslední změna 21. 9. 2020 [Cit. 21. 9. 2020]. Dostupné z: <http://remote-lab.fyzika.net/index.php?lng=cs>

[25] LÁTAL, František. *Vzdáleně ovládaná laboratoř* [online]. © 2010 František Látal. Poslední změna 6. 4. 2014 [Cit. 21. 9. 2020]. Dostupné z: <http://www.ictphysics.upol.cz/remotelab/index.html>

[26] *Základní fyzikální praktikum* [online]. Kabinet výuky obecné fyziky. Matematicko-fyzikální fakulta UK. Poslední změna 1. 10. 2020 [Cit. 1. 10. 2020]. Dostupné z: <https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/zadani/f4>

- [27] PhysicsAstronomyUofU, 2009, *Simple Photoelectric Effect Demo*, Youtube video. [Cit. 17. 7. 2020]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=WO38qVDGgqw>
- [28] National STEM Centre, 2015, *Photoelectric Effect Demonstration*, Youtube video. [Cit. 17. 7. 2020]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=v-1zjdUTu0o>
- [29] Alejandro del Mazo Vivar, 2017, *photoelectric effect in aluminium*, Youtube video. [Cit. 17. 7. 2020]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=jtvBJHQY0_U
- [30] The Action Lab, 2019, *How to Make a Quantum Tunnel In Real Life*, Youtube video. [Cit. 17. 7. 2020]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=kvSlaIwU-Cuk>
- [31] Scanning tunneling microscopy. *NanoScience Instruments* [online]. © 2020 Nanoscience Instruments. Poslední změna 17. 7. 2020 [Cit. 17. 7. 2020]. Dostupné z: <https://www.nanoscience.com/techniques/scanning-tunneling-microscopy/>
- [32] KOUPILOVÁ, Zdeňka. *Kapitola 3: Jednodimenzionální jednoduché systémy*. Skripta k předmětu Kvantová mechanika [online]. Poslední změna 11. 12. 2019 [Cit. 25. 8. 2020]. Dostupné z: <https://kdf.mff.cuni.cz/vyuka/kvantovka/QM03-JednoducheSystemy.pdf>
- [33] Schematic of electron wavefunction. [schéma]. In: Scanning tunneling microscopy. *NanoScience Instruments* [online]. © 2020 Nanoscience Instruments. Poslední změna 17. 7. 2020 [Cit. 17. 7. 2020]. Dostupné z: <https://www.nanoscience.com/techniques/scanning-tunneling-microscopy/>
- [34] Obrázek 14: Koeficienty odrazu R a průchodu T v závislosti na šířce bariéry a pro případ $0 < E < V_B$ [obrázek]. In: KOUPILOVÁ, Zdeňka. *Kapitola 3: Jednodimenzionální jednoduché systémy*. Skripta k předmětu Kvantová mechanika [online]. Poslední změna 11. 12. 2019 [Cit. 25. 8. 2020]. Dostupné z: <https://kdf.mff.cuni.cz/vyuka/kvantovka/QM03-JednoducheSystemy.pdf>
- [35] Feedback loop and electron tunneling for scanning tunneling microscopy (STM). [obrázek]. In: Scanning tunneling microscopy. *NanoScience Instruments*

- [online]. © 2020 Nanoscience Instruments. Poslední změna 17. 7. 2020
[Cit. 17. 7. 2020]. Dostupné z: <https://www.nanoscience.com/techniques/scanning-tunneling-microscopy/>
- [36] 3D rendered Scanning Tunneling Microscope image of atoms. [obrázek]. In: Scanning tunneling microscopy. *NanoScience Instruments* [online]. © 2020 Nanoscience Instruments. Poslední změna 17. 7. 2020 [Cit. 17. 7. 2020]. Dostupné z: <https://www.nanoscience.com/techniques/scanning-tunneling-microscopy/>
- [37] *Učební text k přednášce UFY102*. Vnější fotoefekt a Comptonův rozptyl. Pojem fotonu. [online]. Poslední změna 8. 3. 2011 [Cit. 25. 8. 2020]. Dostupné z: http://fu.mff.cuni.cz/biomolecules/media/files/courses/Vnejsi_fotoefekt.pdf
- [38] REICHL, Jaroslav a VŠETIČKA, Martin. Fyzikální podstata. *Encyklopedie fyziky* [online]. Copyright © 2006 – 2020. Poslední změna 26. 8. 2020 [Cit. 26. 8. 2020]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/723-fyzikalni-podstata>
- [39] REICHL, Jaroslav a VŠETIČKA, Martin. Praktické využití fotoefektu. *Encyklopedie fyziky* [online]. Copyright © 2006 – 2020. Poslední změna 26. 8. 2020 [Cit. 26. 8. 2020]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/725-prakticke-vyuziti-fotoefektu>
- [40] HORSKÝ, P. *Univerzitní příprava gymnaziálních učitelů fyziky (se zvláštním zřetelem ke kvantové mechanice)*. Brno, 1996. Diplomová práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta, katedra obecné fyziky.
- [41] MIKULČÁK, Jiří. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky a vzorce pro střední školy*. Praha: Prometheus, 2003. ISBN 978-80-7196-264-9.
- [42] KIM, Soo-Ji, KIM, Do-Kyun, KANG, Dong-Hyun a SCHOTTEL, J. L. Using UVC Light-Emitting Diodes at Wavelengths of 266 to 279 Nanometers To Inactivate Foodborne Pathogens and Pasteurize Sliced Cheese. *Applied and Environmental Microbiology* [online]. 2015, **82**(1), 11-17 [Cit. 25. 8. 2020]. ISSN 0099-2240. Dostupné z: <http://aem.asm.org/lookup/doi/10.1128/AEM.02092-15>
- [43] *Učební text k přednášce UFY102*. Tepelné záření. Záření absolutně černého tělesa [online]. Poslední změna 4. 1. 2006 [Cit. 30. 10. 2020]. Dostupné z: <http://alma.karlov.mff.cuni.cz/ufy102/Planckuv%20zakon.pdf>

- [44] REICHL, Jaroslav a VŠETIČKA, Martin. Záření absolutně černého tělesa. *Encyklopedie fyziky* [online]. Copyright © 2006 – 2020. Poslední změna 30. 10. 2020 [Cit. 30. 10. 2020]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/538-zareni-absolutne-cerneho-telesa>
- [45] LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia. Optika*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010. ISBN 978-80-7196-384-4.
- [46] Obr. 4. Planckův vyzařovací zákon [obrázek]. In: *Učební text k přednášce UFY102. Tepelné záření. Záření absolutně černého tělesa* [online]. Poslední změna 4. 1. 2006 [Cit. 30. 10. 2020]. Dostupné z: <http://alma.karlov.mff.cuni.cz/ufy102/Planckuv%20zakon.pdf>
- [47] BOCHNÍČEK, Zdeněk. *Využití lineární halogenové žárovky pro demonstrační experimenty* [online]. In: *Veletrh nápadů učitelů fyziky 20, sborník z konference*. Praha: Univerzita Karlova, 2015. Poslední změna 8. 1. 2020 [Cit. 4. 11. 2020]. Dostupné z: <https://www.ucitseucit.cz/attachments/article/13/Linearni%20halogenova%20zarovka.pdf>
- [48] Nadace České spořitelny, 2016, *Doc. RNDr. Zdeněk Bochníček, Dr., PřF MU Brno*, Youtube video. [Cit. 4. 11. 2020]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=hzqR81UB6pY&list=PLNn4rgcKoGfp9VX-55cWubyFqovsRyv05&index=6>
- [49] ZHU, S., YU, A., HAWLEY, D. a ROY, R. Frustrated total internal reflection: A demonstration and review. *American Journal of Physics* [online]. 1986, **54**(7), 601-607 [Cit. 10. 9. 2020]. ISSN 0002-9505. Dostupné z: <http://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.14514>
- [50] REICHL, Jaroslav a VŠETIČKA, Martin. Odraz a lom světla. *Encyklopedie fyziky* [online]. Copyright © 2006 – 2020. Poslední změna 10. 9. 2020 [Cit. 10. 9. 2020]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/436-odraz-a-lom-svetla>
- [51] REICHL, Jaroslav a VŠETIČKA, Martin. Úplný odraz světla. *Encyklopedie fyziky* [online]. Copyright © 2006 – 2020. Poslední změna 10. 9. 2020 [Cit. 10. 9. 2020]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/440-uplny-odraz-svetla>

[52] *Učební text k přednášce UFY102. Fresnelovy vzorce a jevy na rozhraní dvou prostředí I.* [online]. Poslední změna 8. 3. 2011 [Cit. 10. 9. 2020]. Dostupné z: http://fu.mff.cuni.cz/biomolecules/media/files/courses/Fresnelovy_vzorcy_I.pdf

[53] *Učební text k přednášce UFY102. Fresnelovy vzorce a jevy na rozhraní dvou prostředí II.* [online]. Poslední změna 8. 3. 2011 [Cit. 10. 9. 2020]. Dostupné z: http://fu.mff.cuni.cz/biomolecules/media/files/courses/Fresnelovy_vzorcy_II.pdf

7. Seznam tabulek

4.1 Shrnutí odpovědí respondentů na otázky týkajících se experimentálních sad 21

8. Přílohy

Přílohy obsahují doplňkové materiály, které byly sepsány k experimentálním sadám vytvořených v rámci této diplomové práce. Jedná se o pracovní listy pro žáky (pozn. *Wienův posunovací zákon* tento list neobsahuje kvůli povaze experimentu), informační texty pro učitele a v případě *Akustické analogie STM* je zde navíc manuál k aplikacím, které jsou použity v rámci experimentu.

Akustická analogie rastrovací tunelové mikroskopie (STM)

(Text pro učitele)

Souprava kufříku je z většiny koncipována pro samostatnou práci až pěti skupin žáků. Úkol č. 5 dělají všechny skupiny najednou s učitelovou asistencí.

Pomůcky obsažené v kufříku: 20 prázdných lahvíček od nápoje Actimel, látka, pěnová šablona, 5× manuál k aplikacím, 5× pracovní list, text pro učitele

Další potřebné pomůcky: voda, dva chytré telefony (do každé skupiny) s aplikacemi phyphox by RWTH Aachen University, zvukovým generátorem (např. Function Generator by keuwlsoft) a zvukovým spektrálním analyzérem (např. Advanced Spectrum Analyzer PRO by Vuche Labs)

Poznámka k aplikacím: Pokud máte odzkoušené jiné aplikace s funkcemi generátor zvuku, generátor bílého šumu, analýza hlasitosti zvuku se záznamem, zvukovým spektrálním analyzérem, není třeba zmíněné aplikace instalovat. Uvedené aplikace jsou však testované a doporučené.

Teorie v několika větách

K tunelovému jevu dochází, když částice překoná energetickou bariéru o větší energii, než je její vlastní celková energie, což je v klasické fyzice nemožné. Rastrovací tunelový mikroskop využívá skutečnosti, že pravděpodobnost průchodu částice takovou bariérou velmi silně závisí na šířce této bariéry. V mikroskopu se měří tzv. tunelový proud = tok elektronů, které zvládly překonat vzduchovou (popř. vakuovou) mezeru mezi povrchem zkoumaného materiálu a sondou mikroskopu. Z velikosti naměřeného proudu lze velmi přesně odvodit vzdálenost materiálu a sondy v daném místě.

Co by žáci měli znát a jak je seznámit s principem STM

Žáci musí rozumět alespoň základům rezonance. Lze například udělat pokus s pískáním na láhev nebo s ladičkami a rezonančními dutinami. Tento jev je vhodné na něčem podobném připomenout.

Dále musí být žáci seznámeni s konceptem tunelového jevu a STM, dostatečný výklad je na následující úrovni: V kvantové fyzice částice mohou s jistou pravděpodobností projít i místem (bariérou), kterým by z hlediska klasické fyziky nemohly projít. Tato pravděpodobnost průchodu je velmi závislá na šířce této oblasti (bariéry) a s rozšiřující se oblastí pravděpodobnost

velmi rychle klesá. Uvažujme velmi ostrou jehlu (s jedním atomem na hrotu), pohybující se těsně nad povrchem zkoumaného vzorku, kterého se ale nedotýká. Připojíme-li zdroj napětí k jehle a k vodivému vzorku, tak by při malém napětí obvodem neměl z klasického pohledu téci proud (jehla a vzorek se nedotýkají). Avšak díky tunelovému jevu některé elektrony zakázanou oblast překonají a vytvářejí slabý tunelový proud. Velikost tohoto proudu se dramaticky mění při malých změnách vzdálenosti jehly a vzorku. Díky měření tunelového proudu a sledování pohybu jehly je možno zachytit „nerovnosti“ na povrchu vzorku o rozměrech srovnatelnými s atomy.

Teorie podrobněji

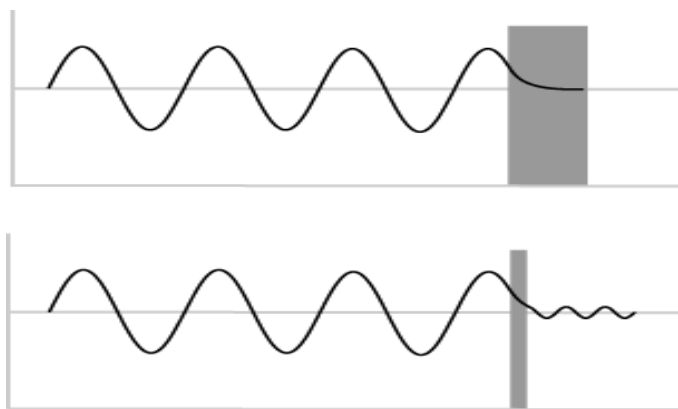
Tunelový jev

Tunelový jev je ryze kvantový jev. Částice (např. elektron) překoná energetickou bariéru takové velikosti, že z hlediska klasické mechaniky nemá na její překonání dostatečnou energii a nemělo by tedy být možné částici za bariérou najít. Stav částice v kvantové mechanice popisujeme tzv. vlnovou funkcí, která musí být spojitá a musí mít spojitou první derivaci (tj. nesmí na ní být „špička“ či nějaký „zlom“). Pravděpodobnost, že částici najdeme v daném místě, je úměrná druhé mocnině absolutní hodnoty vlnové funkce. Ve velmi zjednodušeném modelu¹, kdy k bariéře přilétá volná částice, můžeme jako její vlnovou funkci vzít funkci sinus. V místě, kde začíná bariéra, nemůže vlnová funkce klesnout rovnou na nulu², pokud má zůstat spojitá se spojitou derivací. Klesá zde sice rychle (exponenciálně), ale přeci jenom má ještě kousek za začátkem bariéry docela velkou hodnotu. Pokud je bariéra dostatečně úzká, neklesne vlnová funkce na „praktickou“ nulu³ a díky tomu je vlnová funkce, a tedy i pravděpodobnost nalezení částice za bariérou nenulová (viz obrázek č. 1). S rozšiřující se bariérou klesá i pravděpodobnost nalezení částice za bariérou přibližně exponenciálně.

¹ Uvedený popis je extrémně zjednodušený, vlnová funkce je ve skutečnosti komplexní apod. Ale podstata matematického popisu je zde vystižena správně – je to důsledek našich požadavků na vlastnosti vlnové funkce.

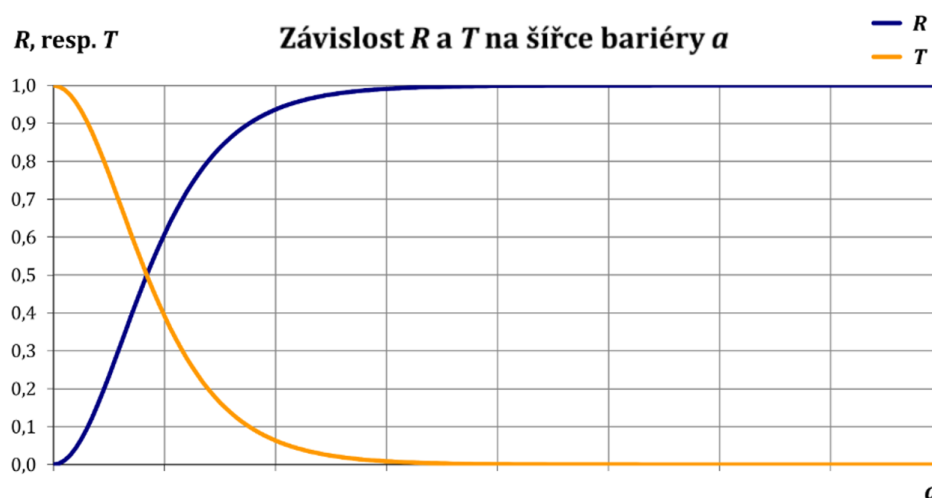
² Žáci by mohli namítnout, že v nule je přeci sinus nulový, tak stačí, aby nulový zůstal. Tím by ale nebyla splněna podmínka spojitě derivace, což jim málokdy takto na první pohled dojde.

³ Matematici vědí, že exponenciála není nulová nikdy, fyziky ale zajímají takové hodnoty, které jsou schopni měřením od nuly odlišit.



Obr. 1: Schéma poklesu vlnové funkce v bariéře a průběh za ní, na horním obrázku je šedivě naznačená bariéra příliš široká, vlnová funkce klesla „k nule“, spodní obrázek ukazuje úzkou bariéru, kterou částice může překonat [5]

Na obrázku č. 2 je graf znázorňující závislost pravděpodobnosti odrazu R a průchodu T pro částici (vodorovná osa je bez konkrétních hodnot, graf je pouze ilustrační), které popisují pravděpodobnost odrazu/průchodu částice. Platí $R + T = 1$.



Obr. 2: Graf závislosti R a T na šířce bariéry a [6]

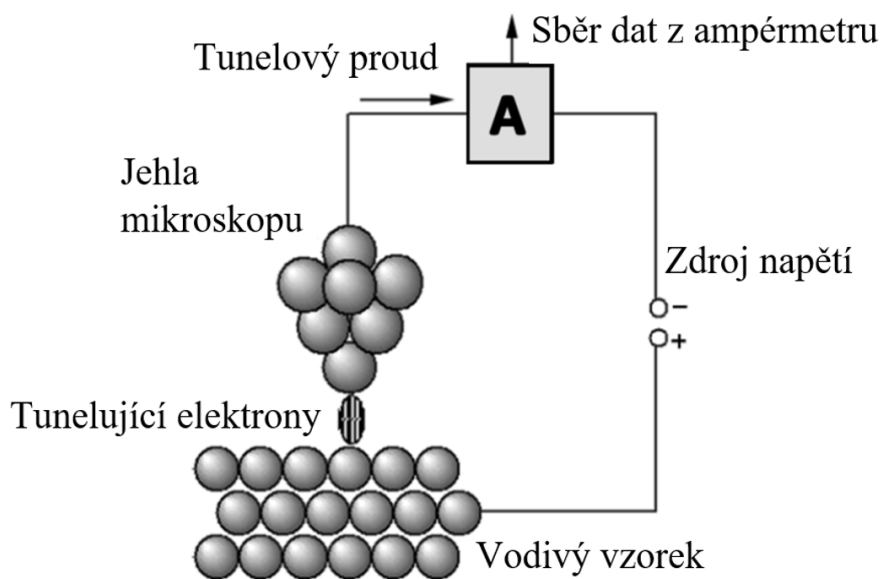
Pomocí teorie popisující tunelový jev bylo možno vysvětlit některé fyzikální jevy jako např. α rozpad atomových jader či termojadernou fúzi ve Slunci.

Rastrovací tunelový mikroskop

Rastrovací tunelový mikroskop (STM – scanning tunneling microscope) byl vynalezen roku 1981. S jeho pomocí můžeme vizualizovat struktury o velikosti srovnatelné s jednotlivými atomy.

Základní částí je sonda ve tvaru velmi ostré jehly, která má na špičce jediný atom. Pohyb této jehly je řízen pomocí piezokrystalu. Některé krystaly se deformují, pokud na ně připojíme elektrické napětí (tzv. piezoelektrický jev), mohou se tedy zvětšit či zmenšit. Změna velikosti krystalu je úměrná velikosti přiloženého napětí a dá se takto velmi přesně nastavovat poloha sondy.

Sonda se přiblíží k povrchu vzorku a jehla i zkoumaný vzorek jsou připojeny ke zdroji napětí (vzorek musí být elektricky vodivý). Obvod je rozpojený, protože mezi jehlou a vzorkem je mezera, a napětí rozhodně není dostatečné, aby zde proběhl výboj. Přesto obvodem prochází tzv. tunelový proud, jehož velikost se mění v závislosti na vzdálenosti vzorku a sondy (na šířce bariéry). Ampérmetr měří tunelový proud a v závislosti na změnách proudu upravujeme polohu sondy. Tomuto měření se pak říká měření s konstantním tunelovým proudem. Povrch vzorku potom získáme ze záznamu změn poloh sondy. Druhá možnost je ponechat sondu v konstantní výšce a povrch vzorku rekonstruovat z měnícího se tunelového proudu.

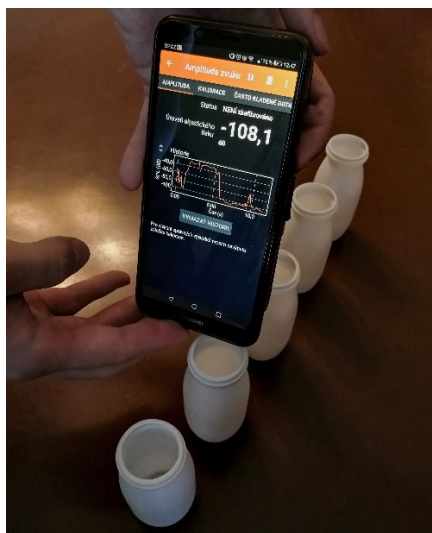


Obr. 3: Schéma rastrovacího tunelového mikroskopu [7]

Ještě se zamysleme, co to vlastně je povrch vzorku, pokud uvažujeme rozměry srovnatelné s atomy. Atom, to je tíhenné jádro uprostřed a „mrak“ elektronů okolo, pokud atomy tvoří např. krystal, pak se tyto „mraky“ jednotlivých atomů mohou spojit (to je podstata vzniku vazby mezi atomy). Pokud je sonda v místě, kde je elektronů více („mrak“ je zde hustší), pak je tunelový proud větší, a naopak. Tunelový mikroskop tedy mapuje tento elektronový mrak, který ale velmi dobře odpovídá rozložení jader/atomů.

Akustický model STM

V akustickém modelu STM kelímky od nápoje představují atomy na povrchu zkoumaného předmětu. Žáci budou měřit s použitím dvou telefonů (vysílače a přijímače), které budou držet blízko sebe. Telefony plní funkci jehly mikroskopu, tedy vysílač vysílá budící signál dané frekvence (odpovídající přivedenému napětí mezi jehlu STM a vzorek), přijímač analyzuje změnu hlasitosti signálu, která odpovídá změně tunelového proudu procházejícího jehlou STM. Naplníme-li kelímky z části vodou, změníme tím jejich rezonanční frekvenci. Takové kelímky představují atomy odlišné od atomů, které znázorňují kelímky prázdné. Budou reagovat méně na budící frekvenci vysílače, protože se nejedná o jejich rezonanční frekvenci. Analogicky při daném napětí se pro různé atomy na povrchu vzorku liší tunelový proud procházející jehlou STM.



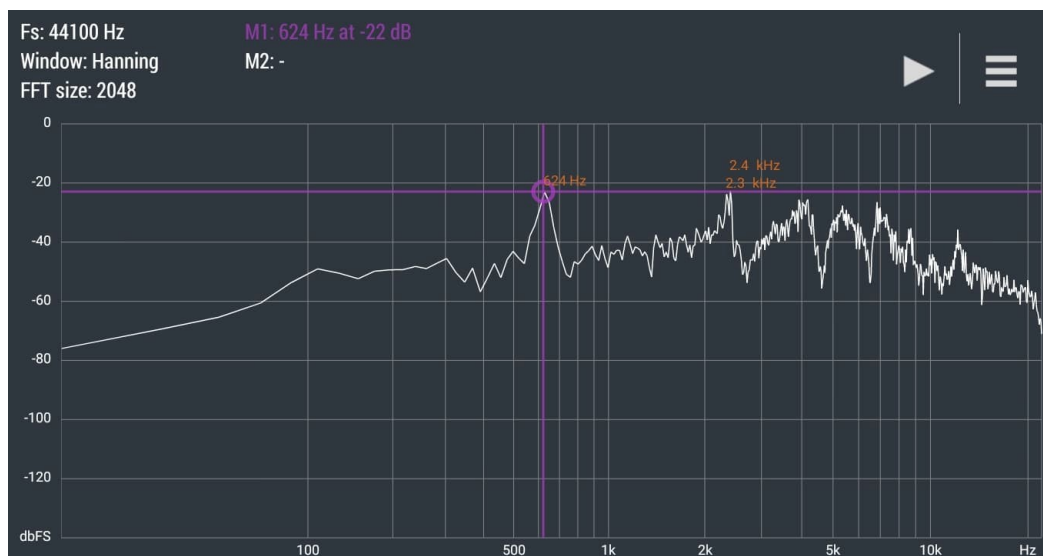
Obr. 4.: Akustický model STM s pěti kelímky (atomy), telefon s viditelnou obrazovkou je přijímač, druhý telefon (skrytý za prvním) je vysílač, mikrofon přijímače a reproduktor vysílače se nacházejí v těsné blízkosti kelímků

Jak bylo řečeno, existují dva základní módy měření: mód konstantního tunelového proudu a konstantní výšky. Pro měření v módu konstantního proudu je nutno mít v obvodu zpětnovazební smyčku, která mění vzdálenost sondy a vzorku tak, aby se udržovala konstantní hodnota proudu. V naší analogii by to znamenalo aktivně pohybovat telefony tak, aby se neměnila hlasitost vysílaného zvuku, což je velmi náročné. Tato metoda je zmíněna pouze v bonusové úloze č. 7. V módu konstantní výšky měříme proměnný tunelový proud. V našem pokusu budeme telefon, který bude sloužit jako přijímač, držet ve stálé výšce nad lahvičkami a na telefonu budeme pozorovat změny hlasitosti zvuku. V naší analogii hlasitost zvuku při dané frekvenci odpovídá tunelovému proudu při daném připojeném napětí. Detekování maxim hlasitosti zvuku odpovídá lokalizaci jednotlivých atomů.

Popis vybraných úloh a vzorové výsledky

Úloha č. 2: Určení frekvence, kterou prázdná lahvička zesiluje

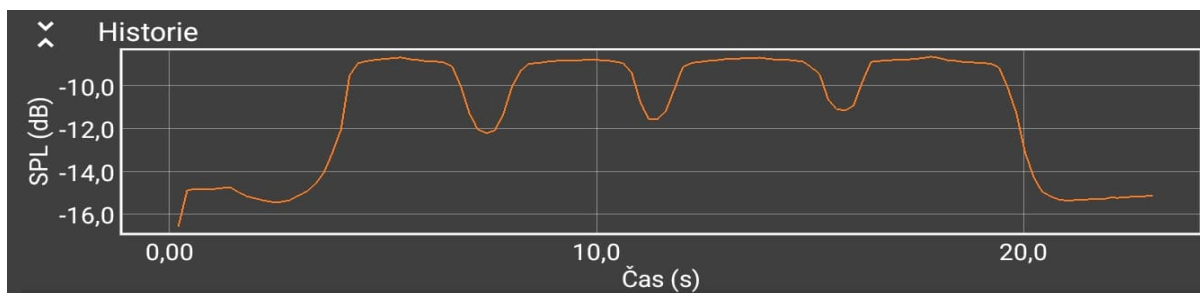
Žáci určí rezonanční frekvenci kelímku. Tuto frekvenci nastaví na zdroji zvuku a budou s ní měřit další úlohy. V analogii by toto odpovídalo stanovení napětí STM. Typické hodnoty rezonančních frekvencí kelímků se pohybují v rozmezí 610 Hz až 635 Hz.



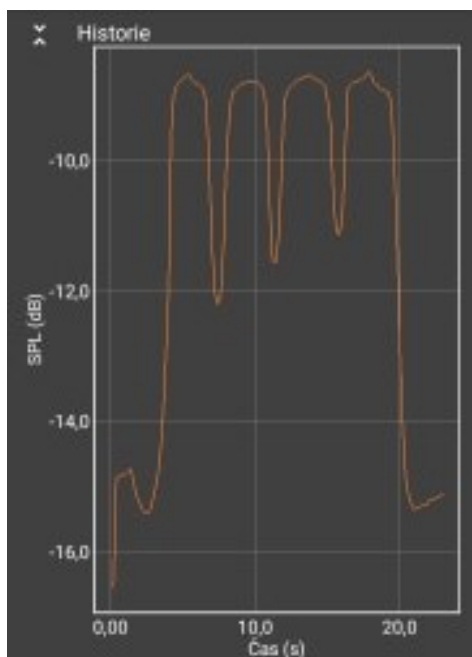
Obr. 5.: Spektrální analýza bílého šumu po zesílení kelímkem pomocí aplikace Advanced Spectrum Analyzer PRO se zvýrazněnou rezonanční frekvencí

Úloha č. 3, 4: Měření v módu konstantní výšky, měření s „různými atomy“

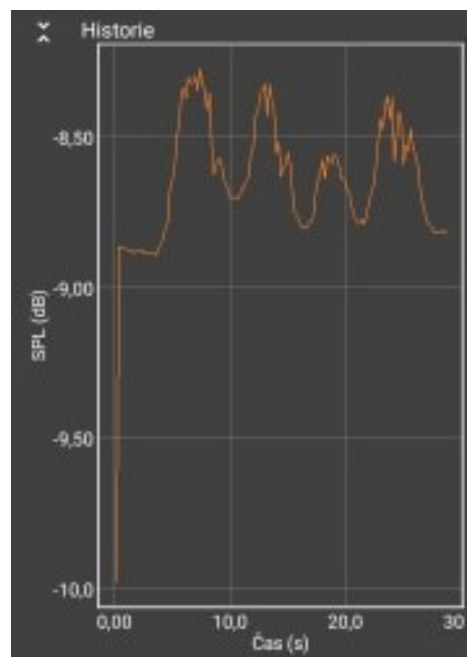
Ve třetí úloze žáci naskenují čtyři až pět kelímků v řadě v módu konstantní výšky (drží telefony ve stejné výšce nad kelímky a rovnoměrně zaznamenávají hlasitost zvuku). Ve čtvrté úloze měření opakují, ale naplní jeden z kelímků vodou. Tím změní jeho rezonanční frekvenci, což se projeví ve grafu jako „snížené“ maximum, tj. zvuk tímto kelímkem nebude tolik zesílený. Obrázky 6 až 9 ukazují typické výsledky těchto měření.



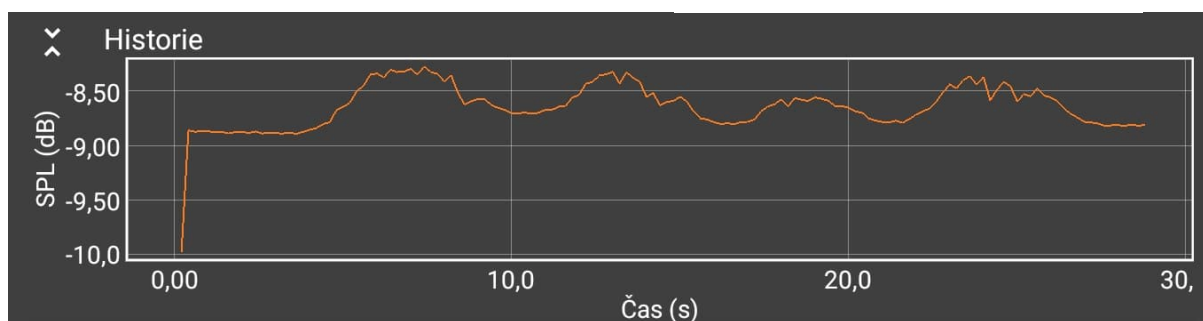
Obr. 6: Měření hlasitosti zvuku s čtyřmi kelímký (telefon držen vodorovně)



Obr. 7: Měření hlasitosti s čtyřmi kelímký (telefon držen svisle)



Obr. 8: Měření hlasitosti zvuku s čtyřmi kelímký a s třetím kelímkem naplněným vodou (telefon držen svisle)



Obr. 9: Měření hlasitosti zvuku s čtyřmi kelímký a s třetím kelímkem naplněným vodou (telefon držen vodorovně)

Pokyny k úloze č. 5: Naměření a interpretace „skutečných“ výsledků

Žáci mají za úkol získat a interpretovat data z měření neznámé struktury.

- Počkejte, až se všechny skupiny dostanou k úloze č. 5. Samy by se měly přihlásit.
- V případě nejednotnosti v tempu práce skupin mohou rychlejší skupiny začít úlohu č. 6 nebo zkusit bonusovou úlohu č. 7.
- Sesbírejte kelímký od všech skupin a rozmístěte je do matice 4×4. Můžete využít pěnové šablony (viz obrázek 10). Hrdla kelímků vsuňte do připravených děr.



Obr. 10: Matice kelímků (atomů) 4×4 s pěnovou šablonou

- d. Následně některé kelímky (3 až 5 kusů) naplňte do poloviny vodou. Na to, které kelímky plníte, by se skupinky neměly dívat. Plnit je můžete zcela náhodně. Matici zakryjte látkou a odkryjte ji, až bude skupina připravena k měření. Žákům řekněte, aby si při měření klekli/sedli, nebo aby se postavili k matici tak, aby hned neviděli přímo do kelímků, čímž by byl prozrazen výsledek. Může pomoci také lehké zatemnění místnosti.
- e. Rozdělte skupinkám pořadová čísla. V tomto pořadí pak budou jednotlivé skupinky hledat odlišné atomy (naplněné kelímky) v matici a zaznamenají si jejich polohu. Hlíďte jejich tempo, každá skupinka má maximálně dvě minuty na měření. Pokud žákům při měření např. příliš vysoká hodnota hlasitosti zdeformovala graf (výrazně změnila automatické měřítko), poradte jim, aby na graf klikli a analyzovali neporušené hodnoty.
- f. Až všechny skupiny skončí měření, srovnajte výsledky měření s maticí.
- g. **Alternativa:** Pokud zakryjeme matici látkou, nebude dovnitř kelímků vidět. Zvuk bude procházet látkou⁴, ale rozdíly hlasitosti budou velmi těžko měřitelné. V tomto případě je vhodné žáky instruovat, aby postupovali podobně, jako v úloze 2: vysílat bílý šum a sluchem rozlišovat rezonanční frekvence, odlišení plných a prázdných kelímku je takto zřetelnější. Toto by odpovídalo několikanásobnému měření STM s různým napětím a následnou analýzou výsledků.

Úloha č. 6: Interpretace naměřených výsledků

Žáci mají za úkol z grafu měření hlasitosti zvuku v závislosti na čase, který mají ve svém zadání, určit, jak by mohla vypadat struktura, která by odpovídala naměřeným hodnotám.

Snímaná struktura byla matice kelímků 4×4, kdy kelímky byly naplněny tak, aby tvořily vzor šachovnice (levý horní roh byl prázdný). Tento model by mohl představovat např. vrstvu

⁴ Papír, i velmi tenký, tlumí zvuk již příliš.

krystalu Cu_3Au (aurikuprid). „Správných“ odpovědí je více, ale musí být dostatečně odůvodněny. Např. je možné interpretovat měření tak, že jehla mikroskopu se pohybovala z levého horního rohu směrem doprava, pak o řádek dolů a doleva atd. Tímto způsobem byl nasnímaný vzorek ve skutečnosti pořízen. Výsledkem je šachovnice s „prázdným“ levým horním rohem. Orientace šachovnice se může lišit dle předpokladu pohybu jehly mikroskopu. Lze ale také uvažovat takové měření, kdy se po naskenování řádku jehla vrátila na začátek řádku druhého, pak předpokládaná struktura by měla mít dva černé a dva bílé sloupce (pořadí opět závisí na předpokladu toho, kde jehla pohyb započala). Další možnost je, že struktura je lineární, avšak proti tomuto vysvětlení naměřeného grafu mluví větší mezery mezi skupinami maxim. Pomocí otázek je vhodné studenty dovést k tomu, že toto vysvětlení není příliš dobré. Významnost této úlohy je záměrná a argumentace odpovědí je zde proto klíčová. Je vhodné na nápady studentů navázat diskuzí, např. o tom, že pro interpretaci naměřených dat je třeba dobře znát celý proces měření.

Dále navazuje úkol, kdy žáci mají srovnat jejich interpretaci naměřených dat s jinou strukturou naměřenou s pomocí STM a určit, v čem všem se mohou tyto struktury lišit. Výsledky úkolu se opírají o předchozí odpovědi žáků. Nejvýraznějším rozdílem by mělo být, že atomy zobrazené struktury jsou oproti předchozímu případu všechny stejné.

Úloha č. 7.: (Bonusový úkol) Měření v módu konstantního proudu

V této úloze se žáci budou snažit při měření kelímků o takový pohyb obou telefonů, aby graf hlasitosti zvuku byl konstantní. I když je tento mód v našem modelu poměrně špatně realizovatelný, oproti módu konstantní výšky, ve skutečném měření STM se používá hojně. Cílem je si vyzkoušet princip tohoto měření.

Zdroje a doporučená literatura

Zde jsou uvedeny použité zdroje a doporučená literatura pro zájemce o podrobnější informace. Stránky [1] popisují principy STM, jsou však v angličtině. V anglickém jazyce je i zdroj [2], který popisuje akustickou analogii STM a tzv. analogii vycházkové hole. Skripta [3] se věnují podrobnému matematickému popisu tunelového jevu, potenciálových bariér a dalších jednoduchých kvantových systémů. Diplomová práce [4] poskytuje popis akustické analogie v češtině. Dále popisuje práci s uvedenými aplikacemi. Poté jsou uvedeny zdroje použitých obrázků.

- [1] Scanning tunneling microscopy. *NanoScience Instruments* [online]. © 2020 Nanoscience Instruments. Poslední změna 17. 7. 2020 [Cit. 17. 7. 2020]. Dostupné z: <https://www.nanoscience.com/techniques/scanning-tunneling-microscopy/>
- [2] EULER, Manfred. *Getting in touch with the nanoworld: Hands-on experiments and models to visualize nanoscale structures* [online]. Science and technology Education for the 21st Century, 2014 [Cit. 17. 7. 2020]. Dostupné z: 10.13140/2.1.1728.2881.
- [3] KOUPILOVÁ, Zdeňka. *Kapitola 3: Jednodimenzionální jednoduché systémy*. Skripta k předmětu Kvantová mechanika [online]. Poslední změna 11. 12. 2019 [Cit. 25. 8. 2020]. Dostupné z: <https://kdf.mff.cuni.cz/vyuka/kvantovka/QM03-JednoducheSystemy.pdf>
- [4] SMETANOVÁ, Olga. *Jednoduchá fyzikální měření s tabletem nebo chytrým telefonem*. Olomouc, 2019. Diplomová práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Katedra experimentální fyziky.
- [5] Schematic of electron wavefunction. [schéma]. In: Scanning tunneling microscopy. *NanoScience Instruments* [online]. © 2020 Nanoscience Instruments. Poslední změna 17. 7. 2020 [Cit. 17. 7. 2020]. Dostupné z: <https://www.nanoscience.com/techniques/scanning-tunneling-microscopy/>
- [6] Obrázek 14: Koeficienty odrazu R a průchodu T v závislosti na šířce bariéry a pro případ $0 < E < V_B$ [obrázek]. In: KOUPILOVÁ, Zdeňka. *Kapitola 3: Jednodimenzionální jednoduché systémy*. Skripta k předmětu Kvantová mechanika [online]. Poslední změna 11. 12. 2019 [Cit. 25. 8. 2020]. Dostupné z: <https://kdf.mff.cuni.cz/vyuka/kvantovka/QM03-JednoducheSystemy.pdf>
- [7] Feedback loop and electron tunneling for scanning tunneling microscopy (STM). [obrázek]. In: Scanning tunneling microscopy. *NanoScience Instruments* [online]. © 2020 Nanoscience Instruments. Poslední změna 17. 7. 2020 [Cit. 17. 7. 2020]. Dostupné z: <https://www.nanoscience.com/techniques/scanning-tunneling-microscopy/>
- [8] 3D rendered Scanning Tunneling Microscope image of atoms. [obrázek]. In: Scanning tunneling microscopy. *NanoScience Instruments* [online]. © 2020 Nanoscience Instruments. Poslední změna 17. 7. 2020 [Cit. 17. 7. 2020]. Dostupné z: <https://www.nanoscience.com/techniques/scanning-tunneling-microscopy/>

Akustická analogie rastrovací tunelové mikroskopie (STM)

V rámci tohoto experimentu si přiblížíte princip rastrovacího tunelového mikroskopu. Tento přístroj se používá při zkoumání struktur o velikosti srovnatelné s velikostí atomů.

Pomůcky: 4-5 prázdných lahviček od nápoje Actimel, voda, dva chytré telefony

1. Instalace aplikací

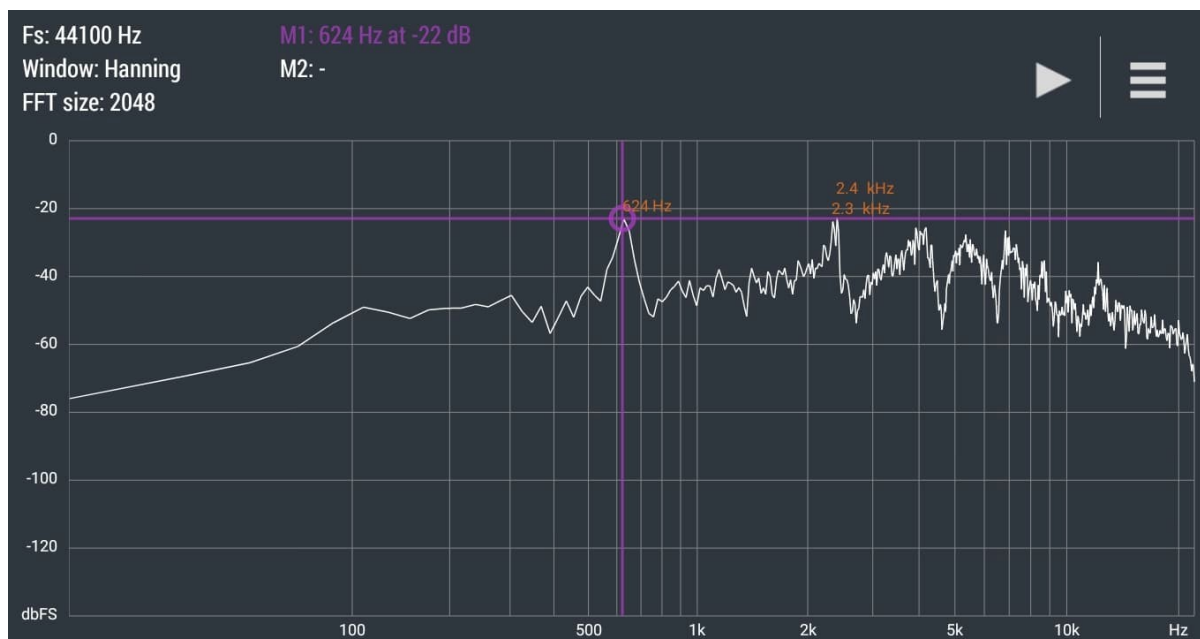
- a. V průběhu měření budete používat dva telefony – jeden telefon bude sloužit jako zdroj zvuku (vysílač) a druhý jako přijímač, nainstalujte na ně potřebné aplikace (viz manuál).
- b. Pročtěte si manuál k aplikacím.

V akustickém modelu STM budou kelímky představovat atomy na povrchu zkoumaného předmětu. Telefony budou plnit funkci jehly mikroskopu. Vysílač bude vysílat budící zvukový signál dané frekvence (odpovídající přivedenému napětí mezi jehlu STM a předmět), přijímač bude analyzovat změny hlasitosti (odpovídající změně tunelového proudu procházející jehlou STM). V rámci následujících šesti úkolů si přiblížíte různé situace, které mohou nastat při měření pomocí STM.

2. Určení frekvence, kterou prázdná lahvička zesiluje

Aby bylo možné pozorovat atomy dané struktury, je nejprve důležité zvolit vhodné napětí přivedené mezi vzorek a jehlu atomu. V naší analogii to znamená zvolit zvuk vhodné budící frekvence, kterou nyní určíte.

- a. Na prvním telefonu (vysílači) otevřete aplikaci Function generator a nastavte ji pro vysílání bílého šumu.
- b. Na druhém telefonu (přijímači) otevřete aplikaci Advanced Spectrum Analyzer PRO. Oba telefony držte tak, aby reproduktor vysílače a mikrofon přijímače byly blízko sebe a umístěte je nad jednu z lahviček. Zesílení signálu by mělo být uchem slyšitelné. Sledujte maxima, které se v přijímaném spektru objeví. Jak se tyto zesílené frekvence nazývají? _____
- c. Očekávejte maximum v oblasti kolem 620 Hz. Pokud není maximum výrazné, upravte hlasitost vysílaného signálu. Tato nevýraznost je často způsobena vysokou hlasitostí.
- d. Naměřenou frekvenci maxima si zapište, bude s ní prováděno další měření.
Maximální hlasitost má zvuk s frekvencí _____ Hz.



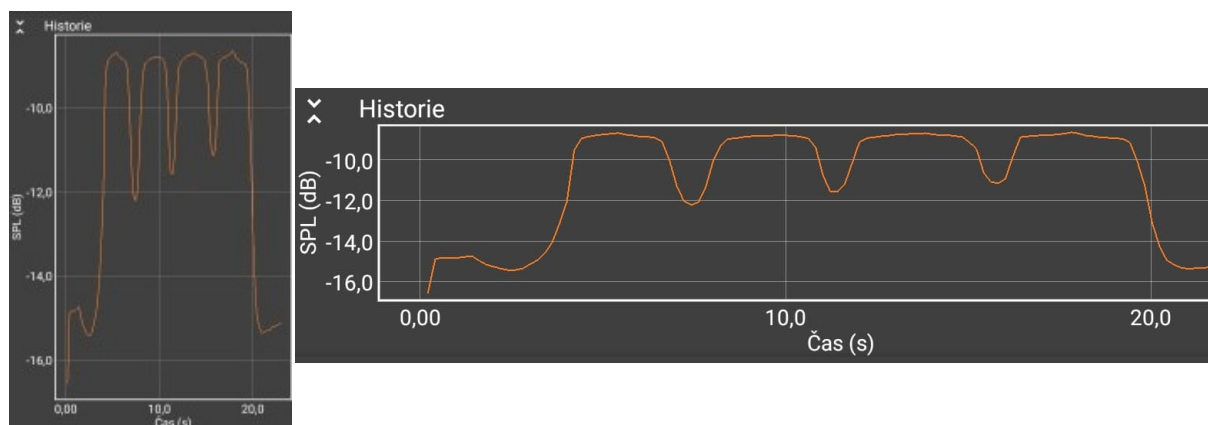
Obr. 1: Spektrální analýza bílého šumu po zesílení kelímkem pomocí aplikace Advanced Spectrum Analyzer PRO (ukázka výsledku měření)

3. Měření v módu konstantní výšky

Nyní si vyzkoušíte oskenovat si jednoduchou strukturu, skládající se ze stejných „atomů“.

- Kelímky od nápoje Actimel rozmístěte do řady s asi 5cm rozestupy.
- Na telefonu „vysílači“ otevřete aplikaci Function Generator a nastavte frekvenci vysílaného signálu rovnu rezonanční frekvenci, kterou jste zjistili v předchozím úkolu.
- Na druhém telefonu otevřete aplikaci phyphox.
- Oba telefony držte blízko sebe tak, abyste viděli na obrazovku přijímače a aby byl reproduktor vysílače a mikrofon přijímače směrem ke kelímkům.
- Telefony přiblížte k řadě kelímků, na vysílači zapněte tón o rezonanční frekvenci a na přijímači zapněte měření.
- Oběma telefony pohybujte **rovnoměrně** nad řadou kelímků, snažte se co nejlépe udržet stále **stejnou výšku** nad kelímky. Pokud máte nejisté ruce, můžete vedle kelímků postavit sloupec knih, o které si telefony opřete. Je vhodné si pohyb s telefony nejprve nacvičit nebo několikrát zopakovat, aby byl dostatečně pomalý a plynulý. Pohybujte se blízko kelímků a dostatečně pomalu, aby čas snímání byl asi 20 s. Co slyšíte? Co pozorujete? Popište:

- g. Po nasnímání řady zastavte měření a prohlédněte si výsledný graf. Graf by měl vypadat podobně jako na obrázcích 2 a 3 (v závislosti na poloze v jaké držíte telefon a na počtu kelímků, se kterými měříte). Do prázdného místa pod obrázeky načrtněte graf z vašeho měření.



Obr. 2 a 3: Měření hlasitosti zvuku s čtyřmi kelímký, kdy je telefon držen svise (vlevo) a vodorovně (vpravo)

V grafu můžete pozorovat změny hlasitosti zvuku. Čemu v naší analogii by tyto změny odpovídaly? Napište:

4. Měření s „různými atomy“

Pozorované struktury se nemusí skládat z jednoho prvku. Elektrony v atomech různých prvků reagují na přivedené napětí v STM různě. Atomy se při neměnném napětí budou odlišovat velikostí tunelového proudu, který prochází jehlou STM při jejich skenování. Teď si toto chování namodelujeme.

- a. Kelímky opět umístěte do řady s rozestupy 5 cm. Jeden z kelímků, který nestojí na kraji řady, naplňte asi do poloviny vodou.
- b. Dále postupujte stejně jako v předchozí úloze (tj. od bodu 3.b.).
- c. Do prázdného místa nakreslete graf vašeho měření.

- d. Liší se výsledný graf od grafu z předchozího měření? Jak? Byl tento rozdíl pozorovatelný i jinak? Popište:

5. Naměření a interpretace „skutečných“ výsledků

Nyní se pokusíte získat informaci o rozložení lahviček nejenom v řadě, ale v nějaké ploše. A to bez předchozí znalosti jejich polohy.

- a. Tento úkol budete dělat společně s ostatními skupinami. Oznamte vyučujícímu, že jste dospěli k této úloze.
- b. Až budou všechny skupiny připraveny, rozmístí vyučující všechny kelímky ze všech skupin do matice 4×4 a některé naplní částečně vodou.
- c. Nyní pomocí toho, co jste se naučili, zjistěte, jak vypadá neznámá struktura, tj. které kelímky jsou prázdné a které v sobě mají vodu. Snažte se do kelímků při měření nedívat, abyste neodhalili odlišné atomy předčasně. Měřte tak, abyste měli oči přibližně v úrovni kelímků. Pokud někdo ze skupiny uvidí vodu v kelímku, nenahlašuje to zbytku skupiny. Před vlastním měřením si rozmyslete ve skupince strategii měření, např. jakým směrem

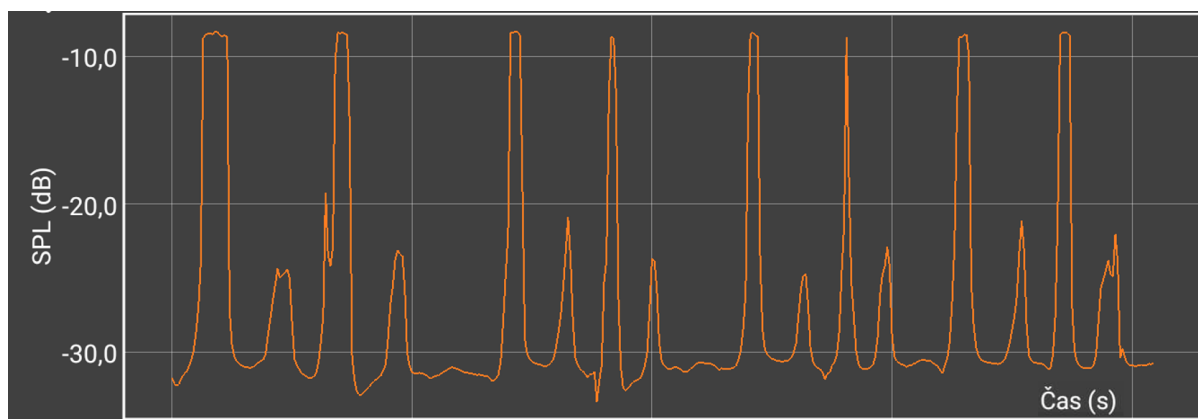
budete snímat matici. Vaše samotné měření by mělo trvat méně než dvě minuty. K matici přistupujte po skupinkách postupně.

- d. Zapište si postup měření i výsledky svého pozorování.
- e. Poté, co všichni doměří, si porovnejte výsledky mezi sebou a srovnejte je se skutečností, tedy s maticí kelímků.

6. Interpretace naměřených výsledků

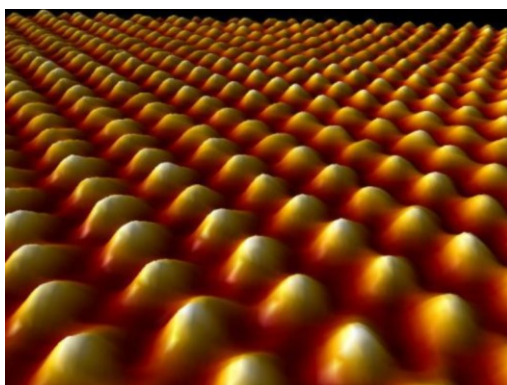
Při měření pomocí rastrovacího mikroskopu samotné atomy nevidíme a jejich polohu či různorodost musíme zpětně určovat ze získaných dat. Tento postup si teď vyzkoušíte.

- a. Na obrázku 4 je naměřený graf. Nejprve popište jeho průběh a poté se pokuste vymyslet strukturu, kterou by mohl zobrazovat. Je těchto možností více? Uvažujte i různé možnosti, jak se mobil (jehla) mohl při měření pohybovat.



Obr. 4: Naměřená data ze skenování neznámé struktury

Na obrázku 5 je grafické znázornění dat z měření jiné struktury, změřené s pomocí STM. V čem všem se tato struktura může lišit od té, která byla použita pro získání dat v obrázku 4?



Obr. 5: Grafické znázornění výsledků měření STM [8]

7. (Bonusový úkol) Měření v módu konstantního proudu

Řádkovací tunelový mikroskop se častěji provozuje v tzv. módu konstantního tunelového proudu, kdy je vzdálenost mezi atomy a jehlou mikroskopu průběžně upravována. Piezoelektrické krystaly přibližují jehlou mikroskopu k atomům, či ji vzdalují dál od nich tak, aby tunelový proud zůstal stále stejný.

- a. Pokuste se některou z úloh 2 nebo 3 měřit tímto způsobem. Snažte se o takový pohyb obou telefonů, aby graf hlasitosti byl konstantní. Uvědomujte si při tom pohyby vašich rukou, vhodně je zaznamenávejte.

I když je tento mód v našem modelu poměrně špatně realizovatelný, oproti módu konstantní výšky, ve skutečném měření STM se používá hojně.

Akustická analogie rastrovací tunelové mikroskopie (STM)

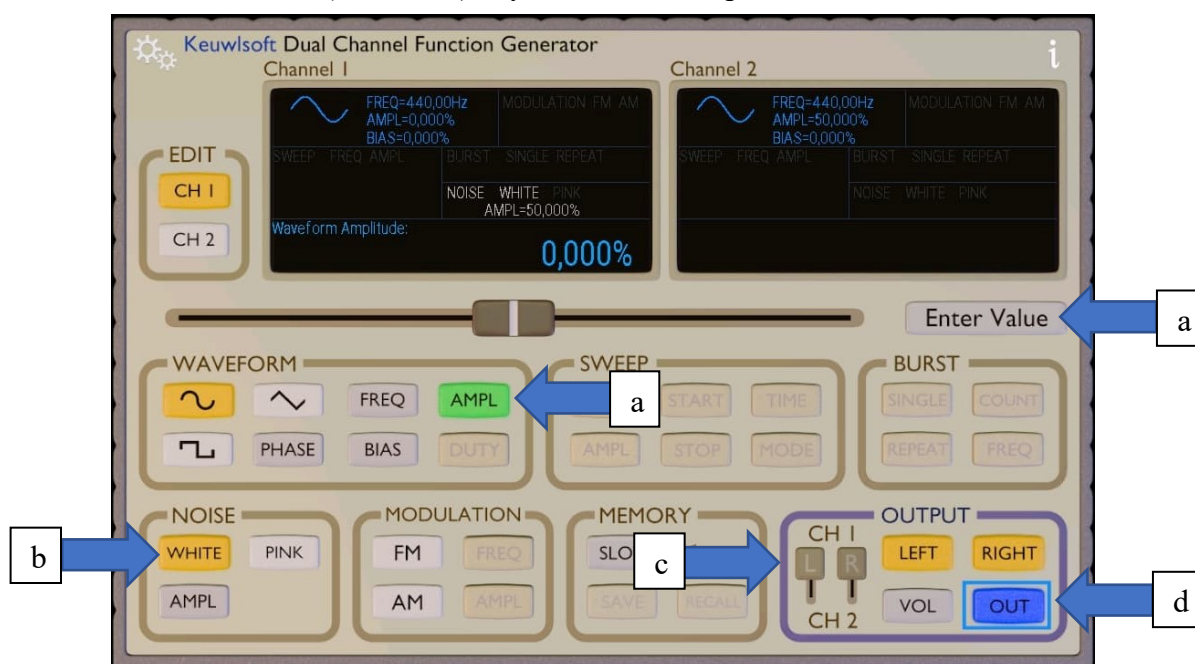
(Manuál k aplikacím)

Do telefonu, který budete používat jako vysílač, si nainstalujte aplikaci: Function Generator by keuwlsoft (generátor zvuku).

Do telefonu, který budete používat jako přijímač, si nainstalujte aplikace: phyphox by RWTH Aachen University (analýza hlasitosti zvuku se záznamem), Advanced Spectrum Analyzer PRO by Vuche Labs (zvukový spektrální analyzátor).

1. Nastavení bílého šumu v aplikaci Function Generator

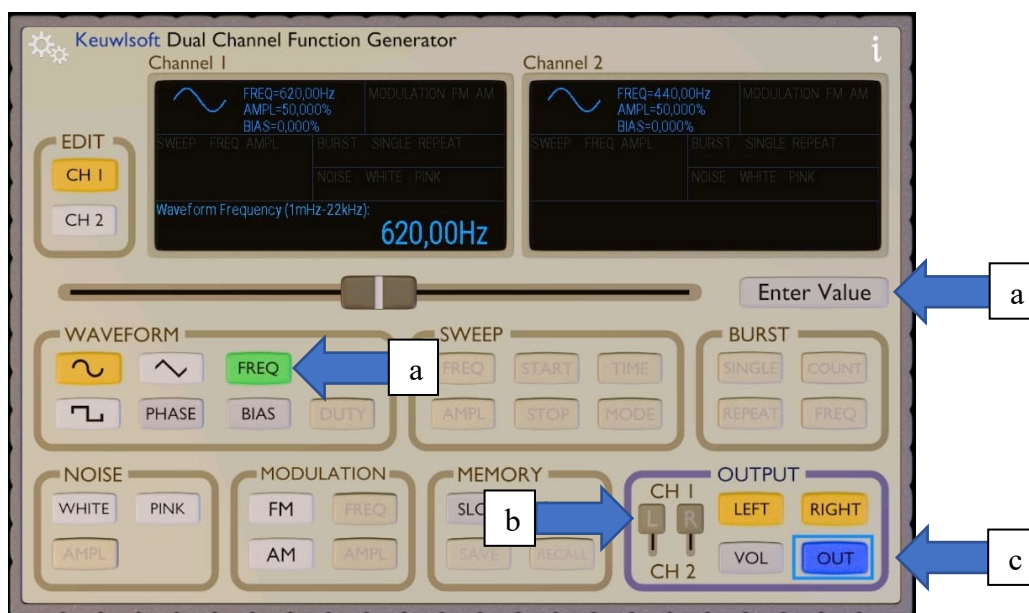
- Otevřete aplikaci Function Generator, snižte amplitudu výstupního signálu na 0 % pomocí AMPL (WAVEFORM) a posuvníku či tlačítka Enter Value.
- Klikněte na White (NOISE). Telefon zatím zvuk nevydává.
- V sekci output nastavte výstupy (L a R) na Channel 1 (CH1).
- Klikněte na OUT (OUTPUT). Nyní bude telefon produkovat zvuk – šumění.



Obr. 1: Aplikace Function Generator s nastavením white noise, písmena odpovídají označení kroků při nastavování popsaném nad obrázkem

2. Nastavení frekvence v aplikaci Function Generator

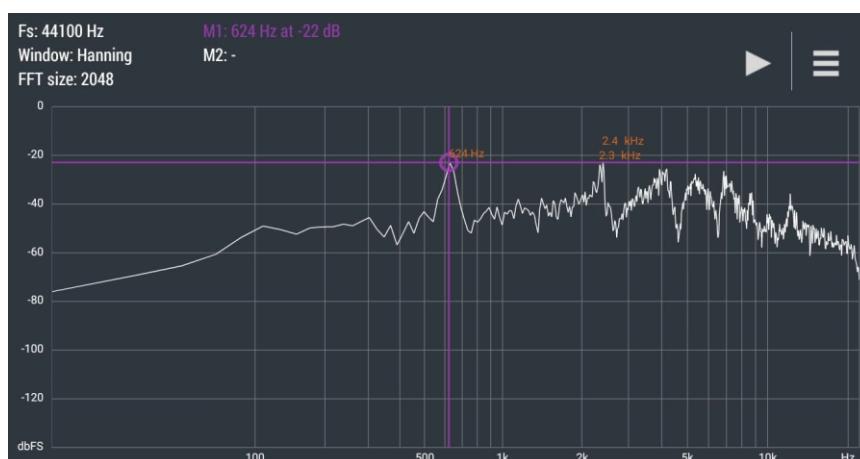
- Otevřete aplikaci Function Generator. Pokud máte aplikaci již otevřenou a zůstalo vám nastavení bílého šumu, pak aplikaci ukončete a otevřete znovu, sama se uvede do základního nastavení. Nastavte požadovanou frekvenci vysílaného signálu pomocí tlačítka **FREQ** (WAVEFORM) a posuvníku či tlačítka **Enter Value**.
- V sekci **output** nastavte výstupy (L a R) pomocí posuvníků na **Channel 1 (CH1)**.
- Klikněte na **OUT** (OUTPUT). Nyní bude telefon vydávat zvuk – pískat na zadané frekvenci.



Obr. 2: Aplikace Function Generator s nastavenou frekvencí 620 Hz, písmena odpovídají označení kroků při nastavování popsaném nad obrázkem

3. Práce s Advanced Spectrum Analyzer PRO

- Otevřete aplikaci Advanced Spectrum Analyzer PRO. Aplikace by měla automaticky zobrazovat spektrum přijímaného zvukového signálu.
- Během měření se chceme zaměřit na nejvýraznější frekvenci, tj. tu, která má ve spektru maximum. Klikněte na tlačítko pauzy (dvě svislé čáry v pravém rohu obrazovky), které se po kliknutí změní v trojúhelníček (viz obr. 3). Pokud není zmíněné maximum popsané svojí hodnotou, dvakrát na něj klikněte a objeví se posuvník, který můžete posunout na maximum a zjistit jeho frekvenci. Tuto frekvenci zadáváme do výše zmíněné aplikace Function Generator.



Obr. 3: Spektrální analýza zvuku pomocí aplikace Advanced Spectrum Analyzer PRO

4. Měření amplitudy zvuku pomocí aplikace phyphox

- Otevřete aplikaci phyphox. V sekci Akustika otevřete funkci Amplituda zvuku. Funkci není třeba kalibrovat, protože nám stačí pouze relativně srovnávat intenzity zvuků, přesné hodnoty nejsou důležité.
- Stiskněte tlačítko start (trojúhelník vpravo nahoře, který se poté změní na dvě svislé čáry) a aplikace začne sbírat a zobrazovat data.
- Pro skončení měření klikněte na tlačítko pauzy (dvě svislé čáry). Natočením telefonu lze zvětšit graf na větší část obrazovky. Kliknutím na graf si můžete upravovat měřítka os či si detailněji prohlédnout některé jeho části.



Obr. 4.: Měření hladiny akustického tlaku pomocí aplikace phyphox

Fotoelektrický jev s plechovkami

(text pro učitele)

Pomůcky obsažené v kufříku: hliníková plechovka, plechovka se stojánkem z kelímku, proužek alobalu s drátkem (kancelářskou sponkou), alobalové třísně, PVC trubka, králičí kožka, LED ruční svítilny (silná a slabá), UV svítilna 365 nm, černá žárovka 75W, UVB zářivka, UVC ruční lampička, kádinka, brusná houbička, polystyrenová destička, napájecí kabel s velkou obímkou, napájecí kabel s hliníkovým reflektorem, fén, pracovní list, text pro učitele

Teorie v několika větách

Aby elektron unikl z materiálu, potřebuje absorbovat kvantum energie, které musí být alespoň rovno tzv. výstupní práci W_0 . To, znamená, že fotony použitého záření musejí mít dostatečnou energii. Energie fotonu je přímo úměrná frekvenci záření, takže záření musí mít dostatečnou frekvenci.

Je-li povrch tělesa (zde hliníkových plechovek) záporně nabitý, může se po osvětlení vhodným zářením uvedeným způsobem začít vybíjet. Je-li ale nabitý kladně, případné uvolnění elektronu by kladný náboj ještě zvýšilo, tj. k vybíjení díky záření nedochází.

Co by žáci měli znát

Žáci by z elektrostatiky měli znát postup, jak můžeme plechovku nabít záporně i kladně (pomocí různých materiálů, či pomocí elektrostatické indukce) a vodivostní vlastnosti vodičů a izolantů.

Dále se předpokládá, že byli předem seznámeni s „částicovou povahou světla“, tj. s existencí fotonů, vztahem mezi frekvencí, vlnovou délkou a energií. V rámci pracovních listů je jim to připomenuto.

S principem fotoelektrického jevu se žáci mohou seznámit před, nebo v průběhu samotného experimentování. Podle zvolené možnosti má pokus funkci „experimentálního objevování“, nebo ověření poznatků fotoelektrického jevu.

Poznámka k žákovským listům

V žákovských pracovních listech se nacházejí otázky z elektrostatiky, které jsou označeny jako nepovinné a měly by sloužit jako opakování základních poznatků. Je na učiteli, zda se rozhodne vyžadovat od žáků odpovědi i na tyto otázky.

Poznámky k žákovskému provedení pokusu a bezpečnosti

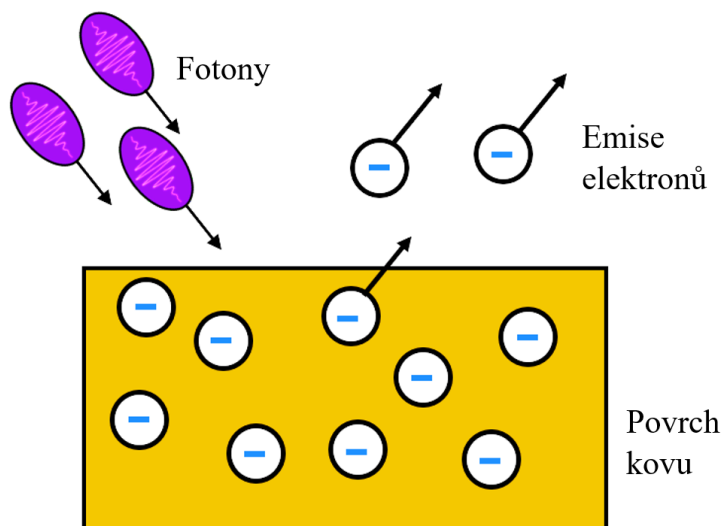
Pokud pokus provádějí žáci, pak vzhledem k platným bezpečnostním pravidlům **učitel musí** žákům zašroubovat černou UV žárovku/UVB zářivku do objímek, napájecí kabely zapojovat do zásuvky, a poté osvětlit plechovku po dobu cca 5 až 10 s jednotlivými zdroji. Toto žáci nesmějí provádět samostatně. UV žárovka využívá velkou objímku a zářivka UVB využívá **objímku s reflektorem**. Reflektorem mířte pouze na plechovku. Ruční lampička vyzařuje UVC záření, které je tzv. germicidní (ničící bakterie) a na lidský organismus má nepříznivý vliv. Vyhněte se jakémukoliv osvětlení pokožky UVC zářením a v žádném případě **si neposvíťte UVC svítílnou do očí**. Zdroje záření mohou být i po krátkém použití horké, dbejte zvýšené opatrnosti.

Teorie podrobněji

Vnější fotoelektrický jev (vnější fotoefekt) je jev, kdy se vlivem záření elektrony uvolňují ven z materiálu. Jsou-li elektrony uvolňovány uvnitř materiálu (vnitřní fotoelektrický jev), mohou se podílet na vedení elektrického proudu. Toho se využívá v polovodičích (fotodiody), fotonásobičích, fotometrech, expozimetrech, systémech automatické ochrany apod.

Fotony dopadající na materiál jsou pohlcovány elektrony (viz obr. 1), 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, např. hliník, ze kterého jsou vyrobeny plechovky pro experimenty, má výstupní práci rovnu přibližně 4,1 eV. Fotony s touto energií odpovídají záření o vlnové délce přibližně 300 nm (jedná se o lidským okem nezachytitelné tzv. blízké ultrafialové záření). Tato vlnová délka se nazývá mezní a značí se λ_0 . Fotony viditelné části spektra nemají dostatečnou energii, aby elektron mohl být emitován z povrchu hliníku. Záření černé žárovky a UV svítilny, UVA s vlnovými délkami 320–400 nm, je též nedostačující. UVB záření s vlnovými délkami 280–320 nm je teoreticky dostačující pro pozorování tohoto jevu, pokud zářič bude mít dostatečnou intenzitu i pro nejnižší vlnové délky patřící do uvedeného intervalu. Při osvětlení hliníku UVC zářením s vlnovými délkami 200–280 nm dojde k fotoefektu vždy.

Pokud nabitou plechovku přikryjeme skleněnou kádinkou, která je pro UV záření neprostupná, pak na plechovku UV záření nemá vliv.



Obr. 1: Schéma vnějšího fotoefektu

Rovnice

Energie fotonů závisí přímo úměrně na frekvenci vlnění f či nepřímo úměrně na jeho vlnové délce λ . Platí

$$E_f = hf = \frac{hc}{\lambda},$$

kde E_f je energie fotonu, $h \cong 6,63 \cdot 10^{-34}$ J s je Planckova konstanta a c je rychlost světla ve vakuu.

Einsteinova rovnice vyjadřuje maximální kinetickou energii E_k vyraženého elektronu a má tvar

$$E_k = hf - W_0.$$

Za předpokladu, že je E_k nulová, lze z této rovnice snadno určit mezní frekvenci. Tato rovnice není pro provedení experimentu klíčová a je možné ji vynechat.

Historie

Vysvětlení fotoefektu vychází z částicové povahy světla. Byl poprvé pozorován roku 1887 Heinrichem Hertzem. Albert Einstein roku 1905 publikoval myšlenku, že elektrony mohou absorbovat energii elektromagnetického záření jen po určitých „balíčcích“ (kvantech), a byl za to roku 1921 oceněn Nobelovou cenou za fyziku. Klasická teorie popisující světlo jako vlnění nebyla schopna vysvětlit některé aspekty tohoto jevu, např. existenci mezní vlnové délky. Dle ní je totiž energie vlnění závislá na intenzitě použitého záření, ne na jeho frekvenci/vlnové délce, tj. nelze vysvětlit, proč záření s příliš malou frekvencí (dlouhou vlnovou délkou) elektrony z látky neuvolní i přes zvyšovanou intenzitu světla.

Poznámky pro demonstraci před třídou

V případě, že by tento experiment neprováděli žáci, ale učitel se rozhodl realizovat jako demonstrační, může i tehdy postupovat dle pracovního listu. Dle vlastního uvážení může využít doprovodných otázek a výpočtů uvedených v úkolech v pracovním listu.

Tento pokus může být proveden s použitím plechovky s proužkem alobalu nebo s použitím již připravené „sestavy“ se stojánkem, na kterou stačí pověsit alobalové třásně (viz obrázek 2) a poté ji postavit na polystyrenovou destičku. Postup je v obou verzích pokusu stejný. Někdy je třeba třásně před pokusem rukou načechrat a urovnat, aby byla indikace nabití pomocí jejich vzájemného oddálení výraznější. Při nabíjení záporným nábojem se k dostatečnému nabití obvykle stačí několikrát dotknout nabitou tyčí třásně nebo otřít nabitou tyč o plechovku.



Obr. 2: Sestava se stojánkem pro demonstraci fotoelektrického jevu

Po čase se může na plechovce vytvořit zoxidovaná vrstva, která má jinou výstupní práci, proto je součástí kufříku brusná houbička. Před provedením pokusu je doporučeno povrch plechovky vždy jemně obrousit. Je-li vlhko (např. po dešti), mohou být podmínky pokusu ztížené, může pomoci před pokusem králíčí kožku a plechovku nahřát fénem, aby se vysušily a nesrážela se na nich vzdušná vlhkost. I přesto se může plechovka samovolně vybíjet. Je proto dobré nejprve několikrát zopakovat nabití plechovky a poukázat na rychlost vybíjení bez použití zdroje světla a poté porovnávat rychlost vybíjení při použití různých zdrojů záření.

UVB zářivka, která je součástí kufříku, má ve svém spektru jen velmi slabou část záření s dostatečně krátkou vlnovou délkou, aby dokázala uvolnit elektron z hliníku (viz obal krabičky zářivky), proto je pokles alobalových indikátorů při jejím použití stěží pozorovatelný.

Zdroje a doporučená literatura

Zde jsou uvedeny použité zdroje a doporučená literatura pro zájemce o podrobnější informace. Zdroje [1, 2, 4, 5] poskytují teoretický popis fotoelektrického jevu. Zdroje [3, 4] obsahují popisy praktického využití fotoefektu. V běžných středoškolských tabulkách [6] lze dohledat výstupní práce různých kovů. Anglicky psaný článek [7] ve svém úvodu popisuje spektrum UV záření a jeho různé umělé zdroje. Video [8] demonstuje fotoelektrický jev s použitím sestavy plechovky se stojánkem.

[1] *Učební text k přednášce UFY102. Vnější fotoefekt a Comptonův rozptyl. Pojem fotonu.* [online]. Poslední změna 8. 3. 2011 [Cit. 25. 8. 2020]. Dostupné z: http://fu.mff.cuni.cz/bio-molecules/media/files/courses/Vnejsi_fotoefekt.pdf

[2] REICHL, Jaroslav a VŠETIČKA, Martin. Fyzikální podstata. *Encyklopedie fyziky* [online]. Copyright © 2006 – 2020. Poslední změna 26. 8. 2020 [Cit. 26. 8. 2020]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/723-fyzikalni-podstata>

[3] REICHL, Jaroslav a VŠETIČKA, Martin. Praktické využití fotoefektu. *Encyklopedie fyziky* [online]. Copyright © 2006 – 2020. Poslední změna 26. 8. 2020 [Cit. 26. 8. 2020]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/725-prakticke-vyuziti-fotoefektu>

[4] ŠTOLL, Ivan. *Fyzika pro gymnázia. Fyzika mikrosvěta. 3., přepracované vydání.* Praha: Prometheus, 2002. ISBN 80-7196-241-4.

[5] HORSKÝ, P. *Univerzitní příprava gymnaziálních učitelů fyziky (se zvláštním zřetelem ke kvantové mechanice).* Brno, 1996. Diplomová práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta, katedra obecné fyziky.

[6] MIKULČÁK, Jiří. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky a vzorce pro střední školy.* Praha: Prometheus, 2003. ISBN 978-80-7196-264-9.

[7] KIM, Soo-Ji, KIM, Do-Kyun, KANG, Dong-Hyun a SCHOTTEL, J. L. Using UVC Light-Emitting Diodes at Wavelengths of 266 to 279 Nanometers To Inactivate Foodborne Pathogens and Pasteurize Sliced Cheese. *Applied and Environmental Microbiology* [online]. 2015, **82**(1), 11-17 [Cit. 25. 8. 2020]. ISSN 0099-2240. Dostupné z: <http://aem.asm.org/lookup/doi/10.1128/AEM.02092-15>

[8] PhysicsAstronomyUofU, 2009, *Simple Photoelectric Effect Demo*, Youtube video. [Cit. 17. 7. 2020]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=WO38qVDGgqw>

Fotoelektrický jev s plechovkami

Fotoelektrický jev stál u zrodu kvantové mechaniky. Za jeho vysvětlení byl Albert Einstein oceněn roku 1921 Nobelovou cenou. Dnes se využívá ve fotodiodách, detektorech světla, v digitálních fotoaparátech atd.

Pomůcky: hliníková plechovka (případně se stojánkem z kelímku), proužek alobalu s drátkem nebo alobalové třísně, PVC trubka, králíčí kožka, LED ruční svítílny (silná a slabá), UV svítílna 365 nm, černá žárovka 75W, UVB zářivka, UVC ruční lampička, kádinka, brusná houbička, polystyrenová destička, napájecí kabel s velkou objímkou, napájecí kabel s hliníkovým reflektorem, fén

POZOR: UVC záření je při delší expozici škodlivé. UVC lampičku zapínejte jen na nezbytně dlouhou dobu, sviťte s ní jen na plechovku. Nevratně poškozuje zrak, **NEDÍVEJTE** se do ní!

Tento pokus může být proveden s použitím plechovky s proužkem alobalu nebo s použitím již připravené „sestavy“ se stojánkem, na který stačí pověsit alobalové třísně. Postup je v obou případech stejný. Někdy je třeba třísně před pokusem rukou načechrat a urovnat, aby byla indikace nabití pomocí jejich vzájemného oddálení výraznější. Toto je třeba si při nabíjení plechovky několikrát vyzkoušet.

Dále bude popis pokusu odpovídat verzi bez stojánku.

Trochu teorie: Aby se elektron uvolnil z materiálu, potřebuje přijmout energii. Tuto energii přijímá ze záření dopadajícího na daný materiál po „balíčcích“ (kvantech). Minimální potřebná energie se nazývá výstupní práce, značí se W_0 a je různá pro různé materiály. Elektron může ale absorbovat i foton s větší energií než W_0 . Na jakou formu energie se přemění tato přebytečná energie?

1. Fotoefekt se záporně nabitou plechovkou

V této části experimentu nabijeme plechovku záporně a budeme pozorovat vliv různých typů záření (s různou vlnovou délkou) na uvolňování elektronů.

- a. Pomocí brusné houbičky jemně obruste část povrchu plechovky, na kterou budete svítit různými zdroji.

- b. Plechovku položte na polystyrenovou destičku a pověste na ni zvenčí proužek alobalu s drátkem, který bude sloužit jako indikátor náboje. Proč je důležité položit plechovku na polystyrenovou destičku?^{*1} Vysvětlete, jak proužek alobalu (indikátor) ukáže přítomnost náboje:

- c. Třením králičí srsti o PVC trubku se trubka nabije záporně. Pokud neslyšíte „praskání“ při tření srsti o trubku, nahřejte srst i plechovku pomocí fénu (cca 30 sekund). Zbavíte je tím vlhkosti na povrchu a zjednodušíte si tím nabíjení plechovky.
- d. Nabitou trubku otřete o hranu plechovky. Proč je třeba nabitou PVC trubku otřít o plechovku?^{*} Jak to souvisí s elektrickými vlastnostmi PVC a plechovky?^{*}

- e. Předchozí body (b, c) opakujte do doby, až se alobalový indikátor viditelně odchýlí od plechovky.
- f. Plechovka se bude pomalu vybíjet, toto vybíjení bude ve vlhkém prostředí (je-li např. po dešti) rychlejší. Pozorujte a zapamatujte si rychlost vybíjení a poté ji srovnajte s rychlostmi vybíjení v dalších částech experimentu. Pokud se v nějakém kroku plechovka vybije, znovu ji nabijte. Slovně popište rychlost vybíjení: _____
- g. Když se záporně nabitá plechovka vybíjí, jsou z ní uvolňovány elektrony. Jak se mění její náboj?^{*} Co se děje s indikátorem? Vysvětlete.

- h. Plechovku osviťte zdroji v pořadí uvedeném v tabulce 1, pokaždé po dobu 5 až 10 s. Do tabulky запиšte, zda se při osvětlení změnila rychlost vybíjení. Černou žárovku/UVB zářivku do objímek a kabely do zásuvek **nedávejte sami**, požádejte učitele o asistenci. Nepřibližujte zdroje světla příliš blízko k plechovce (aby elektrické pole zdrojů záření neovlivňovalo výsledek, viz bod i), s výjimkou UVC ruční lampičky, kterou je naopak třeba umístit poměrně blízko plechovky (cca 3 až 5 cm od ní). Dbejte zvýšené opatrnosti

¹ Otázky označené hvězdičkou jsou nepovinné a není třeba na ně odpovídat písemně, pokud váš vyučující neřekne jinak.

při práci s ní a **nedívejte se do světla**. Lampičku nenechávejte zbytečně dlouho svítit, po 5 až 10 s ji vždy vypněte.

- i. Přiblížte zapnutou UVC lampičku k nabitě plechovce tak, aby svítila mimo plechovku a **mimo vás**. Pozorujte indikátor. Poté lampičku znovu oddalte a vypněte. Slovně popište, co se dělo s indikátorem:

Mohli jste pozorovat pokles indikátoru po přiblížení UVC lampičky. Toto není však fotoefekt, jelikož se na plechovku nesvítí, ale přerozdělení náboje na plechovce je ovlivněno elektrickým polem lampičky. Po jejím oddálení byste měli pozorovat opětovné oddálení indikátoru od plechovky.

Typ záření	Zdroj	Změnila se rychlost vybíjení?	Měla změna intenzity zdroje vliv na rychlost vybíjení?
Viditelné světlo	Slabá LED svítilna		
	Silná LED svítilna		
UVA	UV svítilna 365 nm		
	černá žárovka		
UVB	UVB zářivka		Zdroj neumožňuje měnit intenzitu záření
UVC	UVC ruční lampička		Zdroj neumožňuje měnit intenzitu záření

Tabulka 1: Fotoefekt se záporně nabitou plechovkou

- j. Plechovku znovu nabijte a přikryjte ji kádinkou, nebo vložte UVC lampičku do kádinky. Na plechovku posviťte UVC ruční lampičkou přes skleněnou kádinku. UV záření nemůže projít sklem. Vysvětlete, co pozorujete, že se s plechovkou děje/neděje a proč:

Aby k fotoefektu docházelo, musí mít fotony dostatečně velkou energii, a tomu odpovídá dostatečně **velká/malá** (doplňte název fyzikální veličiny, jsou dvě správné odpovědi)

Změna intenzity záření **měla/neměla** vliv na to, zda jsme pozorovali rychlejší vybíjení plechovky, tj. vnější fotoefekt.

Slabá, silná LED svítidla, UV svítidla 365 nm a žárovka tzv. černého světla vyzařují vlnění s (nepravdivě škrtněte) příliš **dlouhými/krátkými** vlnovými délkami. Tomu odpovídají příliš **vysoké/nízké** frekvence. K fotoefektu **dochází/nedochází**.

Výpočty

Protože známe výstupní práci hliníku $W_0 = 4,1 \text{ eV}$, můžeme dopočítat potřebnou (maximální možnou) vlnovou délku λ_0 dopadajícího záření, které dokáže způsobit fotoefekt. Připomeňme si vztah pro energii fotonu

$$E_f = hf = \frac{hc}{\lambda},$$

kde $h \cong 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$ je Planckova konstanta, $c \cong 3 \cdot 10^8 \text{ km/s}$ je rychlost světla. Převodní vztah mezi jednotkami energie je $1 \text{ eV} \cong 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Vyjádřete vlnovou délku:

a vypočítejte její přibližnou hodnotu: _____ nm.

Tato vlnová délka se nazývá mezní.

UVB záření má vlnovou délku v rozmezí 280–320 nm. Podívejte se na krabičku UVB zářivky, kde je zobrazeno její spektrum. Zhodnoťte: UVB zářivka v oblasti dopočítané hodnoty mezní vlnové délky vyzařuje **intenzivně/slabě/vůbec**. Mohou se uvolňovat přebytečné elektrony při ozáření nabitou plechovku UVB? **ANO/NE** Uvolněných elektronů při osvětlení UVB zářivkou je ve srovnání s UVC lampičkou **hodně/málo**.

UVC záření má ještě **kratší/delší** vlnovou délku, tedy jeho fotony mají **větší/menší** energii a fotoefekt (vybití plechovky) je mnohem výraznější.

2. Fotoefekt s kladně nabitou plechovkou

V této části experimentu nabijeme plechovku kladně a budeme pozorovat vliv různých typů záření na změnu náboje plechovky. V bodech a. až e. je popsán postup nabíjení plechovky.

- Plechovku položte na polystyrenovou destičku a pověste na ni zvenčí proužek alobalu s drátkem, který bude sloužit jako indikátor náboje.
- Třením králičí kůže o PVC trubku nabijte trubku záporně.
- Trubku vložte dovnitř plechovky tak, aby se nedotýkala stěn. Indikátor je vychýlen.
- Prstem se dotkněte plechovky. Indikátor poklesne.

- e. Poté oddalte ruku, vytáhněte trubku. Pokud se vše podařilo, indikátor je opět vychýlen a plechovka je kladně nabitá.

Vysvětlete změnu rozložení náboje na plechovce po provedení předchozích kroků.*

Proč je plechovka kladně nabitá?* Jak se přesouval náboj?* Kam zmizely elektrony?*

Jak se tento jev přerozdělení náboje nazývá?*

- f. Po čase se bude plechovka postupně vybíjet, obzvláště ve vlhkém prostředí. Povšimněte si rychlosti vybíjení a srovnajte ji s rychlostí vybíjení v dalších částech experimentu.
- g. Připomeňte si, jak el. pole zapnuté UVC lampičky ovlivnilo chování indikátoru, i když se na plechovku nesvítilo. Zde můžete pro připomenutí zopakovat postup z bodu 1.i.
- h. Osвіт'íte plechovku jako v minulém pokusu v bodě 1. h. Výsledky zapisujte do tabulky 2. Jelikož již víme, že výrazný efekt na náboj plechovky má pouze UVC lampička, stačí pokus provést pouze s ní. Ostatní zdroje světla můžete zkusit dobrovolně. Případně opět požádejte učitele o asistenci při použití černé žárovky a UVB zářivky.

Typ záření	Zdroj	Změnila se rychlost vybíjení?	Měla změna intenzity zdroje vliv na rychlost vybíjení?
Viditelné světlo	Slabá LED svítilna		
	Silná LED svítilna		
UVA	UV svítilna 365 nm		
	černá žárovka		
UVB	UVB zářivka		Zdroj neumožňuje měnit intenzitu záření
UVC	UVC ruční lampička		Zdroj neumožňuje měnit intenzitu záření

Tabulka 2: Fotoefekt s kladně nabitou plechovkou

Vysvětlení: Vlivem fotoefektu indikátor nepoklesl. Plechovka je kladně nabitá, tedy má **přebytek/nedostatek** elektronů. Pokud by se nějaký elektron vlivem fotoefektu uvolnil, tak by se kladný náboj plechovky **zvětšil/zmenšil**.

Vlastními slovy shrňte průběh obou pokusů a závěr, který z nich vyplývá:

Wienův posunovací zákon

Pomůcky obsažené v kufříku: lineární halogenový reflektor se stínítkem, zásuvkový stmívač, držák čočky, spojka +6, magnety, stojan pod optický hranol (kovová noha a skleněná destička), optický hranol, náhradní hranol se stojánkem, náhradní halogenové žárovky 2x, hliníkový podložný kvádřík

Teorie v několika větách

Wienův posunovací zákon popisuje posun vlnové délky λ_{\max} nejintenzivněji vyzařovaného záření ve spektru záření absolutně černého tělesa (AČT) v závislosti na termodynamické teplotě T tělesa, v tomto experimentu teplotě vlákna halogenové žárovky. Při změně napětí na žárovce se změní teplota vlákna a tím zastoupení barev ve spektru vyzářeného světla, což lze pozorovat, pokud jeho spektrum zobrazíme pomocí optického hranolu.

Co by žáci měli znát

Žáci by z optiky měli znát spektrální rozklad bílého světla pomocí lomu na optickém hranolu (disperzi světla). Dále by měli znát pojem absolutně černé těleso.

Žáci potřebují znát průběh grafu Planckova vyzařovacího zákona a Wienův posunovací zákon, tedy že λ_{\max} je nepřímo úměrná termodynamické teplotě T . Stefan-Boltzmannův zákon znát nemusejí, stačí poznamenat, že s rostoucí teplotou bude růst i intenzita záření (závislost na čtvrté mocnině termodynamické teploty není pro experiment podstatná).

Teorie podrobněji

Optika – světlo

Složené světlo, obsahující monofrekvenční složky všech frekvencí z viditelné oblasti, nazýváme bílé světlo. Protože index lomu světla ve skle závisí i na frekvenci světla, rozloží se bílé světlo při průchodu hranolem na jednotlivé barevné složky, tomuto jevu říkáme disperze světla. Rychlost světla v optických prostředích se zpravidla s rostoucí frekvencí záření snižuje, tedy index lomu roste, nastává tzv. normální disperze. Tedy světlo s vyšší frekvencí (např. fialové) se bude lámat více, nežli světlo s frekvencí nižší (např. červené).

Záření absolutně černého tělesa

Absolutně černé těleso je fyzikální model. Takové těleso dokonale pohlcuje veškeré záření, které na něj dopadá, nedochází tedy na něm k žádnému odrazu. Tomuto modelu se blíží např. dutina s černými matnými stěnami, Slunce či vlákno žárovky.

Při dané termodynamické teplotě T vyzařuje AČT elektromagnetické záření všech vlnových délek (jedná se o spojité spektrum), ale s různou intenzitou. Toto spektrum popisuje Planckův vyzařovací zákon, který Max Planck odvodil na základě tzv. kvantové hypotézy, tedy že vyzařování energie může probíhat pouze po „balíčcích“ energie – kvantech. Tento zákon udává spektrální hustotu intenzity vyzařování H_λ ve tvaru

$$H_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1},$$

kde $h \cong 6,63 \cdot 10^{-34}$ J s je Planckova konstanta, c je rychlost světla ve vakuu, $k \cong 1,38 \cdot 10^{-23}$ J K⁻¹ je Boltzmannova konstanta, T je termodynamická teplota, λ je vlnová délka vyzařovaného záření. Pro konkrétní teploty je znázorněn na obrázku 1.

Planckovu zákonu předcházela zákon Stefan-Boltzmannův

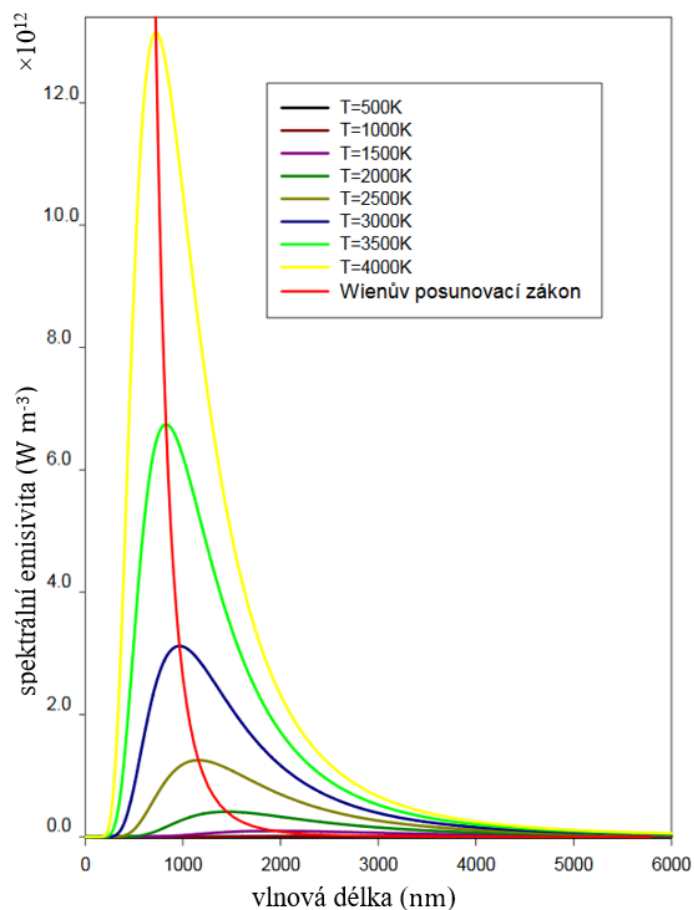
$$I = \sigma T^4,$$

kde I je celková intenzita záření a $\sigma \cong 5,67 \cdot 10^{-8}$ W m⁻² K⁻⁴ je tzv. Stefan-Boltzmannova konstanta. Výraz σT^4 odpovídá ploše pod grafem Planckova vyzařovacího zákona.

Wienův posunovací zákon byl také známý před Planckovým zákonem. Ten popisuje posun vlnové délky λ_{\max} nejintenzivněji vyzařovaného záření ve spektru záření AČT v závislosti na termodynamické teplotě T a má tvar

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T},$$

kde $b = 2,9 \cdot 10^{-3}$ m K je konstanta. Uvedená závislost je vyobrazena společně s Planckovým zákonem v obrázku 1.



Obr. 1: Planckův vyzařovací zákon a Wienův posunovací zákon [7]

Provedení demonstračního pokusu

Příprava

1. Na tři místa na držáku (viz obrázek 2) přichyťte vždy po dvou magnetech.
2. Čočku připevněte na držák.
3. Držák s čočkou magneticky uchyťte na otvor reflektoru (viz obrázek 2).



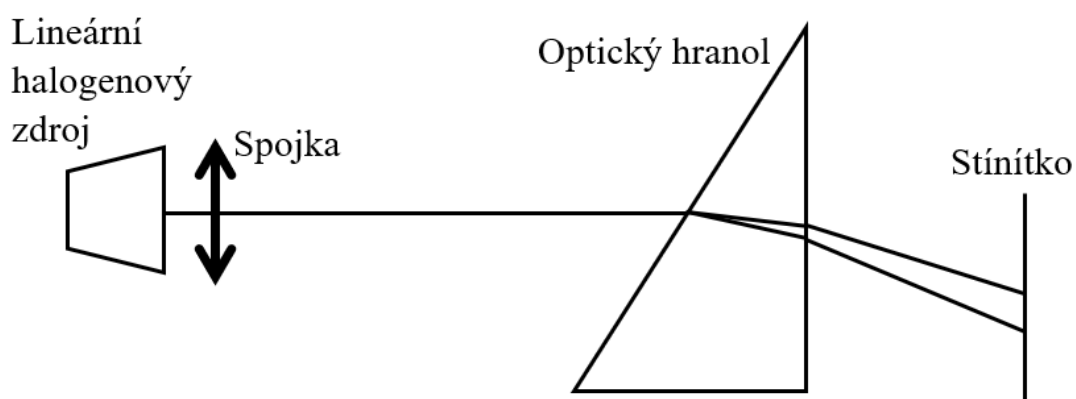
Obr. 2: Uchycení magnetů na držák čočky a držák s čočkou umístěný na reflektor

4. Na kovový podstavec položte skleněnou destičku a umístěte jej před reflektor (viz obrázek 3).



Obr. 3: Podstavec se skleněnou destičkou a optickým hranolem

5. Položte optický hranol na skleněnou destičku podstavce.
6. Zapojte napájecí kabel reflektoru do zásuvkového stmívače a ten zapojte do zdroje 230 V střídavého napětí (zásuvka, ideálně prodlužovačka s vypínačem).
7. Aby zdroj maximálně svítil, musí být kolečko stmívače otočeno co nejvíce ve směru hodinových ručiček.
8. Posviťte skrze optický hranol dle schématu v obrázku 4. Následně můžete jemnými pohyby čočky (vysouváním) zaostřit obraz. Dbejte zvýšené opatrnosti, čočka může být již po krátkém používání velmi horká. Jako stínítko lze použít list čistého papíru (který může držet dobrovolník z řad žáků) nebo bílou stěnu.



Obr. 4.: Schéma disperze světla (pohled shora)

9. Natáčením hranolu či celé sestavy můžete měnit polohu spektra. Můžete podložit stojan reflektoru hliníkovým kvádříkem obsaženým v kufříku a tím měnit jeho naklonění. Natáčením hranolu se také mění šířka/ostrost spektra.
10. Nyní je doporučeno zatemnit místnost.

Provedení

1. Kolečkem stmívače otočte co nejvíce ve směru hodinových ručiček, tím nastavíte maximální napětí. Pozorujte získané spektrum.

Nyní je vhodné diskutovat s žáky spektrum a jeho následné změny:

- Co se bude dít, když snížíme napětí na žárovce?
 - Odpověď: Žárovka bude svítit méně, tj. sníží se intenzita světla.
 - Co z toho a ze Stefan-Boltzmannova zákona vyplývá pro teplotu vlákna žárovky?
 - Teplota vlákna žárovky se snížila.
 - Co, kromě intenzity záření, ovlivní změna teploty vlákna?
 - Odpověď: Spektrální rozložení barev.
 - Když bude vlákno chladnout, k jaké straně spektra se dle Wienova posunovacího zákona bude posouvat maximum?
 - Odpověď: K červené.
 - Jaká barva by měla přestat být viditelná jako první?
 - Odpověď: Modrá (resp. fialová, která ale za nepříznivých podmínek nemusí být vidět vůbec).
2. Kolečkem stmívače pomalu otáčejte proti směru hodinových ručiček tak, abyste pozorovali pomalé změny ve spektru (změny napětí jsou prakticky okamžité, ale vláknu trvá, než částečně vychladne). Pokud otočíte kolečkem „na doraz“, žárovka se vypne.

V průběhu tohoto kroku je možné zkontrolovat odpovědi žáků. Je možné žárovku opětovně rozsvěcet a zhasínat. Pokud by někdo nebyl „přesvědčen“, lze poukázat na barvu světla vycházejícího z reflektoru (stačí se podívat na čočku). Z původní jasné bíle je nyní žlutá/oranžová barva.

- Proč je barva světla při snížené teplotě žlutější/oranžovější?
 - Odpověď: Protože poměrově nyní obsahuje spektrum mnohem méně modré, tedy více červené a oranžové.

Zdroje a doporučená literatura

Zde jsou uvedeny použité zdroje a doporučená literatura pro zájemce o podrobnější informace. Zdroj [1] poskytuje vysokoškolský popis vyzařovacích zákonů. Zdroje [2, 3, 4] popisují záření absolutně černého tělesa na středoškolské úrovni. Učebnice *Optika* [3] obsahuje podrobnější popis tématu světla, lomu, disperze apod. Článek [5] obsahuje detailní popis vlastností lineárního halogenového zářiče společně s několika optickými experimenty. Video [6] obsahuje v prvních cca 14 minutách demonstraci tohoto experimentu, společně s vysvětlením jeho principu. Jako poslední je uveden zdroj použitého obrázku.

[1] *Učební text k přednášce UFY102*. Tepelné záření. Záření absolutně černého tělesa [online]. Poslední změna 4. 1. 2006 [Cit. 30. 10. 2020]. Dostupné z: <http://alma.karlov.mff.cuni.cz/ufy102/Planckuv%20zakon.pdf>

[2] REICHL, Jaroslav a VŠETIČKA, Martin. Záření absolutně černého tělesa. *Encyklopedie fyziky* [online]. Copyright © 2006 – 2020. Poslední změna 30. 10. 2020 [Cit. 30. 10. 2020]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/538-zareni-absolutne-cerneho-telesa>

[3] LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia*. Optika. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010. ISBN 978-80-7196-384-4.

[4] ŠTOLL, Ivan. *Fyzika pro gymnázia*. Fyzika mikrosvěta. 3., přepracované vydání. Praha: Prometheus, 2002. ISBN 80-7196-241-4.

[5] BOCHNÍČEK, Zdeněk. *Využití lineární halogenové žárovky pro demonstrační experimenty* [online]. In: Veletrh nápadů učitelů fyziky 20, sborník z konference. Praha: Univerzita Karlova, 2015. Poslední změna 8. 1. 2020 [Cit. 4. 11. 2020]. Dostupné z: <https://www.ucit-seucit.cz/attachments/article/13/Linearni%20halogenova%20zarovka.pdf>

[6] Nadace České spořitelny, 2016, *Doc. RNDr. Zdeněk Bochníček, Dr., PřF MU Brno*, Youtube video. [Cit. 4. 11. 2020]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=hZqR81UB6pY&list=PLNn4rgcKoGfp9VX-55cWubyFqovsRyv05&index=6>

[7] Obr. 4. Planckův vyzařovací zákon [obrázek]. In: *Učební text k přednášce UFY102*. Tepelné záření. Záření absolutně černého tělesa [online]. Poslední změna 4. 1. 2006 [Cit. 30. 10. 2020]. Dostupné z: <http://alma.karlov.mff.cuni.cz/ufy102/Planckuv%20zakon.pdf>

Tunelový jev

(text pro učitele)

Pomůcky obsažené v kufříku: optický hranol, laserové ukazovátko, mikrovlnná souprava (dva přijímače, jeden vysílač), dva šelakové hranoly, redukce pro multimetry, rozbočovací adaptér, vodiče, dřevěná podložka pod hranoly, čtverečkovaný papír, pracovní list, text pro učitele

Další potřebné pomůcky: dva multimetry (voltmetry), zdroj 12 V stejnosměrného napětí, vodiče

Teorie v několika větách

Tunelový jev je zde modelován s užitím totálního odrazu, kdy vytvoříme vlastně za rozhraním hranolu a vzduchu „zakázanou“ oblast pro fotony použitého záření. Přiblížením druhého hranolu se ze zakázané oblasti stane „pouze“ potenciálová bariéra, kterou fotony mohou při adekvátní šířce bariéry (řádově srovnatelné s vlnovou délkou záření či menší) v nezanedbatelném množství překonat a dostat se tak z prvního hranolu do hranolu druhého. Tyto fotony potom naměříme jako signál procházející rozhraním.

Co by žáci měli znát

Žáci by měli z optiky znát Snellův zákon, pojem totálního odrazu a kdy k němu dochází. Z oblasti kvantové mechaniky potřebují znát princip tunelového jevu, jeho pravděpodobnostní povahu a skutečnost, že se zvětšující se šířkou bariéry se pravděpodobnost průchodu částice rychle zmenšuje.

Teorie podrobněji

Totální odraz

K totálnímu (úplnému) odrazu dochází při přechodu z opticky hustšího do opticky řidšího prostředí (viz obr. 1) při překročení tzv. mezního úhlu. Mezní úhel lze snadno odvodit ze Snellova zákona [1]

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1},$$

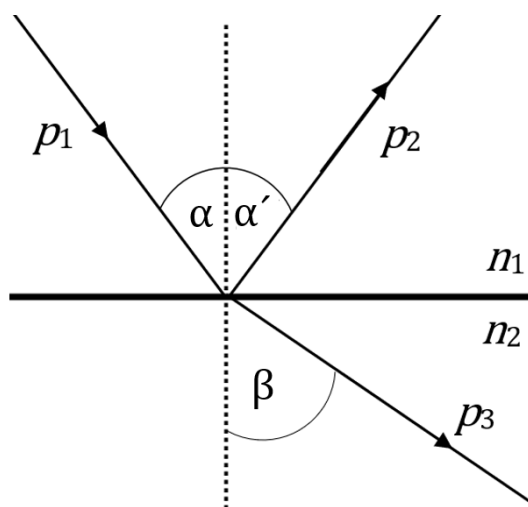
kde α je úhel dopadu, β je úhel lomu, n_1 a n_2 jsou indexy lomu prvního a druhého prostředí. Mezní úhel α_m je dosažen pro $\beta = 90^\circ$, tedy na obrázku č. 2 je to případ paprsku č. 2. Snellův zákon se pak zredukuje na

$$\sin \alpha_m = \frac{n_2}{n_1},$$

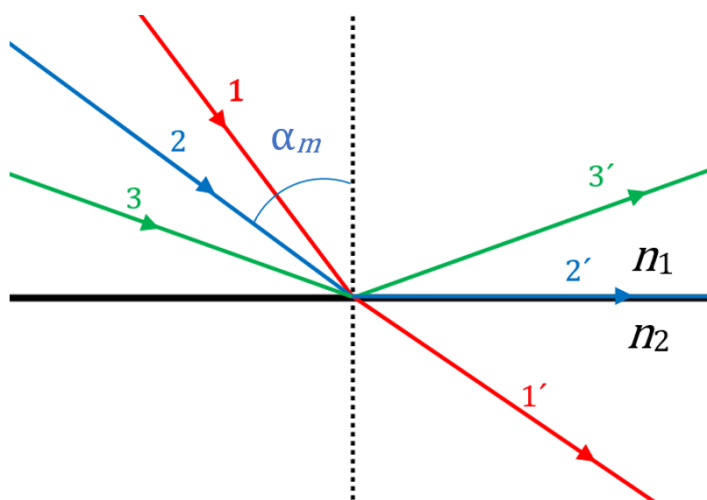
a za předpokladu, že druhým prostředím je vzduch a tedy platí $n_2 \cong 1$, pak pro mezní úhel platí

$$\alpha_m = \arcsin\left(\frac{1}{n_1}\right).$$

Na principu totálního odrazu jsou založeny optické kabely, optické hranoly ve triedrech či refraktometry (přístroje k měření indexu lomu).



Obr. 1: Lom světla od kolmice



Obr. 2: Lom světla a úplný odraz

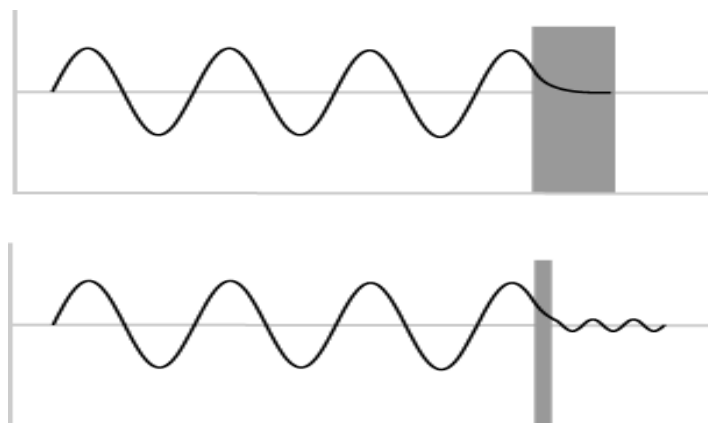
Tunelový jev

Tunelový jev je ryze kvantový jev. Částice (např. elektron nebo foton) překoná energetickou bariéru takové „výšky“, že z hlediska klasické mechaniky nemá na její překonání dostatečnou energii a nemělo by tedy být možné částici za bariérou najít. Vysvětlení najdeme v matematickém popisu. Stav částice v kvantové mechanice popisujeme tzv. vlnovou funkcí, která musí být spojitá a musí mít spojitou první derivaci (tj. nesmí na ní být „špička“ či nějaký „zlom“). Pravděpodobnost, že částici najdeme v daném místě, je úměrná druhé mocnině absolutní hodnoty vlnové funkce. Ve velmi zjednodušeném modelu¹, kdy k bariéře přilétá volná částice, můžeme jako její vlnovou funkci vzít funkci sinus. V místě, kde začíná bariéra, nemůže vlnová funkce klesnout rovnou na nulu², pokud má zůstat spojitá se spojitou derivací. Klesá zde sice rychle (exponenciálně), ale přeci jenom má ještě kousek za začátkem bariéry docela velkou hodnotu.

¹ Uvedený popis je extrémně zjednodušený, vlnová funkce je ve skutečnosti komplexní apod. Ale podstata matematického popisu je zde vystižena správně – je to důsledek našich požadavků na vlastnosti vlnové funkce.

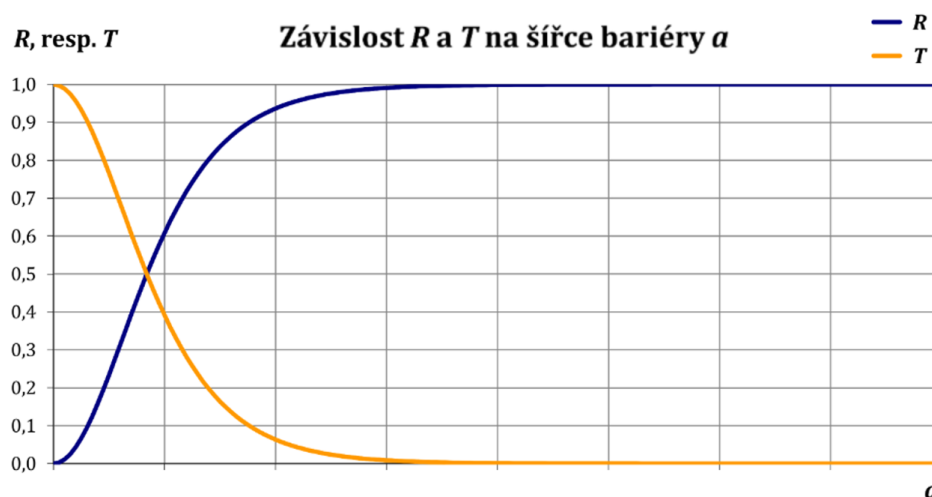
² Žáci by mohli namítnout, že v nule je přeci sinus nulový, tak stačí, aby nulový zůstal. Tím by ale nebyla splněna podmínka spojitosti derivace, což jim málokdy takto na první pohled dojde.

Pokud je bariéra dostatečně úzká, neklesne vlnová funkce na „praktickou“ nulu³ a díky tomu je vlnová funkce, a tedy i pravděpodobnost nalezení částice za bariérou nenulová (viz obrázek č. 3). S rozšiřující se bariérou klesá i pravděpodobnost nalezení částice za bariérou přibližně exponenciálně.



Obr. 3: Schéma poklesu vlnové funkce v bariéře a průběh za ní, na horním obrázku je šedivě naznačená bariéra příliš široká, vlnová funkce klesla „k nule“, spodní obrázek ukazuje úzkou bariéru, kterou částice může překonat [9]

Na obrázku č. 4 je graf znázorňující závislost pravděpodobnosti odrazu R a průchodu T pro kvantovou částici (vodorovná osa je bez konkrétních hodnot, graf je pouze ilustrační), které popisují pravděpodobnost odrazu/průchodu částice. Platí $R + T = 1$.



Obr. 4: Graf závislosti R a T na šířce bariéry a [10]

³ Matematici vědí, že exponenciála není nulová nikdy, fyziky ale zajímají takové hodnoty, které jsou schopni měřením od nuly odlišit.

Pomocí teorie popisující tunelový jev bylo možno vysvětlit některé fyzikální jevy jako např. α rozpad atomových jader či termojadernou fúzi ve Slunci.

Překonání totálního odrazu

Jev, který tento experiment demonstruje, lze vysvětlit i pomocí klasické elektrodynamiky, resp. vlnové optiky. Teorie elektromagnetického pole říká, že na rozhraní dvou izotropních optických prostředí musí být určité složky elektrického a magnetického pole spojitě. Z toho můžeme odvodit, že pokud na rozhraní dopadá rovinná harmonická vlna, tak i v případě, kdy dochází k totálnímu odrazu, proniká do druhého prostředí elektromagnetická vlna, jejíž amplituda se vzdáleností od rozhraní klesá exponenciálně a zároveň je střední tok energie směrem od rozhraní nulový. Jedná se o tzv. evanescentní vlnu. Pokud v dostatečné blízkosti k hranolu, na kterém dochází k totálnímu odrazu, přiložíme hranol z materiálu, který má vyšší index lomu⁴, než je index lomu prostředí mezi hranoly, můžeme zachytit evanescentní vlnu. Ta se ale díky vyššímu indexu lomu tohoto prostředí již nadále chová jako obyčejná elektromagnetická vlna, a tím je totální odraz překonán.

Poté můžeme použít Fresnelovy vzorce [1] pro určení propustnosti T , vyjadřující podíl energie, která projde do druhého hranolu. Odrazivost R naopak popisuje podíl energie, která se odrazí. Platí $R + T = 1$. Výsledné výrazy určující odrazivost a propustnost zde nejsou pro svoji složitost uvedeny.

Druhou možností je, že na elektromagnetické záření budeme nahlížet jako na tok fotonů, které budeme popisovat z hlediska kvantové mechaniky. Popsaný jev poté nazýváme tunelový jev, protože fotony se dostávají i do míst, kam by se z hlediska klasické mechaniky, tj. pokud bychom je popisovali jako hmotné body, neměly dostat, protože nemají dostatečnou energii na překonání bariéry, která tato místa odděluje.

Pro vysvětlení tohoto experimentu zvolíme tento přístup. Pro úplnost dodejme, že samotnou existenci potenciálové bariéry („zakázaného území“ mezi hranoly) nedokáže kvantová mechanika vysvětlit, na to je třeba poznatků z kvantové elektrodynamiky (QED), která teprve popisuje interakci fotonů s látkou.

Jev je možné demonstrovat i s pomocí optických hranolů a laseru, toto uspořádání je však mnohem náročnější na přesnost uspořádání a měření. Je zapotřebí hranolů s dokonale vyleštěnými

⁴ můžeme tedy volit i hranoly ze stejného materiálu

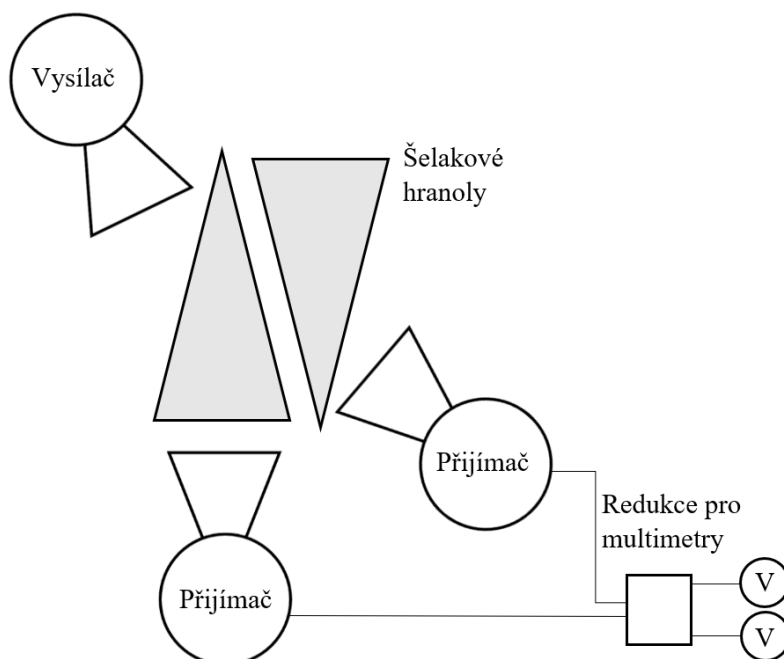
plochami a velmi pevnými úchyty ke stabilní podložce. Vzdálenost hranolů by se musela upravovat mikrometrickým šroubem a bylo by zapotřebí kvalitního laseru s velmi málo rozbíhavým paprskem. Pokud by laser nebyl dostatečně výkonný, tak aby byl prošlý paprsek vidět, bylo by zapotřebí soustavu opatřit fotonásobiči pro měření „množství“ odraženého a prošlého světla.

Výhodou mikrovlnného uspořádání je, že použité záření má vlnovou délku přibližně 3 cm. Jelikož se tunelový jev začíná výrazně projevovat pro šířku bariéry srovnatelnou s vlnovou délkou záření, je použití mikrovln mnohem méně náročné na přesnost oproti použití viditelného světla, kde musí mít bariéra rozměry stovek až tisíců nanometrů. Nevýhodou mikrovln je nutnost použití detektorů pro jejich detekci.

Poznámky k pokusu

Žáci začnou s demonstrací totálního odrazu s optickým hranolem a s laserovým ukazovátkem o výkonu do 1 mW. **Žáci musí dbát zvýšené opatrnosti, aby si neposvítili do očí přímo či odrazem. Učitel může při demonstraci totálního odrazu laserem žákům asistovat, nebo jej může demonstrovat sám.**

Při demonstraci s mikrovlnnou soupravou může být pro žáky náročné určit mezní úhel, resp. natočit vysílač tak, aby lomené vlny dopadaly uvnitř hranolu alespoň pod mezním úhlem. Následující obrázek 5 ukazuje vhodné rozložení pomůcek.



Obr. 5: Schéma demonstrace tunelového jevu s mikrovlnnou soupravou
(bez znázorněného zdroje napětí)

Sklonění vysílače vůči bližšímu hranolu přibližně odpovídá potřebnému úhlu pro dosažení totálního odrazu.

Přijímač na druhé straně rozhraní, na kterém dochází k totálnímu odrazu, může ukazovat nenulové napětí i po překročení mezního úhlu. Toto je způsobeno rozptylem elektromagnetické vlny uvnitř hranolu, nedokonalostmi povrchu rozhraní, nepřesnostmi měřících přístrojů apod. Důležité je, aby přijímač ukazoval prakticky nulové napětí. Pro měření jsou vhodnější ručičkové voltmetry, protože při drobném kolísání napětí je pohyb ručičky prakticky nezatelný, kdežto změna hodnot na digitálních měřácích může žáky lehce mást.

Poznámky pro demonstraci před třídou

Pro demonstraci tohoto pokusu před třídou lze postupovat dle žákovských pracovních listů. Dle uvážení učitele lze využít otázek v textu.

Rozhodně je potřeba vždy ukázat totální odraz s pomocí viditelného záření.

V případě nedostatečného napětí na přijímačích lze upravit na jejich zadní straně otočným potenciometrem citlivost.

Vlnová délka použitých mikrovln je přibližně 3 cm. Při zmenšování vzdálenosti hranolů pod 3 cm mohou hodnoty napětí na přijímači prošlého signálu zůstat stejné, nebo mohou i lehce klesat. Tento pokles není způsoben tunelovým jevem, ale nepřesnostmi v měření (např. drobná změna náklonu druhého hranolu, pootočení přijímače apod.).

Zdroje a doporučená literatura

Zde jsou uvedeny použité zdroje a doporučená literatura pro zájemce o podrobnější informace. Zdroje [1, 2] popisují teorii vlnové optiky na vysokoškolské úrovni. Středoškolské učebnice fyziky [3, 4] a online encyklopedie [5, 6] vysvětlují základní pojmy používané v sekci Teorie. Skripta [7] popisují jednoduché systémy ve kvantové fyzice a tunelový jev na vysokoškolské úrovni. Článek [8] popisuje uspořádání experimentu s viditelným světlem, je k němu však omezený přístup. Dále jsou uvedeny zdroje použitých obrázků.

[1] *Učební text k přednášce UFY102*. Fresnelovy vzorce a jevy na rozhraní dvou prostředí I. [online]. Poslední změna 8. 3. 2011 [Cit. 10. 9. 2020]. Dostupné z: http://fu.mff.cuni.cz/bio-molecules/media/files/courses/Fresnelovy_vzorce_I.pdf

- [2] *Učební text k přednášce UFY102*. Fresnelovy vzorce a jevy na rozhraní dvou prostředí II. [online]. Poslední změna 8. 3. 2011 [Cit. 10. 9. 2020]. Dostupné z: http://fu.mff.cuni.cz/bio-molecules/media/files/courses/Fresnelovy_vzorce_II.pdf
- [3] LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia*. Optika. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010. ISBN 978-80-7196-384-4.
- [4] ŠTOLL, Ivan. *Fyzika pro gymnázia*. Fyzika mikrosvěta. 3., přepracované vydání. Praha: Prometheus, 2002. ISBN 80-7196-241-4.
- [5] REICHL, Jaroslav a VŠETIČKA, Martin. Odraz a lom světla. *Encyklopedie fyziky* [online]. Copyright © 2006 – 2020. Poslední změna 10. 9. 2020 [Cit. 10. 9. 2020]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/436-odraz-a-lom-svetla>
- [6] REICHL, Jaroslav a VŠETIČKA, Martin. Úplný odraz světla. *Encyklopedie fyziky* [online]. Copyright © 2006 – 2020. Poslední změna 10. 9. 2020 [Cit. 10. 9. 2020]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/440-uplny-odraz-svetla>
- [7] KOUPILOVÁ, Zdeňka. *Kapitola 3: Jednodimenzionální jednoduché systémy*. Skripta k předmětu Kvantová mechanika [online]. Poslední změna 11. 12. 2019 [Cit. 25. 8. 2020]. Dostupné z: <https://kdf.mff.cuni.cz/vyuka/kvantovka/QM03-JednoducheSystemy.pdf>
- [8] ZHU, S., YU, A., HAWLEY, D. a ROY, R. Frustrated total internal reflection: A demonstration and review. *American Journal of Physics* [online]. 1986, **54**(7), 601-607 [Cit. 10. 9. 2020]. ISSN 0002-9505. Dostupné z: <http://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.14514>
- [9] Schematic of electron wavefunction. [schéma]. In: Scanning tunneling microscopy. *NanoScience Instruments* [online]. © 2020 Nanoscience Instruments. Poslední změna 17. 7. 2020 [Cit. 17. 7. 2020]. Dostupné z: <https://www.nanoscience.com/techniques/scanning-tunneling-microscopy/>
- [10] Obrázek 14: Koeficienty odrazu R a průchodu T v závislosti na šířce bariéry a pro případ $0 < E < V_B$ [obrázek]. In: KOUPILOVÁ, Zdeňka. *Kapitola 3: Jednodimenzionální jednoduché systémy*. Skripta k předmětu Kvantová mechanika [online]. Poslední změna 11. 12. 2019 [Cit. 25. 8. 2020]. Dostupné z: <https://kdf.mff.cuni.cz/vyuka/kvantovka/QM03-JednoducheSystemy.pdf>

Tunelový jev

Pomůcky: optický hranol, laserové ukazovátko, mikrovlnná souprava (dva přijímače, jeden vysílač), dva šelakové hranoly, redukce pro multimetry, dva multimetry, zdroj 12 V stejnosměrného napětí, rozbočovací adaptér, dřevěná podložka pod hranoly, vodiče, čtverečkovaný papír

V rámci tohoto experimentu si přiblížíte tzv. tunelový jev, což je ryze kvantový jev. Tohoto jevu se v praxi užívá např. ve flash discích, v rastrovacím tunelovém mikroskopu, a dochází k němu i ve Slunci a při α rozpadu atomových jader. Tento jev si přiblížíte s užitím totálního odrazu, kterému je na úvod věnována první úloha.

1. Totální (úplný) odraz s laserem

- a. Snellův zákon, který popisuje, jak se světlo na rozhraní dvou prostředí láme, má tvar

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1},$$

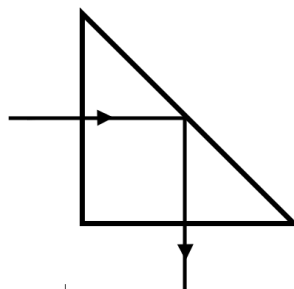
kde α je úhel dopadu, β je úhel lomu, n_1 a n_2 jsou indexy lomu daných prostředí.

- b. Kdy může dojít k úplnému odrazu? (nepravdivé škrtněte) Při přechodu elektromagnetického záření (např. viditelného světla) do opticky **řidšího/hustšího** prostředí.

Úhel dopadu, při kterém je úhel lomu 90° a po jehož překročení dochází k totálnímu odrazu, se nazývá mezní úhel.

- c. Odvodte vztah pro výpočet mezního úhlu při přechodu světla z optického prostředí s indexem lomu n_1 do vzduchu (využijte znalosti $\beta = 90^\circ$, $n_2 \cong 1$).

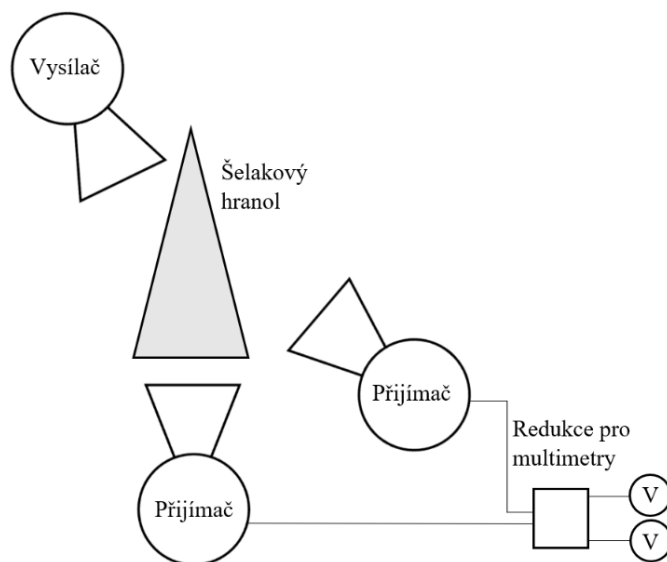
- d. Demonstrujte totální odraz s použitím optického hranolu a laseru. Posviťte do hranolu laserovým ukazovátkem dle obrázku 1. Měňte úhel, pod kterým svítíte na stěnu hranolu a pozorujte, kdy dochází k totálnímu odrazu. **Laserem si nesviťte do očí a buďte opatrní i na odražený paprsek.**



Obr. 1: Totální odraz na optickém hranou

2. Tunelový jev s mikrovlnnou soupravou

- Zapojte mikrovlnný vysílač i přijímače ke zdroji 12 V napětí. Výstupy přijímačů připojte k redukci a připojte multimetry nastavené pro měření stejnosměrného napětí v rozsahu do 10 V.
- Otestujte vysílač a přijímače, tak že nasměrujete vysílač na přijímače a pozorujte vzrůst napětí na multimetrech. Pokud je vzrůst napětí malý, upravte citlivost na přijímačích pomocí otočného potenciometru na zadní straně přijímačů.
- Nyní podobně jako v předchozí úloze demonstруйте totální odraz. Sestavte soupravu podle obrázku 2. Na obrázku pro přehlednost chybí zdroj s přívodními vodiči. Můžete použít rozbočovací adaptér pro ušetření místa na pracovním stole. Hranoly umíst'ujte na dřevěnou podložku.

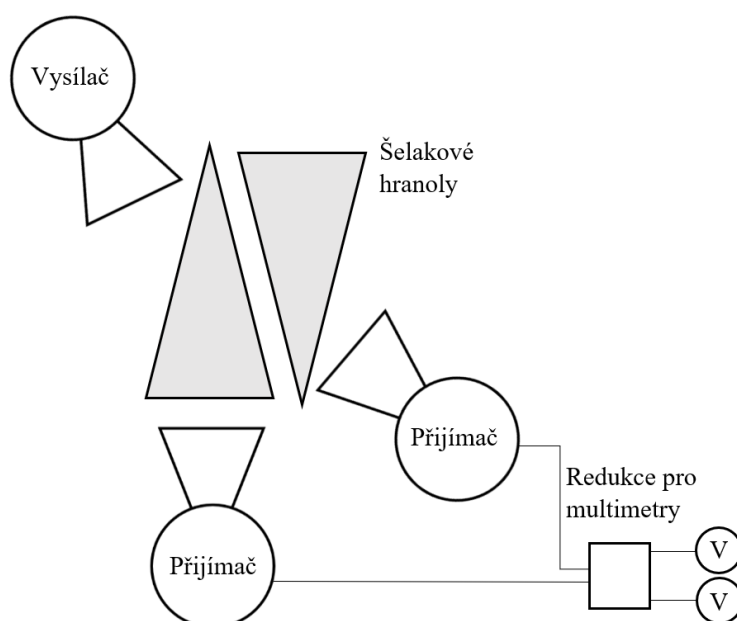


Obr. 2: Schéma pro demonstraci totálního odrazu s mikrovlnnou soupravou
(bez znázorněného zdroje napětí)

Budete měřit zároveň signál od vlnění, které projde hranolem (dojde k lomu na vzdálenější ploše hranolu, tj. té vpravo) a které se uvnitř hranolu odrazí (na přijímači dole). Postupně upravujte úhel, který svírá vysílač se stěnou šelakového hranolu. Totální odraz

na odlehlé straně nastane, když na přijímači za ní naměříte prakticky nulové napětí (napětí nemusí být přesně nulové, dochází k rozptylu záření uvnitř hranolu, měřáky nejsou ideálně přesné a další efekty ovlivňují měření). Druhý přijímač by měl v tu samou chvíli detekovat silný odražený signál.

- d. Pravděpodobnost protunelování částice se se zvětšující bariérou **zvyšuje/snižuje** přibližně exponenciálně.
- e. Přibližujte druhý hranol k prvnímu bez jakýchkoliv změn uspořádání prvního hranolu, vysílače a přijímačů, tedy jako na obrázku 3.



Obr. 3: Schéma měření tunelového jevu s mikrovlnnou soupravou
(bez znázorněného zdroje napětí)

Začněte ve vzdálenosti cca 10 cm. Vzdálenost lze s dostatečnou přesností nastavit pomocí čtverečkováného papíru, který vložíte pod hranoly. Hranol přibližujte tak, aby šířka vzduchové mezery mezi nimi byla všude přibližně stejná. Zmenšujte vzdálenost hranolů po 1cm krocích. Pozorujte změny napětí na obou přijímačích a zapište si je do tabulky na další stránce. Drobnému kolísání napětí nevěnujte přílišnou pozornost, je dáno zejména drobnými výkyvy v síle vysílaného signálu a celkovou přesností měření pomocí dané aparatury. Do volného místa pod tabulkou si můžete vynést naměřené hodnoty do grafu.

Vzdálenost hranolů	Napětí (odražený signál)	Napětí (protunelovaný signál)	Vzdálenost hranolů	Napětí (odražený signál)	Napětí (protunelovaný signál)
10 cm			5 cm		
9 cm			4 cm		
8 cm			3 cm		
7 cm			2 cm		
6 cm			1 cm		

Vzduchová mezera mezi hranoly představuje pro fotony mikrovlnného záření v tomto uspořádání bariéru, kterou by neměly být schopny překonat bez ohledu na její šířku. Mohli jste ale pozorovat, že při zužování této bariéry dochází k poklesu intenzity odraženého signálu a růstu intenzity signálu prošlého (protunelovaného). Při dotyku hranolů by se měla intenzita odraženého signálu snížit prakticky na nulu. Dochází k tzv. tunelovému jevu, kdy při zmenšování šířky bariéry se zvyšuje pravděpodobnost průchodu jednotlivých fotonů mikrovlnného záření. Při dotyku hranolů je tato pravděpodobnost velmi blízká jedné, a tedy většina fotonů projde bariérou a jen velmi málo se jich odrazí. Dotýkající se hranoly by se měly chovat stejně, jako kdyby nebyly nijak odděleny, tj. jednalo se o jeden kus materiálu. Uvnitř takového homogenního materiálu by se světlo také nijak neodráželo.

Vlastními slovy shrňte průběh a ideu pokusu: