

Experiment ve Fyzikální olympiádě

BOHUMIL VYBÍRAL

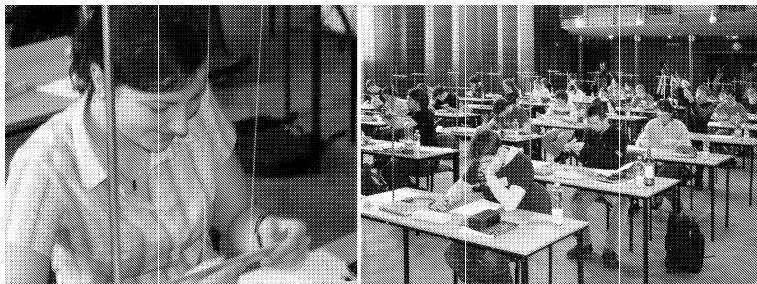
Přírodovědecká fakulta Univerzity Hradec Králové

Fyzikální olympiáda, zejména mezinárodní, je příkladem toho, jak pěkné tvůrčí a problémové experimentální úlohy lze vymyslet. Snahou přitom je zařadit do soutěže experimenty, které by také odpovídaly současnému (anebo nedávno minulému) dění ve fyzice, byly dostatečně tvůrčí, náročné pro vyspělé řešitele a nevyžadovaly složité přístroje. To jsou vcelku protichůdné požadavky. Problém spočívá v tom, že současné vědecké fyzikální experimenty se často realizují na velkých složitých zařízeních řízených a výsledky se vyhodnocují na počítači. To v podmínkách Fyzikální olympiády není obsahově, organizačně a zejména ekonomicky možné. Proto se hledají vtipné, dalo by se říct fyzikálně-výzkumné, experimentální problémy, kdy si řešitel často musí umět poradit s omezenými prostředky a v daných časových podmínkách a bez studia pomocné literatury provést měření, určit veličiny včetně jejich statistického a grafického zpracování. Jak ukazují některé níže uvedené příklady, organizátorům se to daří.

Také v české Fyzikální olympiádě se zařazují vtipné a přiměřeně náročné experimentální úlohy. Např. na celostátním kole FO 38. roč. kat. A (konaném v r. 1997 v Děčíně) to bylo určení Boltzmannovy konstanty měřením na tranzistoru. Na celostátním kole 49. roč. v Karlových Varech byla úloha na měření setrvačné hmotnosti z kmitů na pružině, jejíž hmotnost se nezanedbávala (princip problému byl diskutován v [1]).

Velkou dávku invence někdy vyžadují zdánlivě primitivní experimenty, prováděné jednoduchými prostředky. Takové byly zařazeny jako experimentální úlohy na celostátních kolech 41. roč. FO v Brně r. 2000 (mechanika – šlo o rotující disk) a 50. roč. FO v Praze r. 2009 (optika – šlo o složený lom světla). Na celostátním kole 51. roč FO v Pelhřimově

r. 2010 byla zařazena zajímavá úloha, nenáročná na vybavení: „Studium kmitů vodorovné tyče, zavěšené na dvou rovnoběžných vláknech“ (obr. 1). Studenti analyzovali tři druhy kmitů: a) rotační kmity kolem svislé osy, b) podélné kmity v rovině, určené tyčí a závěsy, c) příčné kmity kolmé k rovině, určené tyčí a závěsy. Z naměřených hodnot vyhodnocovali různé veličiny – charakteristiky kmitající soustavy.



Obr. 1 Řešení experimentální úlohy na celostátním kole FO v Pelhřimově r. 2010

V následujícím textu je formou námětů diskutováno 21 velmi zajímavých experimentálních úloh z Mezinárodní fyzikální olympiády (IPhO) z období jejich posledních 18. ročníků. S podrobným zadáním a řešením těchto úloh se lze seznámit na stránkách IPhO, dostupných na internetu [20]. Společnou charakteristikou těchto úloh bylo to, že šlo vesměs o problémové úlohy, kdy řešitel zpravidla nemohl použít standardní postup, známý z literatury. Vyžadovalo se provedení rozsáhlého souboru měření, jeho statistické a grafické zpracování. K dispozici byl jen zadaný text, kalkulačka a grafický papír. Doba, určená k řešení dvojúlohy, byla 5 hod.

MECHANIKA A TERMIKA

Mechanická černá skříňka (Korea, 2004), [13]

Předmětem experimentální analýzy byla „černá skříňka“ ve formě zaslepené trubky, o níž bylo řešitelům sděleno, že obsahuje excentricky umístěnou kuličku připojenou ke dvěma různým pružinám opřeným o dna, která zaslepovala trubku. Student měl k dispozici rotační stolek, do jehož osového čepu mohl upevnit zkoumanou trubku. Soustava se roztáčela padajícím závažím upevněným na vlákne. K dispozici byly tyto měřicí

přístroje a pomůcky: pravítko, posuvné měřidlo, elektrické stopky (řízené fotosnímači, umístěnými v určité rozteči h) a elektronické váhy. Měřením se měly určit veličiny: statický moment $m \cdot l$ kuličky ve výchozí poloze, její hmotnost a tuhosti obou pružin – vše včetně chyb měření. Šlo o náročnou úlohu vyžadující nejen vtip, ale i zručnost a organizaci práce. Vzorové řešení např. předpokládalo, že řešitel provede sérii asi 45 měření rotace trubky a při každém určí hodnoty pěti veličin.

Mechanická černá skříňka – válec s kuličkou uvnitř (Thajsko, 2011), obr. 2, [21]

Studentům byl předložen dutý uzavřený kovový válec, o němž věděli, že uvnitř je v neznámé poloze pevně umístěna kulička. Pomocí hledání statické rovnováhy a kmitů válce jako fyzického kyvadla (s předem přeurčenou soustavou bodů otáčení – předvrtaných otvorů) měli za úkol určit polohu středu kuličky uvnitř válce, moment setrvačnosti celé soustavy a poměr hmotností kuličky a válce. Na závěr bylo úkolem určit tíhové zrychlení, včetně chyb měření.



Obr. 2 Druhá experimentální úloha na MFO v Thajsku 2011: jednoduché pomůcky (složené kyvadlo) a jejich sestava při experimentu

Zákon pro odpor prostředí při pohybu válce v kapalině (Austrálie, 1995), [4]

Pomocí experimentu se měla provést modifikace známého Stokesova výrazu pro odporovou sílu, kterou klade tekutina při pohybu koule malou rychlostí, a to pro případ válečku o výšce rovné průměru při pohybu ve směru kolmém k jeho ose. Jestliže u koule závisí odpor na první mocnině poloměru, hledala se velikost exponentu m pro válec. Použitou kapalinou byl glycerin a válečky byly z hliníku, titanu, oceli a mědi. Válečky měly čtyři různé průměry, přičemž hustoty jejich materiálů byly uvedeny. K dispozici byl skleněný litrový odměrný válec s glycerinem, délkové měřidlo a stopky. Měřením vycházelo $m = 1,33$ (u koule je $m = 1$). Přidruženým měřením bylo určení hustoty užívaného glycerinu; toto měření však bylo málo přesné.

Rotující kapalina (Turecko, 2001), [10]

Experimentální úloha připravená pro řešitele na 32. MFO byla pozoruhodná především tím, že na originálním zařízení umožňovala provádět troje měření z různých oblastí fyziky: a) Výzkum profilu povrchu rotující kapaliny a určení tíhového zrychlení. b) Výzkum rotující kapaliny jako optické soustavy. c) Určení indexu lomu kapaliny.

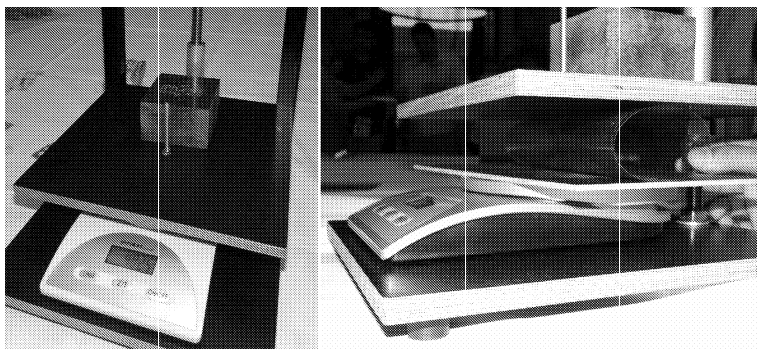
Základem aparatury byla velká průhledná plastová válcová nádoba, zčásti naplněná glycerinem a na dně a na boku opatřená měřítkem s milimetrovým dělením. Nádoba byla umístěna na otáčecím stolku, poháněném stejnosměrným elektromotorkem, jehož otáčky se daly spojitě měnit změnou napětí. Součástí zařízení byl rovněž stojánek s vodorovným poloprůhledným stínítkem, opatřeným milimetrovým rastrem. Na stojánku bylo připevněno laserové ukazovátko, sloužící jako zdroj světla, doplněné maskou, která vytvářela světelný předmět. Dále byla k dispozici difrakční mřížka s 1 000 vrypy na 1 mm, stopky a pravítko. V 1. části úlohy měli řešitelé jednak odvodit vztah pro směrnici tečny k povrchu kapaliny, jednak geometricky proměřit (pomocí výše popsané optiky) povrch kapaliny a to v závislosti na měřené frekvenci otáčení. Experimentálních poznatků měli řešitelé poté využít k určení tíhového zrychlení. Protože se povrch kapaliny při rovnošné rotaci chová jako parabolické zrcadlo, měli soutěžící ve 2. části úlohy opticky proměřit polohu ohniska (tj. stanovit ohniskovou vzdálenost) a analyzovat vlastnosti zobrazování soustavy na základě pozorování. Ve 3. části se určovala vlnová délka světla laseru a index lomu glycerinu užitím difrakční mřížky.

Magnetický puk (Velká Británie, 2000), [9]

Cílem úlohy byl výzkum sil působících na tělísko, o jehož struktuře nebylo nic známo, při jeho pohybu po nakloněné dráze ve formě korýtky, vytvořeného z hliníku. Šlo o uzavřený kotouček, který byl na jedné podstavě magnetický, na druhé nemagnetický – toto však nebylo předem deklarováno; při pohybu kotoučku po jedné z jeho podstav se uplatnily vířivé proudy, po druhé jen tření.

Pružnost listů fólií (Chorvatsko, 2010), [18], [19]

Úkolem bylo proměřit nelineární deformaci plastových fólií, stočených do pláště válce. Ohybová tuhost a Youngův modul pružnosti materiálů fólií se určovala užitím geometrických metod z grafů získaných měření. Síly se měřily komerčními elektronickými váhami (obr. 3).



Obr. 3 Souprava na měření pružnosti listů fólií na MFO v Chorvatsku r. 2010

Měrné skupenské teplo varu dusíku (USA, 1993), [2]

Atraktivnost této velmi pěkné úlohy byla v tom, že se pracovalo s tekutým dusíkem (o teplotě $-195,8\text{ }^{\circ}\text{C}$), což bylo pro studenty většinou zcela neznámé a ovšem i nebezpečné medium. Při první metodě se přivedené teplo získalo ponořením hliníkového válečku o laboratorní teplotě. Byl zadán graf závislosti měrné tepelné kapacity hliníku na teplotě. Před ponořením válečku a po jeho ochlazení bylo nutné vyhodnotit rychlost úbytku hmotnosti dusíku, který se stále intenzivně odpařoval. Při druhé metodě se přivedené teplo získávalo jako Joulovo teplo.

ELEKTŘINA A MAGNETISMUS

Elektrická černá skříňka (Čína – ČLR, 1994), [3]

Byla dána „černá skříňka“ se dvěma svorkami, která neobsahovala více než tři pasivní elektrické prvky. Měly se určit hodnoty veličin těchto prvků a nakreslit schéma obvodu mezi svorkami skříňky. K dispozici byl dvoukanálový osciloskop (umožňující měřit amplitudu napětí a fázový posun dvou signálů), tónový generátor a rezistor o známém odporu. Měřením napětí mezi svorkami skříňky a na rezistoru a sledováním změny fáze při proměnné frekvenci f se zjistil jev sériové rezonance. Z grafu (s oběma logaritmickými stupnicemi) funkce $Z(f)$ se usoudilo, že jde o spojení prvků RLC v sérii. Ze vztahů pro impedanci Z se určily hodnoty veličin prvků.

Určení e/k_B prostřednictvím elektrolýzy (Indonésie, 2002), [11]

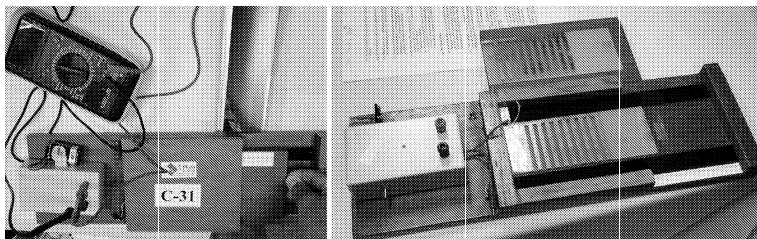
Teoretickým východiskem úlohy byla kvantitativní analýza elektrolýzy vody. Problém experimentu byl především v tom, že testovací zkumavka jímající plyn měla neoznačenou necejchovanou stupnici. Cílem bylo změřit podíl náboje elektronu a Boltzmannovy konstanty. Úloha měla dvě části: a) Kalibrace stupnice na testovací zkumavce. b) Vlastní měření e/k_B . Pomůcky: experimentální sestava pro elektrolýzu, zdroj s regulovaným napětím, multimetr, stopky, kulička se závěsným drátkem a stojanem. Protože mezi pomůckami nebylo délkové měřidlo, bylo nasnadě nahradit je měřením doby kmitu kuličky s drátkem, coby kyvadla, pro jeho různé délky při daném tíhovém zrychlení (požadovalo se rovněž určování chyb měření). Druhá část úlohy vyžadovala odvození vztahu pro e/k_B jako funkci měřených veličin.

Elektrická černá skříňka – kapacitní senzor posunutí (Thajsko, 2011), obr. 4, [21]

Studenti měli za úkol zjistit tvar a rozměry desek skrytého posuvného kondenzátoru užitím relaxačního (útlumového) oscilátoru, sady 4 kondenzátorů (určených ke kalibraci) a digitálního multimetru (fungujícího i jako kmitočtoměr). V závěru úlohy bylo úkolem diskutovat možnost principiálního využití takového kondenzátoru ke konstrukci digitálního posuvného měřidla.

Vlastnosti bimorfu (Kanada, 1997), [6]

Šlo o výzkum vlastností bimorfu, jako soustavy dvou tenkých piezoelektrických destiček, na jejichž povrchu byly napařeny vodivé kovové vrstvy,



Obr. 4 Sestava první experimentální úlohy na MFO v Thajsku 2011 a otevřená černá skříňka (ta nebyla studentům k dispozici)

sloužící jako elektrody. Bylo uvedeno, že napětí připojené k elektrodám deformuje bimorf do kruhového oblouku. Studenti měli řešit dva samostatné úkoly. V první části najít závislost přemístění volného konce bimorfu na velikosti připojeného napětí, které se mohlo měnit v daných mezích. (Přitom se očekávalo, že studenti také zjistí hysterezi výchylky.) Měl se určit rozptýl energie v průběhu jednoho cyklu změn napětí. Pro druhou část úlohy byla navržena formule pro závislost přemístění d volného konce na napětí U a úkolem bylo určit příslušné konstanty. Měřila se také kapacita bimorfu. K dispozici bylo laserové ukazovátko jako zdroj světla (na bimorfu bylo malé zrcátko), voltmetr s danými charakteristikami, potenciometr s daným odporem, baterie, stopky a pravítko.

Magnetické stínění vířivými proudy (Island, 1998), [7]

Nejprve byl popsán princip magnetického stínění vířivými proudy, přičemž byl uveden výraz pro úbytek velikosti indukce magnetického pole B na tloušťce d stínění: $B = B_0 e^{-\alpha d}$. Tento matematický model se měl experimentálně ověřit pro hliník a měl se určit příslušný koeficient zeslabení α . Byla použita indukční metoda. K tomu byly k dispozici indukční cívky, tónový generátor, dva multimetry a řada hliníkových fólií tří různých tloušťek.

Vazba magnetických obvodů (Island, 1998), [7]

Byla studována odezva dvou cívek v uzavřeném magnetickém obvodu (vytvořeném feritovým jádrem) na vnější střídavé napětí. K tomu byla uvedena teorie nejprve pro jednu cívku a pak pro dvě cívky. Po studentech se požadovalo, aby nejprve dořešili některé teoretické úvahy a poté provedli sérii měření (pro zkratovanou sekundární cívku, pro cívky spojené do

série dvěma možnými způsoby). Experimentálně se řešily tyto problémy: a) Určení koeficientu vazby cívek. b) Ověření závislosti vlastní indukčnosti na druhé mocnině počtu závitů. c) Zda je oprávněné zanedbat odpor primární cívky. d) Jak se zmenší relativní permeabilita soustavy dvou feritových jader, je-li přerušena mezerou, která se vyplnila papírkem dané tloušťky.

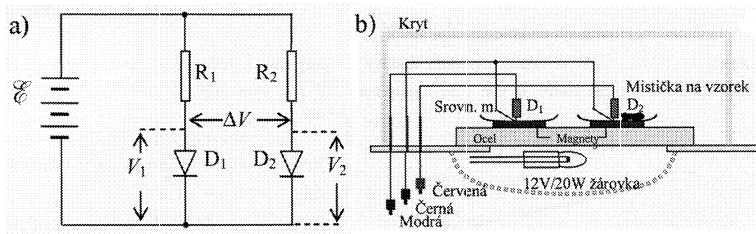
Síly mezi magnety, pojetí stability a symetrie (Chorvatsko, 2010), [18], [19]

Studenti měli s využitím stejného základního zařízení, jako u úlohy *Pružnost listů fólií*, měřit síly mezi tyčovým a soustředným prstencovým magnetem. Cílem bylo určit stabilní a nestabilní rovnovážné polohy této soustavy magnetů (bylo jich několik). Síly mezi magnety (při jejich posouvání ve směru osy) se opět měřily komerčními elektronickými váhami – obr. 3.

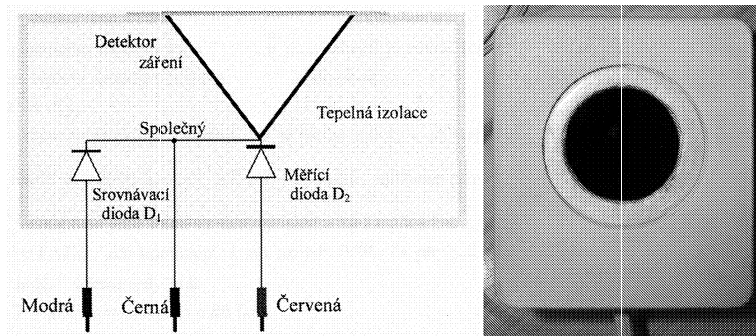
Aplikace diferenční termometrické metody (Vietnam, 2008), [16]

V této úloze byla aplikována diferenční termometrická metoda na řešení dvou úkolů: a) Nalezení teploty tuhnutí krystalické pevné látky. b) Určení účinnosti solárního článku. K měření teploty se využily dvě křemíkové diody D_1 , D_2 , napájené v propustném směru, které sloužily jako teplotní senzory. Šlo zde o použití diferenční termometrické metody, při níž rozdílové napětí na diodách bylo úměrné měřenému rozdílu teplot v místě diod (obr. 5a). Metoda byla vysvětlena v krátkém studijním textu. Prvním úkolem bylo určení teploty tuhnutí malého vzorku krystalické pevné látky. Měřil se pozvolný nárůst teploty vzorku 20 mg zkoumané krystalické látky. Vzorek byl umístěn v ocelové mističce a nárůst teploty látky se srovnával s nárůstem teploty stejné srovnávací mističky, která vzorek látky neobsahovala (obr. 5b). Stejný ohřev obou mističek zabezpečovala žhnoucí halogenová lampa. K oběma mističkám byly připájeny diody jako teplotní sondy a měřilo se na nich napětí, které bylo úměrné teplotě.

Ve druhém úkolu, určovala účinnost solárního článku osvětleného rovněž stejnou žhnoucí halogenovou lampou. Bylo uvedeno, že účinnost je definována jako poměr elektrického výkonu, kterou je schopen solární článek dodávat do vnějšího obvodu, k celkovému výkonu záření dopadajícího na článek. Účinnost závisí na spektru dopadajícího záření. Detektorem záření byl dutý měděný kužel, jehož vnitřní povrch byl začerněn sazemi (detektor se považoval za dokonale černé těleso). Teplota se opět snímala křemíko-



Obr. 5 a) Obvod k měření teploty diferenční metodou na MFO ve Vietnamu r. 2008.
b) Schéma aparatury na měření teploty tuhnutí krystalické látky diferenční metodou.



Obr. 6 Detektor záření k měření účinnosti solárního článku na MFO ve Vietnamu

vými diodami, přičemž měřicí dioda byla připevněna ke kuželu detektoru záření (obr. 6). Srovnávací dioda snímala teplotu okolí.

OPTIKA A ZÁŘENÍ

Optická černá skříňka (Indonésie, 2002), [11])

Studenti měli měřením rozhodnout, jaké optické součástky jsou uvnitř krychlové uzavřené skříňky, opatřené pouze dvěma rovnoběžnými šterbinami na protilehlých stěnách. Náповěda spočívala v tom, že jde o tři součástky z těchto možností: zrcadlo (rovinné nebo kulové), čočka (spojka nebo rozptylka), planparalelní destička, hranol nebo difrakční mřížka (nebylo však uvedeno, že se zastoupení některé součásti může opakovat). K dispozici řešitelé měli laserové ukazovátko jako zdroj světla, optickou

lavici s držákem skříňky a stínítkem. Odpovědi na základě měření musely být zdůvodněné; výsledkem měření mělo být nejen určení neznámých součástí, ale i náčrt příčného řezu skříňky s jejich rozmístěním a určení jejich bližší specifikace. Úloha byla náročná již proto, že od řešitelů vyžadovala nejen znalosti z optiky (geometrické i vlnové), ale i určité experimentální zkušenosti a hodně invence. Řešení ukázalo, že šlo o dvě stejné difrakční mřížky (se vzájemně rovnoběžnými vrypů), umístěné na protilehlých stěnách (v místě štěrbin) a o planparalelní destičku šikmo umístěnou mezi nimi.

Odrazivost světla na transparentním dielektrickém povrchu (Čína – ČLR, 1994), [3]

Byl dán laserový zdroj (He–Ne) nepolarizovaného světla, dva otočné polarizátory, dva detektory intenzity světla s fotočlánkem a mikroampérmetrem a zkoumaná transparentní dielektrická destička. Určoval se koeficient odrazivosti a index lomu dielektrické destičky a rovněž Brewsterův úhel. U všech měřených veličin se požadovalo vyhodnocení chyb měření.

CD-ROM spektrometr (Velká Británie, 2000), [9]

Hlavním cílem experimentu bylo sestrojení grafu závislosti vodivosti rezistoru, jehož odpor závisí na vlnové délce světla (*light-dependent resistor*: „LDR“). K tomu byl k dispozici jednoduchý spektrometr, jehož podstatnou součástí byla jednoduchá konkávní mřížka na odraz, vytvořená z proužku kotouče CD-ROM (bylo uvedeno, že má 620 vrypů, resp. drážek na 1 mm). Zdrojem světla byla automobilová žárovka s wolframovým vláknem (k dispozici byly tři žárovky, které se při experimentu postupně využívaly). Žárovka byla napájena ze zdroje regulovatelného střídavého napětí. Dále byly k dispozici tři multimetry (umožňovaly měřit odpor, napětí a proud) a grafy – Planckovy křivky, které znázorňovaly relativní intenzitu záření černého tělesa pro teploty 2 000 K, 2 250 K, 2 500 K, 2 750 K, 3 000 K, 3 250 K. Experiment měl pět částí s úkoly: a) Užitím konkávní mřížky vytvořit fokusované spektrum prvního řádu pocházející ze světla wolframové žárovky. b) Měřit vodivost LDR jako funkci vlnové délky světla snímaného ze spektra prvního řádu (nakreslit graf této závislosti). c) Ukázat, že žárovka se přibližně chová jako dokonale černé těleso. d) Určit teplotu vlákna žárovky připojené na pracovní napětí 12 V. e) Korigovat závislost vodivosti LDR na vlnové délce tím, že se započte rozdělení energie ve spektru světla vyzařovaného žárovkou. Řešitelé měli k dispozici vztah

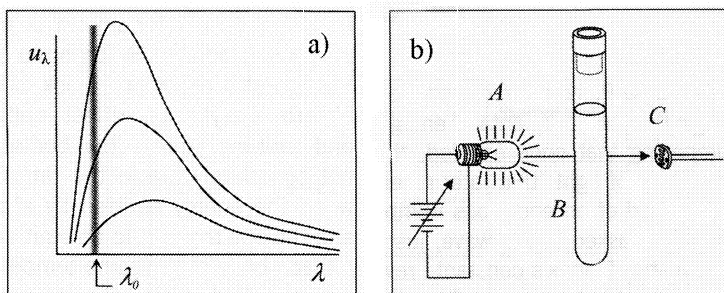
$U^3 = CI^5$, kde C je konstanta. Bylo uvedeno, že tento vztah je platný pro idealizovanou situaci vlákna žárovky jako absolutně černého tělesa. Verifikaci platnosti tohoto vztahu se ověřovalo, do jaké míry je předpoklad u používané žárovky splněn.

Optické vlastnosti tekutého krystalu (Tchaj-wan, 2003), [12]

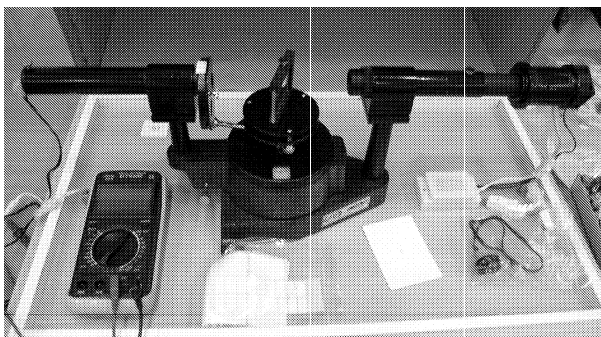
Úloha měla dvě samostatné, nestejně hodnocené části, přičemž se k měření využívala stejná speciálně vyrobená optická lavice. Úkoly: a) Optické vlastnosti laserové diody (5 bodů). b) Optické vlastnosti „nematického“ tekutého krystalu (15 bodů). Druhá část (b) byla nestandardní, neboť se pracovalo s jevy a součástkami, které byly novinkami v oblasti optoelektroniky (s nimi se studenti ještě nestkali). Proto byl k zadání připojen malý studijní text, který studenty seznamoval se strukturou a vlastnostmi tekutého krystalu, především „nematického“, jehož základem jsou organické sloučeniny, sestávající z dlouhých jehlicových molekul. Takový krystal, přetáčející polarizační rovinu o 90° , byl předložen k měření. Krystal se umístil mezi polarizátor a analyzátor a zkoumaly se účinky stejnosměrného napětí, které se vkládalo na elektrody krystalu a měnilo se po malých krocích. Měřilo se jednak za situace, kdy polarizátor a analyzátor měly kmitosměry rovnoběžné, jednak zkřížené o 90° . Vložený krystal byl oproti polarizační rovině polarizátoru natočen o 45° . Prošlé světlo se měřilo fotodetektorem. Výsledky měření se zpracovávaly numericky (včetně chyb měření) a rovněž graficky.

Určení Planckovy konstanty měřením světla žárovky (Španělsko, 2005), [14]

Jako těleso emitující záření bylo použito wolframové vlákno žárovky. Další podstatnou částí sestavy byla zkumavka s kapalinou, pracující jako kapalinový filtr, který propouštěl světlo jen v úzkém pásu viditelného spektra – v měřeném okolí vlnové délky λ_0 , v níž se nacházelo maximum propuštěného světla (λ_0 bylo asi 590 nm) – obr. 7a). Kapalina filtru: vodní roztok síranu měďného a oranžového anilinového barviva (to absorbovalo infračervené záření, emitované vláknem) – obr. 7b). Snímačem záření byl fotorezistor. S využitím předloženého krátkého studijního textu (o Planckově teorii záření absolutně černého tělesa a o vlastnosti fotorezistoru) studenti určovali: a) Teplotu vlákna žárovky. b) Optické vlastnosti filtru (λ_0 a $\Delta\lambda$ z předloženého grafu, popisujícího propustnost filtru). c) Vlastnosti fotorezistoru a na základě nich *Planckovu konstantu*. Organizátoři



Obr. 7 a) Intenzita vyzařování černého tělesa podle Plancka s vyznačením vlivu kapalinového filtru. b) Aparatura k určení Planckovy konstanty měřením světla žárovky, [22]



Obr. 8 Spektrometr pro měření polovodičové tenké vrstvy na MFO v Íránu r. 2007

naměřili hodnotu $h = (6,4 \pm 0,3) \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, ke které se mnozí řešitelé také dopracovali.

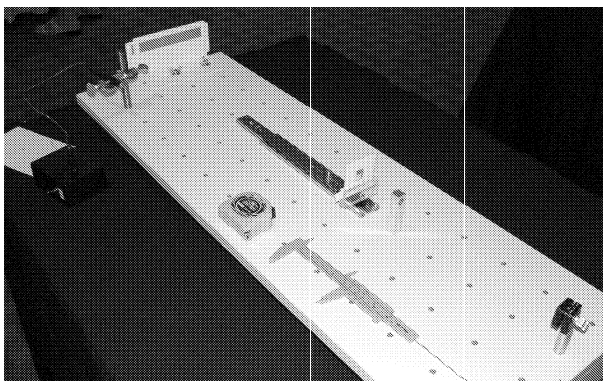
Šířka zakázaného pásu energie polovodičových tenkých vrstev (Írán, 2007), [15]

Cílem úlohy bylo určení šířky zakázaného pásu energie polovodičových tenkých vrstev na podkladě opakovaných měření. V úvodu byla předložena potřebná teorie problému a popis přístrojů k měření. Základním přístrojem byl spektrometr, speciálně vyrobený pro tuto úlohu, opatřený halogenovou lampou a goniometrem (obr. 8). Dále byl předložen vzorek s tenkou vrstvou polovodiče na sklíčku, samotné sklíčko, optická mřížka (o dané

konstantě), fotorezistor, multimetr a další drobné potřeby. Základní metodou bylo měření propustnosti tenké polovodičové vrstvy v závislosti na vlnové délce užitím fotorezistoru. Bylo požadováno určení chyb měření statistickou analýzou dat měření. Cílem měření, podle zadání problému, bylo stanovení šířky zakázaného pásu energie a tloušťky polovodičové vrstvy.

Vlnová délka diodového laseru (Mexiko, 2009), [17]

Měla se určit vlnová délka diodového laseru, přičemž zvláštností bylo, že nemohla být použita žádná pomůcka s mikrometrickými škálami (jako například difrakční mřížka o dané mřížkové konstantě). Bylo proto třeba využít měření rozložení difrakčních obrazců na stínítku, které vznikly interferencí laserového světla po jeho průchodu kolem hrany žiletky. Vyžadovala se podrobná statistická analýza dat měření a určení chyb. K měření byla vyrobena jednoduchá optická lavice (obr. 9), která se využila i u druhé úlohy (*Dvojlom ve slídě*).



Obr. 9 Měření vlnové délky diodového laseru na MFO v Mexiku r. 2009 (foto B. Vybíral)

Dvojlom ve slídě (Mexiko, 2009), [17]

K dispozici byly dva polarizační filtry, fotodetektor s multimetrem, měřená slídová destička v držáku, umístěném na základní optické lavici z předchozí úlohy (obr. 9) a diodový laser. Na základě analýzy měřených dat se určovala dvojlomnost slídy, jako rozdíl indexů lomu $|n_1 - n_2|$, přičemž n_1 je pro vlnu, polarizovanou rovnoběžně s dopadající vlnou, a n_2 pro druhou vlnu, polarizovanou ve směru kolmém na rovinu dopadající polarizované vlny.

Literatura

- [1] *Vybíral, B.*: Za tvůrčí experimentální úlohy ve výuce fyziky. In: DIDFYZ 2000, s. 97–101. Nitra: Fakulta přírodních věd Univerzity Konštantina Filozofa, 2001. ISBN 80-8050-387-7
- [2] XXIV International Physics Olympiad, Williamsburg, Virginia, USA, 1993.
- [3] XXV International Physics Olympiad, Beijing, The People's Republic of China, 1994.
- [4] XXVI International Physics Olympiad, Canberra, Australia, 1995. Australian Science Olympiads, 1997.
- [5] 27th International Physics Olympiad, Oslo, Norway, 1996. University of Oslo, 1997.
- [6] XXVIII International Physics Olympiad, Sudbury, Canada, 1997. Final Report.
- [7] Proceedings of 29th International Physics Olympiad, Reykjavík, Iceland, 1998. Reykjavík, 1999.
- [8] Proceedings of XXX International Physics Olympiad, Padova, Italy, 1999. University of Padova, 2000.
- [9] International Physics Olympiad XXXI, Leicester, United Kingdom. University of Leicester, 2001.
- [10] Proceedings of the 32th International Physics Olympiad, Antalya, Turkey, 2001. Ankara, Turkey, 2002.
- [11] Proceedings of the 33th International Physics Olympiad, Bali, Indonesia, 2002.
- [12] Proceedings of the 34th International Physics Olympiad, Taipei, Taiwan, 2003.
- [13] Proceedings of the 35th International Physics Olympiad, Pohang, Korea, 2004.
- [14] Proceedings of the 36th International Physics Olympiad, Salamanca, Spain, 2005.
- [15] Proceedings of the 38th International Physics Olympiad, Isfahan, Iran, 2007.
- [16] Proceedings of the 39th International Physics Olympiad, Hanoi, Vietnam, 2008.
- [17] Proceedings of the 40th International Physics Olympiad, Mérida, Mexico, 2009.
- [18] Proceedings of the 41th International Physics Olympiad, Zagreb, Croatia, 2010: <<http://ipho2010.hfd.hr>>.
- [19] Oficiální stránky Fyzikální olympiády dostupné z [www: <http://fo.cuni.cz>](http://fo.cuni.cz).
- [20] Oficiální stránky Mezinárodní fyzikální olympiády dostupné z: <<http://www.jyu.fi/tdk/kastdk/olympiads/>>.
- [21] Oficiální stránky 42. IPHO dostupné z <<http://www.ipho2011.org/>>.

Demonstrace dia- a paramagnetismu

VĚRA KOUDELKOVÁ

Matematicko-fyzikální fakulta UK

Při výuce magnetických vlastností látek jsou látky paramagnetické a diamagnetické často jen okrajově zmíněny z hlediska uspořádání magnetických domén a relativní permeability (viz např. [1]). Přesto si myslím, že by mohlo být, i z motivačního hlediska, vhodné žákům tyto jevy demonstrovat. Je to něco jiného (a pro žáky možná i překvapivého), než s čím se běžně setkávají. Následující článek ukazuje, jak lze paramagnetismus a diamagnetismus demonstrovat ve třídě s využitím pomůcek, které jsou ve většině škol k dispozici. Jediným přístrojem, který budeme potřebovat, jsou váhy s citlivostí alespoň 0,05 g – ty však lze koupit od řady dodavatelů školních pomůcek za cenu jednotek tisíc Kč a představují užitečnou pomůcku pro řadu pokusů.

Teorie

Diamagnetické i paramagnetické látky reagují na přítomnost vnějšího magnetického pole, ale nelze je trvale zmagnetovat. Diamagnetické látky mírně zeslabují vnější magnetické pole, jejich relativní permeabilita je nepatrně menší než jedna. Zeslabení vnějšího magnetického pole se projeví mírným odpuzováním od magnetu. Mezi diamagnetické látky patří např. voda, měď, bismut, grafit a další (viz [2]). Před několika lety se objevila informace o žábě levitující v silném magnetickém poli. I za tento jev je zodpovědný diamagnetismus – voda obsažená v žábě se od magnetu odpuzuje a vyrovná tak tíhovou sílu. Podrobněji viz např. [3].

Paramagnetické látky naopak vnější magnetické pole mírně zesilují, k magnetu se proto budou lehce přitahovat. Jejich relativní permeabilita je mírně větší než jedna. Paramagnetická je např. platina, mangan, chrom, hliník, některé soli a další.

Známý experiment

Asi nejběžnější pomůckou k demonstraci dia a paramagnetických vlastností látek je torzní kyvadlo – na jedné straně tyčky zavěšené na torzním závěsu je diamagnetická látka (obvykle voda), na druhé straně paramagnetická (často modrá skalice). Při přiblížení magnetu se kyvadlo natáčí

směrem od magnetu – na straně vody, resp. směrem k magnetu – na straně modré skalice. Video s tímto experimentem lze najít např. v [4]. Nevýhodou tohoto experimentu je jeho velká citlivost na vnější podmínky, natáčí se prouděním okolního vzduchu, nepatrným pohybem demonstrátora apod.

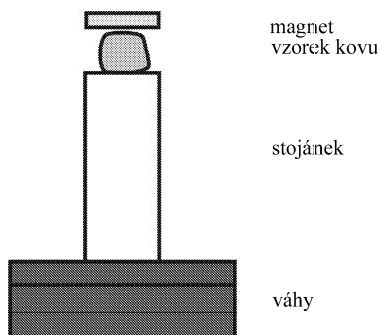
Lze jev demonstrovat i jinak?

Původní nápad, jak jednoduše demonstrovat diamagnetické a paramagnetické vlastnosti látek, byl publikován v časopise *Physics Teacher* v roce 1997 [5].

Základní součástí experimentu jsou digitální váhy s citlivostí alespoň 0,05 g a větší neodymový magnet (doporučuji hranol o rozměrech alespoň $0,5 \times 0,5 \times 3$ cm nebo válec o průměru alespoň 1,5 cm a výšce 0,5 cm). Váhy zde slouží pro měření přitažlivé nebo odpudivé síly mezi magnetem a vzorkem látky. My jsme měli k dispozici váhy umožňující připojení k počítači, takže lze údaj demonstrovat celé třídě. Nejproblematičtější součástí experimentu mohou být vzorky paramagnetických a diamagnetických látek. Z nejběžnějších se mohou v kabinetech chemie vyskytovat bismut, mangan, chrom. Vodu využít lze, ale údaj, který ukážou váhy, je jen v řádech mg.

Poznámka: Naměřená síla je tím větší, čím více se relativní permeabilita materiálu (μ_r) liší od jedné. Tento rozdíl se nazývá magnetická susceptibilita ($\chi_m = 1 - \mu_r$). Pro diamagnetika je $\chi_m < 1$, například pro bismut je $\chi_m = -1,7 \cdot 10^{-4}$, pro vodu jen $\chi_m = -0,9 \cdot 10^{-5}$.

Uspořádání experimentu je vidět na obr. 1.



Obr. 1

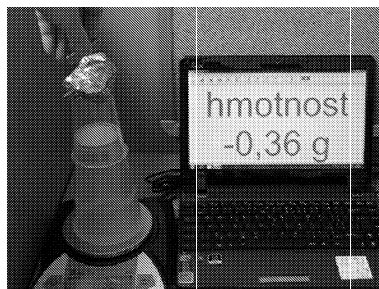
Na digitální váhy umístíme zkoumaný vzorek na dostatečně vysoký nemagnetický stojánek (osvědčily se například plastové kelímky), aby kovo-

vou plochu vah neovlivňoval samotný magnet. Váhy vytárujeme, takže budou ukazovat nulovou hodnotu. Pak ke vzorku seshora přibližujeme magnet. Je-li vzorek diamagnetický, bude se od magnetu odpuzovat – váhy ukáží kladnou hodnotu. Je-li vzorek paramagnetický, bude se k magnetu přibližovat – váhy ukáží zápornou výchylku.

V našem případě jsme měření prováděli s diamagnetickým bismutem, který má magnetickou susceptibilitu $-1,7 \cdot 10^{-4}$. Bismut jsme měli v podobě „šupinek“, byl nasypán v krabičce od zápalek, hmotnost vzorku byla 90 g. Váhy byly po umístění vzorku bismutu vytárovány, po přiblížení magnetu na vzdálenost několika mm ukazují výchylku 0,14 g, což odpovídá odpudivé síle 1,4 mN (obr. 2). (Je to asi samozřejmé, ale přesto je vhodné žákům zdůraznit, že vahami zde měříme *sílu*. Pro větší názornost můžeme do vzorku seshora nejprve lehce zatlačit prstem. Hmotnost vzorku se přirozeně nemění!)



Obr. 2



Obr. 3

V druhém případě jsme použili paramagnetický chrom^{*)} s magnetickou susceptibilitou $3,2 \cdot 10^{-4}$ (obr. 3). K dispozici jsme měli jeden kus chromu o hmotnosti 515 g. Váhy ukazují výchylku $-0,36$ g, což odpovídá přitažlivé síle 3,6 mN.

Video s oběma experimenty je k dispozici na adrese [7].

^{*)} V SŠ učebnicích je chrom běžně řazen mezi paramagnetické látky, problém je však malinko složitější – podle [6] patří chrom mezi tzv. antiferomagnetické látky pod tzv. Néelovou teplotou (pro chrom 308 K) a mezi paramagnetické nad touto teplotou. Pro studenty SŠ je však zařazení mezi paramagnetické látky dostačující.

Závěr

Pokus je poměrně jednoduchý na sestavení, na jeho přípravu stačí několik minut. Jeho výhodou je kromě snadné přípravy i názornost – digitální váhy umožňují měřit jednoduše i velmi malé síly v řádech několika mN. Asi by bylo bláhové si myslet, že si budou žáci dlouho pamatovat chování magnetických momentů v diamagnetických a paramagnetických látkách, ale experiment, během kterého se i neferomagnetická látka k magnetu přitahuje, resp. odpuzuje, jim v paměti dost možná zůstane.

Poděkování

Ing. Michalu Novákovi z VŠCHT za zapůjčení kovů pro měření a *doc. Leošovi Dvořákovi* za cenné připomínky a rady.

Experiment s demonstrací diamagnetismu byl prezentován na konferenci Veletrh nápadů učitelů fyziky 13, Plzeň 2008 [8].

Literatura

- [1] *Lepil, O. – Šedivý, P.*: Fyzika pro gymnázia, Elektřina a magnetismus. Prometheus, Praha 2006.
- [2] *Mikulčák a spol.*: Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy. SPN, Praha 1989.
- [3] High Field Magnet laboratory – The Frog That Lezen to Fly. [online]. [cit. 27. 2. 2011]. Dostupné na: <<http://www.ru.nl/hfml/research/levitation/diamagnetic/>>
- [4] Magnetické vlastnosti látek. MEF, Encyklopedie fyziky. [online]. [cit. 18. 2. 2011]. Dostupné na: <<http://fyzika.jreichl.com/index.php?sekce=browse&page=295>>
- [5] *Willem, P. L.*: Demonstrating Diamagnetism, Phys. Teach. 35, 463 (November 1997)
- [6] Antiferromagnetism. [online]. [cit. 27. 2. 2011]. Dostupné na: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Antiferromagnetism>>
- [7] Diamagnetismus a paramagnetismus. [online]. [cit. 18. 2. 2011]. Dostupné online: <<http://www.youtube.com/watch?v=-SN3p-XmEA>>
- [8] *Koudelková, V.*: Několik netradičních pokusů z magnetismu. In: Veletrh nápadů učitelů fyziky 13, sborník z konference. Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň 2008.