

# Experimenty – kořeni výuky fyziky

Leoš Dvořák, Zdeněk Drozd

Katedra didaktiky fyziky, Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy v Praze, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8;  
leos.dvorak@mff.cuni.cz, zdenek.drozd@mff.cuni.cz

Role pokusů ve výuce fyziky byla v minulosti někdy až přeceňována. (Tím není řečeno, že by jich ve skutečné výuce na českých školách byl vždy dostatek.) V současné době mohou být reálné pokusy z výuky naopak vytlačovány aplety, simulacemi či nejrůznějšími multimediálními prezentacemi. Cílem příspěvku je do jisté míry „obrana a chvála reálných experimentů“. Na několika příkladech zde ukážeme typy pokusů, které podle našich zkušeností mohou i dnes zaujmout, překvapit, přimět k zamyšlení a následně lepšímu pochopení zkoumaných či demonstrováných jevů – prostě vhodně „okořenit“ výuku fyziky na různých stupních škol. Krátce přitom okomentujeme i obecnější aspekty této problematiky, zejména motivační význam pokusů a vztah reálných a virtuálních experimentů.

**A**by bylo jasno, experimenty zmíněnými v názvu článku nemáme na mysli reformy vzdělávání a „experimenty“, na jak malý počet hodin týdně lze výuku fyziky zredukovat. Jde nám o fyzikální pokusy prováděné při výuce, při nichž si žáci a studenti „sáhnou na fyziku“ a vidí či zjišťují, jak opravdu v realitě funguje. Než uvedeme několik konkrétních příkladů, položme si nejprve provokativní otázku:

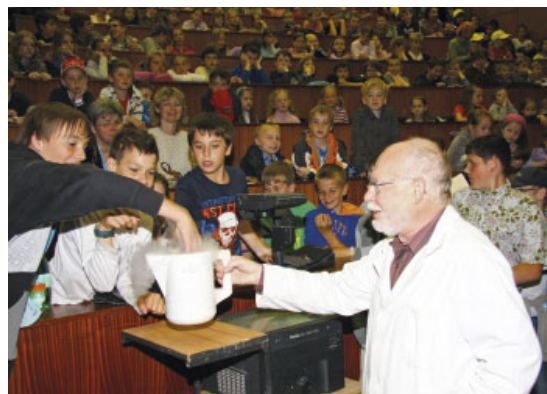
## Proč při výuce fyziky dělat pokusy?

Většinu fyziků, zejména experimentálně založených, taková otázka možná přijde až svatokrádežná. Vždyť pokus je základem, od něž se vše odvíjí, bez něj by teorie malovala jen vzdušné zámky! Tak jak bychom se bez něj při výuce fyziky chtěli obejít?

Na druhou stranu, hodin fyziky je na základních i středních školách často málo, pomůcky jsou drahé nebo chybí, připravovat pokusy je náročné, občas se nepodaří, proč se tedy reálnými experimenty trápit? Pro generace žáků, kteří s počítači vyrůstali téměř od plenek, je přece jednodušší zobrazit na obrazovce či interaktivní tabuli nějakou simulaci či aplet, je jich na internetu spousta. Vše je pěkné, názorné a bez starostí, vše perfektně vychází. A pokud bychom chtěli přece jen ukázat pokus, stačí najít vhodné video na YouTube...

Možná je tohle opravdu obraz jedné z budoucností výuky fyziky – ale doufejme, že se, alespoň v takto přemrštěné a karikované podobě, nebude realizovat. Alespoň pevně věříme, že dobří učitelé fyziky na reálné experimenty nezapomenou a nezanevrou. Proč?

Jedním z důvodů je řada rolí, které pokusy ve výuce plní. Nebudeme zde tyto role nijak kategorizovat, podobné přehledy lze najít například v různých učebnicích didaktiky fyziky. Spíše přidáme jemné varování: Nechtějme toho od pokusů až příliš. Navzdory svému významu nejsou a nemohou být ve výuce automaticky všelékem. Přehnané představy o tom, co vše mohou po-



**Obr. 1** Zájem mládeže o reálné experimenty se jasně projevuje i mimo školu.

kusy a praktická činnost žáků a studentů zajistit, jsou i ve světě zhruba od devadesátých let podrobovány kritickému přehodnocení. Zajímavý a podle našeho názoru vyvážený pohled najdeme třeba ve 4. kapitole („*The role of practical work in school science*“) publikace [1].

Ale i kdyby jiné důvody pominuly, velice silným argumentem pro pokusy ve výuce je to, jak *motivují* žáky a studenty. Zájem mládeže o reálné experimenty se jasně projevuje i mimo školu, na různých akcích typu „Vědohrani“ (v Praze), „Věda v ulicích“ (v Hradci Králové a v Plzni), „Jarmark matematiky, fyziky a chemie“ (v Olomouci), „Festival vědy“ v Brně a dalších akcích (opravdu tu bohužel nelze uvést všechny), nemluvě o science centrech jako liberecký iQpark a plzeňská Techmania. V Praze na MFF tento zájem vnímáme i na pravidelných středečních „Demonstračních fyzikálních pokusech pro SŠ“. Pokusy, především pokusy dělané vlastníma rukama, byly též aktivitou, o kterou jednoznačně nejvíce stáli žáci ZŠ i studenti SŠ v rozsáhlém průzkumu, který byl před několika lety proveden v projektu v rámci Národního programu výzkumu II (viz [2, 3]).

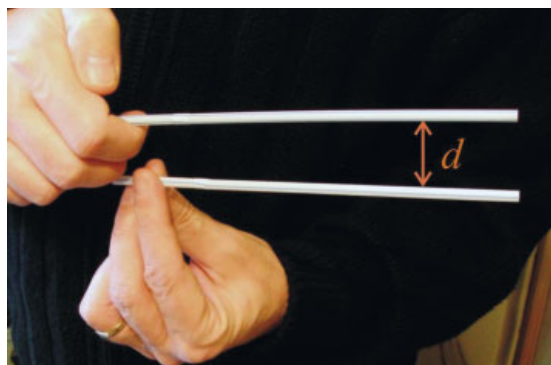
Pokusy tedy jednoznačně jsou žádaným kořením výuky fyziky. Pojďme si na několika příkladech prezentovat lehkou „ochutnávku“ některých jejich typů. Pokusy využitelných ve výuce jsou ovšem stovky, ne-li tisíce. Náš výběr je tedy nutně subjektivní. Snad alespoň některé z těch, které představíme, mohou být i pro čtenáře Československého časopisu pro fyziku něčím zajímavé, netradiční, případně i překvapivé. Dále uvedené experimenty jsme přitom vybrali z těch, které děláme sami, případně známe ze svého okolí. Zajímavé a inspirativní školní fyzikální pokusy ovšem najdete na všech katedrách připravujících budoucí učitele fyziky (a na řadě dalších kateder a pracovišť vysokých škol), u fyzikářů a fyzikářek na středních i základních školách, v organizaci Debrujárů, v kroužcích fyziky, v již zmíněných science centrech i jinde. Dokladem experimentální tvořivosti učitelů a pracovníků v oblasti fyzikálního vzdělávání jsou každoroční konference Veletrh nápadů učitelů fyziky (viz elektronický „supersborník“ vybraných příspěvků [4]).

### Pokusy s jednoduchými pomůckami

I velmi jednoduché pokusy mohou žákům pomoci zjišťovat vlastnosti světa kolem nás, a to nejen kvalitativně. Příkladem může být *atmosférický tlak*. Jeho velikost lze vyčíst v učebnicích, tabulkách či na webu. Ale pak to může být jen číslo k „nabiflování“. Místo toho lze vzít plastovou injekční stříkačku, stlačit píst na doraz, ucpat prstem otvor a táhnout píst. Při malé síle se píst nehne (že by „horror vacui“? ☺), při větší jej opravdu táhneme, vcelku konstantní silou. Změříme-li sílu a průměr pístu, můžeme lehce vypočíst, jaký tlak překonáváme. K měření nepotřebujeme ani siloměr, stačí za píst zavěsit jednu nebo dvě PET lahve naplněné dostatečným množstvím vody – viz obr. 2.

Výsledek je samozřejmě zkreslen vlivem tření pístu o stěny stříkačky, ale v zaokrouhlení dostaneme řádově správnou hodnotu, např. na píst stříkačky o průměru pístu 1,6 cm lze zavěsit asi 2 kg (resp. siloměr při posouvání pístu ukáže sílu asi 20 N), takže  $p = 20 \text{ N} / 2 \text{ cm}^2 = 10 \text{ N} / \text{cm}^2 = 10^5 \text{ Pa}$ . Navíc je z pokusu jasně vidět, že atmosférický tlak na ploše 1 cm<sup>2</sup> „unes“ 1 kg, což je pro žáky názornější než 100 tisíc „čehosi“ v soustavě SI. Podobně můžeme atmosférický tlak určit při odtrhávání malé přísavky třeba od desky stolu.

Jiným příkladem mohou být jednoduché pokusy z oblasti *elektrostatiky*, konkrétně pokusy s plastovými brčkami. (Blíže viz [5–6].) Nejjednodušším pokusem „pro malé děti“ je zelektrovat brčko třením, např. papírovým kapesníkem, a zkusit, že pak drží na stěně či na jiné ploše. Tímto pokusem vlastně kopírujeme starověká pozor-



**Obr. 3** Jak velký náboj je na zelektrovaných plastových brčkách?

ování, že jantar může přitahovat lehké předměty. I lečtější fyzika však v souvislosti s tímto pokusem může zaskočit otázka: *Jak velký náboj je na zelektrovaném brčku?* Zkuste si schválně napsat svůj vlastní odhad.

Všichni víme, že náboj se měří v coulombech – ale kromě specialistů většinou nemáme dobrou představu, jak velké náboje na předmětech kolem nás mohou být. Pro brčko se odhady, které žáci, učitelé i někteří fyzici vyslovují, pohybují od desítek či stovek pC až do mC; lidé z jiných oborů občas uvedou i několik C. Náboj je sice důležitou veličinou, ale jak vidno, pro představu o jeho velikosti nám prostě v elektrostatice chybí zkušenost. (Na rozdíl od jiných veličin, jako je třeba délka – necháte-li odhadovat délku brčka, odpovědi nebudou mít rozptýl od zlomků milimetru po kilometry.)

Náboj brčka bychom samozřejmě mohli určit pomocí měřiče náboje. Alespoň řádový odhad však můžeme udělat z jednoduchého pokusu, při němž se dvě souhlasně nabitá brčka odpuzují – viz obr. 3. Spodní brčko držíme v prstech pevně, horní jen lehce, takže nad spodním „plave“ ve vzdálenosti několika cm díky elektrostatickému odpuzování, které vyrovnává tíhu brčka. Stačí zvážit brčko (nebo celý sáček brček, nemáme-li dostatečně citlivé váhy), předpokládat, že na obou brčkách je přibližně stejný náboj a pro hrubý odhad velikosti náboje použít Coulombův zákon. Nechceme čtenáře připravovat o potěšení z vlastního experimentování a výpočtu, tedy o aktivity označované anglickým termínem *hands-on, minds-on* či před léty nezávisle vymyšleným heslem projektu Heuréka „vlastníma rukama a hlavou“. Proto zde explicitě neuvědíme výsledek.<sup>1</sup> (Zájemci jej najdou v [5–6].) A jen pro uklidnění čtenářů, kteří se nyní oprávněně bouří proti použití Coulombova zákona na brčka, která mají k bodovým nábojům opravdu daleko: Tento experiment je pěknou motivací k přesnějším výpočtům na úrovni úvodních VŠ kurzů, ať už v aproximaci nabitých přímek nebo úseček konečné délky. Ty ukáží, že se při odhadu vycházejícím z Coulombova zákona kupodivu většinou dopustíme chyby jen asi 50 % nebo menší, viz [5].

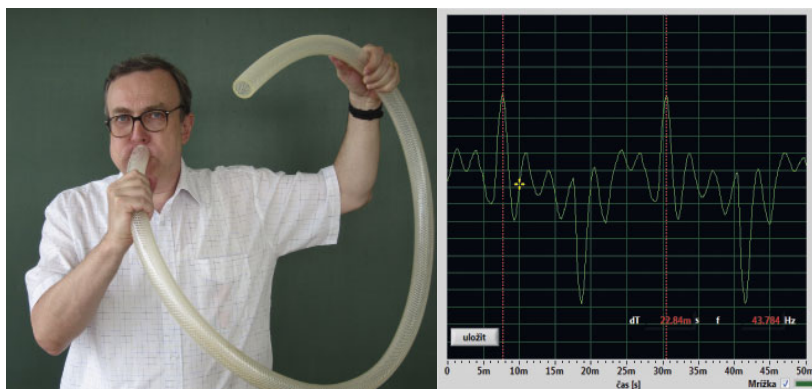
### Nezapomínejme na měření s pomocí počítače

V posledních letech jsou stále populárnější měření využívající počítač. Systémem, který na školách v ČR výrazně nastartoval toto využití výpočetní techniky, byl a je známý ISES. Na Slovensku sehrál podobnou roli IP Coach, široce využívaný v řadě evropských zemí. Z příspěvků na konferencích (ale nejen z nich) je zřejmé, že v současnosti jsou v českých školách „na postupu“ systémy PASCO a Vernier. Jejich výhodou je skutečnost, že tato zařízení umí fungovat jako „datalogger“, tedy měřit a zpracovávat výsledky i bez počítače, tedy i mimo školu, „v terénu“. S jejich pomocí lze tedy třeba měřit zrychlení jedoucího vlaku a z něj pak vypočítat rychlost a ujetou vzdálenost, jak ukazuje konkrétní příklad takového experimentu popsany v [7]. Měřič zrychlení lze vzít třeba na horskou dráhu v zábavním parku (takováto měření se studenty již před pár lety popisovali kolegové ze Švédska) nebo do akrobatického letadla (tohle autor příspěvku [7] realizoval zcela nedávno a jistě to vbrzku podrobněji popíše).

<sup>1</sup> Náboj řádu coulombů to opravdu není. Pokud někdo vysloví takovýto odhad, je to ve výuce dobrou příležitostí k diskusi o velikosti faktoru  $1/4\pi\epsilon_0$  v Coulombově zákoně: Dvě brčka, každé o náboji 1 C bychom 1 m od sebe v rukách asi neudrželi;  $10^{10}$  N je přece jen moc. I milicoulomby by byly příliš.



**Obr. 2** Atmosférický tlak lze přibližně změřit pomocí plastové stříkačky a závaží.



Obr. 4 Rychlost zvuku lze změřit i kusem zahradní hadice.

Počítače a datalogery lze ale samozřejmě využít i k experimentům ve škole. Výhodné je to při měření dějů, které jsou příliš rychlé, než aby je mohli žáci a studenti přímo sledovat. Můžeme například změřit, jak po zapnutí „nabíhá“ světlo žárovky – a to skutečným proměření intenzity světla v závislosti na čase, viz [8]. Příklady, jak užitečně využít při školních experimentech výpočetní techniku, je ale dlouhá řada. Podstatné je, že toto využití už ztratilo punc výlučnosti. Počítač či datalogger je prostě dalším z měřicích zařízení, které umožní provést experimenty rychleji, leckdy lépe a názorněji než „klasické“ měření, a umožní dělat i experimenty, které by bez nich bylo možné provést jen obtížně nebo vůbec.

Poznamenejme, že některá počítačová měření ani nevyžadují specializované měřicí systémy. Někdy stačí zvuková karta počítače doplněná programem, který z počítače udělá osciloskop, jako je např. pro výukové účely volně dostupný *SoundcardScope* [9]. Příkladem může být poměrně atraktivní *měření rychlosti zvuku kusem zahradní hadice*, která slouží jako náhrada „didjerydo“ australských domorodců – viz obr. 4. Vlnová délka základní frekvence vyluzovaného zvuku je v tomto případě čtyřnásobkem délky hadice. (Pro zpřesnění můžeme započítat i korekci na průměr otvoru.) Frekvenci určíme pomocí *Soundcardscopu*, součin  $f\lambda$  pak dá s dobrou přesností hodnotu mezi 330 a 350 m/s.

### Laboratoře vzdálené i blízké

Co když ale pokus vyžaduje složitější a dražší experimentální vybavení? V tom případě se mohou uplatnit *vzdálené laboratoře*, tedy skutečné experimenty, které lze ovládat na dálku přes internet. I v ČR se jich postupně buduje víc. „Pionýrem“ mezi nimi byla Vzdálená laboratoř Kabinetu obecné fyziky MFF UK. Příkladem jednoho z pokusů, které tam v posledních letech při-

byly, je *měření vnějšího fotoelektrického jevu* (například s využitím nabíjení kondenzátoru), které umožňuje určit Planckovu konstantu. Zájemci si mohou pokus vyzkoušet na webové adrese [10]. Za zdůraznění stojí, že stále jde o reálný experiment, jehož uspořádání vidíme pomocí webové kamery a z něhož získáme reálná, právě naměřená data.

Ale přece jenom... Co když chcete provádět pokusy naživo a přímo v laboratoři? V takovém případě je na MFF UK v Praze k dispozici Interaktivní fyzikální laboratoř pro středoškoláky (IFL) a v ní řada aparatur, které umožňují mnohá zajímavá měření, o nichž byste možná řekli, že jsou „běžnému smrtelníkovi“ nedostupná. Jako příklad uveďme *měření rychlosti světla*. Takové měření je v principu jednoduché a základní idea je srozumitelná i žákům druhého stupně ZŠ – zjistíme prostě, jak dlouho světlu trvá, než urazí jeden metr a hotovo. Problém je ale v tom, jak to zjistit. Světlo se přece jenom pohybuje příliš rychle, než aby stačilo vzít lampu, metr a stopky... O tom se konec konců už kdysi dávno přesvědčil Galileo Galilei, když se roku 1607 pokusil změřit, jak rychle se šíří světlo mezi vrcholy dvou kopců. Galileo neuspěl díky nepřesnosti tehdejší měřicí techniky. My ale máme k dispozici vysoce přesné elektronické přístroje a s těmi to už problém není. V IFL používáme modulovaný laserový signál. Studenti si mohou představit, že laser velmi rychle bliká (konkrétně s frekvencí 50 MHz). Zaznamenáváme jeho blikání, když opouští experimentální přístroj, necháme blikající laserový paprsek odrazit od zrcátka (resp. od odrazky na bázi malých koutových odrazečů) a u odraženého paprsku opět zaznamenáváme jeho blikání. Je zřejmé, že odražený signál bliká po návratu s určitým zpožděním vůči tomu, jak blikal při výstupu z přístroje. Toto zpoždění jsme schopni změřit právě pomocí přesné elektroniky (např. si můžeme oba signály prohlížet na obrazovce osciloskopu). Stačí už jenom změřit vzdálenost zrcátka od přístroje a následný výpočet rychlosti světla je jednoduchý. Laserový paprsek nemusí procházet jenom vzduchem. Lze ho nechat projít tyčí z průhledného materiálu, nebo mu do cesty nastavit nádobu s vodou. Potom můžeme změřit rychlost světla ve zvoleném prostředí a vypočítat index lomu tohoto prostředí. Aparaturu pro měření rychlosti světla s vloženou trubicí naplněnou vodou ukazuje příložená fotografie – viz obr. 5.

A co třeba zopakovat nějaký slavný experiment z historie fyziky? Ani to není problém. A aby to bylo opět něco delikátního, *změříme gravitační konstantu*. Jinými slovy, jde o změření gravitační síly, kterou se přitahují dvě konkrétní tělesa. Na MFF UK máme funkční kopii Cavendishových gravitačních vah. (Po-



Obr. 5 Moderní pomůcky umožňují měřit rychlost světla ze vzdálenosti a doby šíření.

nechme stranou otázku, zda je tento přístroj a experiment přiřítán Cavendishovi oprávněně.) Tímto řízením měříme sílu, kterou se přitahují dvě koule o hmotnostech přibližně 19 kg a 35 g, když jsou jejich středy asi 10 cm vzdálené. Aby bylo jasnější, o co se pokoušíme, říkáme studentům, aby si představili, že mají na dlani kapičku rosy ( $1 \text{ mm}^3$  vody). Ta do dlaně tlačí přibližně desettisíckrát více, než odpovídá síle měřené pomocí našich gravitačních vah. Princip měření je opět jednoduchý. Na tenkém molybdenovém vlákně visí „činka“ – dvě malé kuličky spojené tenkou tyčkou. Dohromady tvoří torzní kyvadlo. Kousek vedle kuliček činky jsou velké olověné koule. Ty pomocí momentů gravitačních sil vychýlí torzní kyvadlo z rovnovážné polohy. Koule můžeme přemístit na opačné strany činky a vychýlit ji tak na druhou stranu. Když známe směrný moment vlákna, tedy moment, kterým ho lze zkroutit o jednotkový úhel, je již měření jednoduché. Změříme, jak se činka vychýlí vlivem olověných koulí (tedy o jaký úhel se zkroučí vlákno momentem sil působících na torzní kyvadlo), a z toho vypočítáme, jak velká je „stáječící“ gravitační síla. Jednoduché... Jenomže výchylky jsou nepatrné. Proto je na vlákně malé lehounké zrcátko, na které svítíme laserem a pozorujeme „prasátko“ na devět metrů vzdálené zdi posluchárny. Z pohybů tohoto prasátka určíme jak směrný moment vlákna (změněním periody kmitů torzního kyvadla gravitačních vah), tak pootočení činky způsobené momenty gravitačních sil, jimiž působí olověné koule na kuličky činky. Ptáte se na výsledek? Ten se, podle toho, jak pečlivě a dlouho měříme, liší od tabulkové hodnoty o 10–20 %. A pokud se studenti zeptají, proč přístroj říkáme gravitační váhy, objasníme jim, že pomocí výsledku můžeme vypočítat hmotnost Země. (Ostatně ani Cavendish svým přístrojem neměřil gravitační konstantu, viz [11].) Jsou to tedy váhy, jimiž lze zvážit významnou a elegantní dámu – naši Zemi.

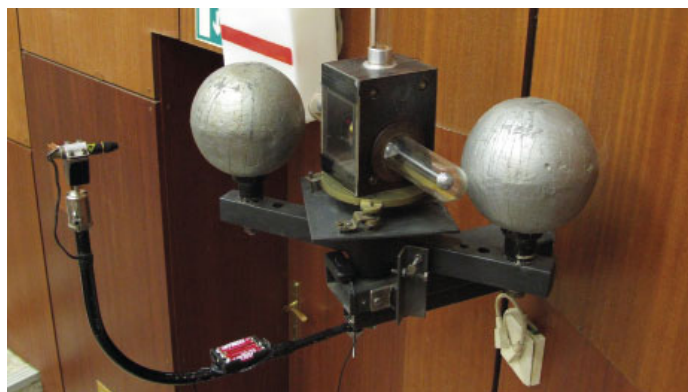
### Závěrem

Pokusů, které lze bezprostředně využít ve výuce fyziky, je nepřeberně. (Skoro bychom napsali „nespočetně“, ale to bychom museli jít vrátit diplomu.) Sahají od jednoduchých kvalitativních (viz např. [12]) po experimenty vyžadující sofistikované a drahé aparatury. Vysvětlovat a diskutovat je také lze na nejrůznějších úrovních, od „vyprávěnek“ pro předškoláky (ani ty by ale neměly být zásadně špatně) až po rozbor vhodný pro řešitele fyzikálních olympiád a VŠ studenty. Přitom náročnější matematický popis mohou vyžadovat leckdy i zdánlivě prosté experimenty, viz např. [13] nebo [14].

A vztah reálných a virtuálních experimentů? Je zbytečné a nerozumné stavět je proti sobě. Nejde o rozhodnutí „buď – anebo“, ve výuce jsou potřeba jedny i druhé.

Při ilustraci toho, jak funguje teorie, mají aplety, simulace a modelování ve výuce fyziky dnes své nezpochybnitelné místo. Jsou názorné, mohou potlačit veškerý „balast“ a jasně prezentovat jev nebo zákonitost, o níž jde, umožní vyzkoušet si experimenty příliš drahé, náročné nebo nebezpečné. S postupujícím rozvojem počítačů bude proto jejich význam časem nejspíš ještě vzrůstat.

Reálné experimenty však mají na své straně také jasné výhody. Jednu z těch nezastupitelných bychom snad mohli nazvat „bohatstvím reality“: I v jednoduchém pokusu často narazíme na to, že příroda se liší od zjednodušených modelů. Což nás motivuje jít do hloubky, zkoumat další vlivy a efekty, nebo naopak umožňuje dis-



**Obr. 6** Cavendishovy gravitační váhy – vhodný doplněk vysokoškolské posluchárny.

kutovat, co vše pro náš popis musíme zanedbat a od čeho abstrahovat. S tím souvisí i to, že reálný pokus někdy nevyjde, vychází s chybami apod. Soudíme, že dokud my i naši žáci žijeme ve skutečném a ne ve virtuálním světě, tak i toto vše bychom si z fyziky měli odnášet.

Takže právě proto, podobně jako stojí za to přivést mládež od virtuálních krajin na skutečné horské stezky a od simulace plamenů na LCD obrazovce ke skutečnému ohni, kde hoří skutečné dřevo, stojí dnes i do budoucna za to kořenit výuku fyziky také skutečnými, reálnými pokusy.

### Literatura

- [1] J. Benett: *Teaching and learning science*. Continuum, London, N. Y. 2003.
- [2] L. Dvořák: *Lze učít fyziku zajímavěji a lépe? Příručka pro učitele*. Matfyzpress, Praha 2008, dostupné na WWW: <<http://kdf.mff.cuni.cz/vyzkum/NPVII/PriruckaProUcitele.pdf>>.
- [3] M. Kekule, V. Žák: „Selected Attitudes of Students to Physics at School in the Czech Republic“, *Sci. Educ.* **1**, 51–71 (2010), dostupné na WWW: <<http://www.scied.cz/>>.
- [4] Veletrh nápadů pro fyzikální vzdělávání, dostupné na WWW: <<http://kdf.mff.cuni.cz/veletrh/sbornik/>>.
- [5] L. Dvořák: „Simple quantitative electrostatic experiments for teachers and students“, *Proceedings of GIREP 2010*, v tisku, dostupné na WWW: <[http://www.univ-reims.fr/site/evencement/girep-icpe-mptl-2010-reims-international-conference/gallery\\_files/site/1/90/4401/22908/29321/29496.pdf](http://www.univ-reims.fr/site/evencement/girep-icpe-mptl-2010-reims-international-conference/gallery_files/site/1/90/4401/22908/29321/29496.pdf)>.
- [6] L. Dvořák: „Low-cost Electrostatic Experiments“, *Lat. Am. J. Phys. Educ.* Vol. **6**, Suppl. I, 153–158 (June 2012). Dostupné na WWW: <[http://www.lajpe.org/icpe2011/28\\_Leos\\_Dvorak.pdf](http://www.lajpe.org/icpe2011/28_Leos_Dvorak.pdf)>.
- [7] P. Böhm: „Fyzika na (školním) výletě aneb akcelerometr ve vlaku“, dostupné na WWW: <<http://fyzweb.cz/clanky/index.php?id=150>>.
- [8] J. Jermář: „Proměření náběhu žárovky“, dostupné z WWW: <<http://fyzweb.cz/clanky/index.php?id=166>>.
- [9] Ch. Zeitnitz: „Soundcard oscilloscope“, dostupné z WWW: <[http://www.zeitnitz.de/Christian/scope\\_en](http://www.zeitnitz.de/Christian/scope_en)>.
- [10] Vzdálená laboratoř KVOF MFF UK: „Vnější fotoefekt“, dostupné z WWW: <<http://www.ises.info/index.php/cs/laboratory/experiment/photoelectric-effect-VA>>.
- [11] B. E. Clotfelter: „The Cavendish experiment as Cavendish knew it“, *Am. J. Phys.* **55**, 210–213 (1987).
- [12] Z. Drozd: *Pokusy z volné ruky*. Prometheus, Praha 2003.
- [13] J. Janová, J. Musilová, J. Bartoš: „Coupled rolling motion: a student project in non-holonomic mechanics“, *Eur. J. Phys.* **30**, 1257–1269 (2009).
- [14] L. Dvořák: „Pružné kyvadlo: od teoretické mechaniky k pokusům a zase zpátky“, *Pokroky MFA* **51**, 312–327 (2006).