

Jak elektrodynamika vyústila ve speciální teorii relativity

BOHUMIL VYBÍRAL

Přírodovědecká fakulta Univerzity Hradec Králové

1. Cesty fyzikálního poznávání nebývají přímé

Proces vědeckého poznávání přírody lze zařadit do nejvyšší kategorie intelektuální činnosti člověka. Fyzikální zákony formuluje člověk na základě objektivního zkoumání dějů, které v celém komplexu složitosti probíhají v přírodě. A rozpoznat průběh jednotlivých elementárních dějů nebývá právě lehkým úkolem. V procesu poznávání se nejlépe osvědčil fyzikální experiment, jak jej jako vědeckou metodu poznávání formuloval renesanční vědec *Galileo Galilei* (1564 – 1642). Staleté zkušenosti člověka ukazují, že experiment měl (a stále má) rozhodující význam pro rozvoj fyziky. Dobře je to vidět zejména na vývoji elektrodynamiky.

Sledovat historický vývoj elektromagnetismu od původně zcela samostatných oborů elektřiny a magnetismu (18. stol.) přes experimentální elektrodynamiku, teorii elektromagnetického pole (19. stol.) až ke vzniku speciální teorie relativity (20. stol.) je velmi poučné. Na tomto vývoji můžeme totiž sledovat, jak příroda velmi nerada odhaluje svá tajemství. Stačí si uvědomit, jaké úsilí a trpělivost musel mít po dobu devíti let *M. Faraday*, než se mu podařilo objevit zákon elektromagnetické indukce. Nebo jakou matematickou erudici a intuici musel mít *J. C. Maxwell*, aby zavedl plnohodnotný „posuvný“ proud, provedl syntézu experimentálních poznatků a teoreticky dospěl k vlnovým elektromagnetickým jevům. Jak naopak scestné byly éterové hypotézy, které tehdy přešly do teorie elektromagnetického pole z optiky a které dokázaly zbrzdit vývoj oboru téměř na čtvrt

století. Na druhé straně je obdivuhodné, s jakou elegancí se *A. Einsteinovi* roku 1905 podařilo (dokonce jen během šesti týdnů) vytvořit speciální teorii relativity, která završovala 120letý vývoj oboru a kterou již nebylo prakticky třeba opravovat (po 3 měsících Einstein provedl jen „malé“ doplnění o slavné $E = mc^2$). Tato převratná teorie byla již „zakódována“ v elektrodynamice a čekalo to jen na odvážného génia, aby dostal odvalu a rozhrnul oponu poznání. A tím právě byl mladý Einstein. Na vývoji této části fyziky lze nejen pozorovat, jak člověk poznává přírodní děje a nalézá vazbu mezi dosud samostatnými obory, ale jak nakonec úspěšně vytváří stále dokonalejší fyzikální obraz světa a využívá poznané jevy pro ve svůj prospěch prostřednictvím četných technických aplikací.

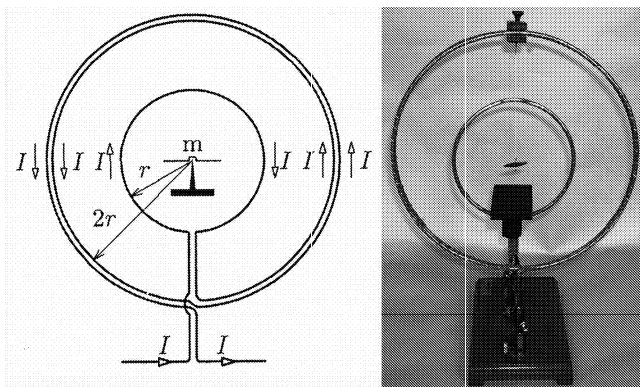
2. Experimentální východiska elektromagnetismu

Za první dva významné experimentální pilíře elektromagnetismu považujeme *Coulombův zákon elektrostatiky* (1785), jemuž předcházela *Coulombův zákon magnetostatiky*. Toto byl také historicky významný zákon, avšak jak ukázal další vývoj, byl poněkud zavádějící pro užívání pojmu „magnetické množství“; nicméně přešel do soustavy Maxwellových rovnic jako rovnice o neexistenci magnetických monopolů. Pozoruhodné je, že autorem těchto fyzikálních zákonů je francouzský vojenský inženýr *Ch. A. Coulomb*, který nejprve (1784) musel navrhnout torzní váhy a vytvořit teorii krutu (torze) pružných drátů a tyčí kruhového průřezu (přesně platnou dodnes), aby mohl provést kvantitativní měření. Po publikování Coulombových zákonů již matematici *S. D. Poisson*, *P. S. Laplace* a *G. Green* vytvořili matematickou teorii elektrostatiky (a nezávislé, i když jevově v mnohém analogické magnetostatiky) s využitím teorie potenciálu tehdy užívané již v Newtonově teorii gravitace.

Významným mezníkem v dalším vývoji byl rok 1800, kdy Ital *A. Volta* sestrojil elektrochemický zdroj stejnosměrného napětí („Voltův sloup“), který teprve umožnil provádět experimenty se stejnosměrným proudem. Pak již následuje rok 1820, kdy dánský fyzik *H. Ch. Oersted* objevil schopnost elektrického proudu budit magnetické pole. Poté poznávání již akcelerovalo. Kvantitativní měření provedli Francouzi *J. B. Biot* a *F. Savart* ještě koncem roku 1820 (přístroj viz obr. 1) a vzápětí poté (1821) matematik *P. S. Laplace* podal formulaci diferenciálního zákona. Jeho současný diferenciální tvar (v soustavě SI) pro indukci $\mathbf{B}$ je

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^2} (d\mathbf{l} \times \mathbf{r}^0), \quad |\mathbf{r}^0| = 1. \quad (1)$$

Zákon je znám jako *Biotův-Savartův-Laplaceův zákon* a tvoří třetí experimentální pilíř elektromagnetismu. Bezprostředně z něj plyne ekvivalentní a pro teorii významný *zákon celkového proudu*.



Obr. 1 Přístroj Biotův-Savartův (1820), kterým bylo provedeno kvantitativní měření magnetického pole elektrického proudu; schéma a provedení

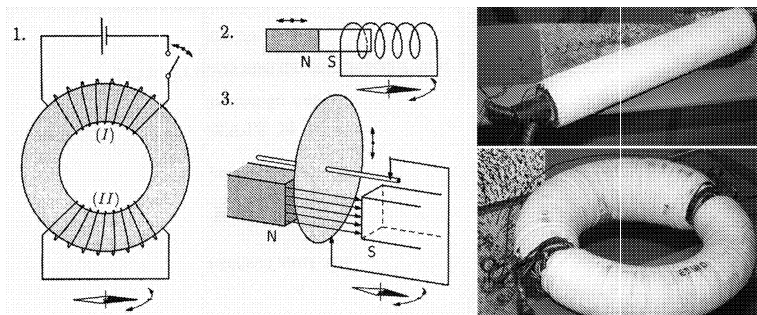
Zajímavé je, že hned po zveřejnění Oerstedova objevu se v letech 1820–1827 magnetickými účinky elektrického proudu také zabýval Francouz *A. M. Ampère*, který do té doby působil převážně jako matematik. V článku „*Teorie elektromagnetických jevů, odvozená výlučně z pokusů*“ (1826) publikoval diferenciální zákon o magnetické interakci mezi dvěma elementy proudovodičů Idl , k němuž dospěl zobecněním svých důmyslných experimentů. Dnes se *Ampérův zákon* uvádí ve tvaru

$$d\mathbf{F}_{\text{mg}} = Idl \times \mathbf{B}, \quad (2)$$

kde $\mathbf{B}$ je indukce magnetického pole (jehož zdroj není blíže určen) a do nějž je vložen elementární proudovodič. Původní Ampèrovo vyjádření je obecnější, neboť současně v podstatě zahrnuje i zákon B-S-L (1). V soustavě Maxwellových rovnic se výsledek (2) uvádí jako vedlejší rovnice (ve tvaru Lorentzovy síly pro náboj pohybující se v elektromagnetickém poli).

Angličan M. Faraday se od roku 1822 snažil experimentálně najít inverzní jev k Oerstedovu objevu, tj. jak pomocí magnetismu vyvolat elektrický proud. I když tomu věnoval značné úsilí, podařilo se mu to až roku

1831¹⁾, kdy experimentálně dospěl ke třem možným způsobům elektromagnetické indukce (obr. 2). *Faradayův zákon elektromagnetické indukce*, který Faraday pro indukované napětí vyjádřil ve tvaru $\mathcal{E} = -\partial\Phi/\partial t$, Maxwell využil v hlavní soustavě rovnic elektromagnetického pole jako čtvrtý experimentální pilíř nové teorie. Rovněž použil geniální Faradayovu představu o poli (i když tehdy ještě mechanistickou), zprostředkovávající elektromagnetickou interakci, a o siločarách, jimiž se znázorňuje (a podle Faradye realizuje).



Obr. 2 Faradayovy tři experimenty o elektromagnetické indukci (1831) a Faradayovy cívky



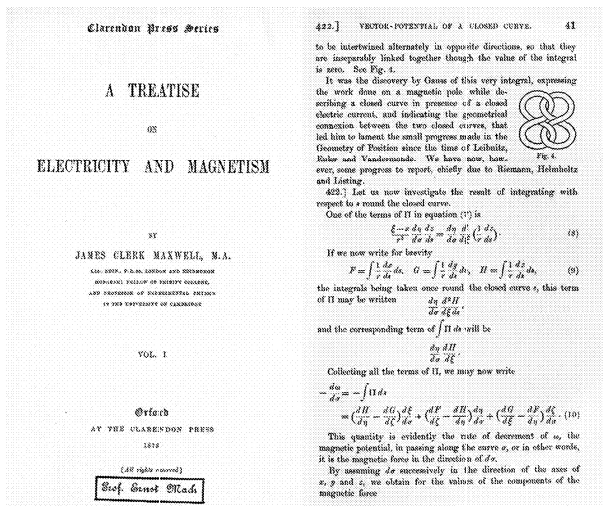
Obr. 3 Fyzikové 1. období elektrodynamiky: *André Marie Ampère* (1775–1836), *Michael Faraday* (1791–1867), *Wilhelm Eduard Weber* (1804–1891) a *James Clerk Maxwell* (1831–1879)

Výše uvedené skutečnosti jsou velmi důležité a dobře známé. Méně často se připomíná přínos německého fyzika *W. Webera*, který propojil Coulombův zákon elektrostatiky se zákonem Ampérovým a kterým souhrnně

¹⁾ Zajímavé je, že právě v tomto roce se narodil J. C. Maxwell.

popsal (nerelativistickou) sílu mezi dvěma nerovnoměrně se pohybujícími se elektrickými náboji. Významným Weberovým přínosem z roku 1852 je to, že po náročných experimentech se mu podařilo vyhodnotit vztah mezi konstantami pro vakuum – permitivitou, permeabilitou a zjistil, že jsou vázány rychlostí světla ve vakuu: $\varepsilon_0 \mu_0 = c^{-2}$. Tento tehdy překvapující výsledek lze považovat za *první experimentální můstek mezi elektrodynamikou a tehdy ještě dlouho neznámou speciální teorií relativity*. Významní fyzikové 1. období elektrodynamiky jsou na obr. 3.

3. Maxwellova syntéza



Obr. 4 Titulní strana 1. dílu věhlasné Maxwellovy monografie [9], již byla založena teorie elektromagnetického pole; ukázka stránky z 2. dílu

Mezi roky 1855 až 1873 provedl skotský fyzik *J. C. Maxwell* geniální syntézu experimentálních poznatků z elektromagnetismu (souhrnně ve dvoudílné monografii [9] – titulní strana tohoto spisu je na obr. 4). Intuitivně tehdy doplnil zákon celkového proudu o posuvný (dnes Maxwellův) proud o hustotě $\partial \mathbf{D} / \partial t$, jemuž rovněž přisoudil magnetické účinky a vytvořil geniální soubor rovnic. Úplná soustava hlavních Maxwellových rovnic elektromagnetického pole pro intenzity a indukce elektrického a magnetického

pole v pozdějším vektorovém zápisu a v soustavě SI má diferenciální tvar

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \mathbf{j}, \quad \operatorname{div} \mathbf{D} = \varrho, \quad \operatorname{rot} \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0, \quad \operatorname{div} \mathbf{B} = 0. \quad (3)$$

První z rovnic je vyjádřením zákona celkového proudu (vycházejícího z experimentálního Biotova-Savartova-Laplaceova zákona), který je doplněn o hustotu posuvného proudu. Druhá rovnice bezprostředně plyne z Coulombova zákona elektrostatiky a vyjadřuje Gaussův zákon elektrostatiky. Třetí rovnice má experimentální základ ve Faradayově zákoně elektromagnetické indukce a čtvrtá rovnice je Gaussův zákon magnetostatiky a vyjadřuje skutečnost, že neexistují magnetické monopóly (a myšlené magnetické siločáry jsou tedy uzavřené křivky). Tato soustava Maxwellových rovnic se doplňuje *soustavou vedlejších rovnic*, k nimž patří lokální (diferenciální) tvar *Ohmova zákona* ($\mathbf{j} = \gamma \mathbf{E}$), vztahy mezi indukci a intenzitami pro elektrické a magnetické pole (tzv. materiálové vztahy pro izotropní nebo neizotropní prostředí; pro izotropní homogenní prostředí to jsou jednoduché vztahy $\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$, $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$). Dále je to vztah pro *Lorentzovu sílu*, působící na elektrický náboj, pohybující se v elektromagnetickém poli: $\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$ a vztah pro *hustotu elektromagnetické energie*: $w = (\mathbf{E} \cdot \mathbf{D} + \mathbf{H} \cdot \mathbf{B})/2$. Soustava se ještě doplňuje *rovnicí kontinuity* pro elektrický náboj a proud ($\operatorname{div} \mathbf{j} + \partial \varrho / \partial t = 0$), jež bezprostředně plyne z platnosti 1. a 2. rovnice hlavní soustavy (3). Důležitou součástí Maxwellovy soustavy parciálních diferenciálních rovnic jsou okrajové podmínky.

Geniální intuitivní doplnění zákona celkového proudu o posuvný proud přivedlo Maxwella matematickou cestou k vlnovým rovnicím a současně k poznatku, že elektromagnetické pole se ve vakuu šíří rychlostí světla o velikosti c , pro niž platí $\varepsilon_0 \mu_0 = c^{-2}$ (vztah mezi těmito konstantami pro vakuum experimentálně již roku 1852 zjistil Weber, jak již bylo uvedeno) a v prostředí rychlostí o velikosti $v = c/(\varepsilon_r \mu_r)^{1/2} < c$. Z okrajové podmínky pro tečné složky intenzity elektrického pole na rozhraní dvou prostředí Maxwell teoreticky dospěl k poznatku, že zde se rovinná elektromagnetická vlna odráží a láme, přičemž splňuje zákony známé z optiky (zákon odrazu a Snellův zákon). To Maxwella přivedlo k vypracování elektromagnetické teorie světla. Bohužel od optiků (*Th. Young, A. J. Fresnel*, 1800) přijal také hypotézu o *éteru* – o jakémisi materiálním prostředí, potřebném k jeho šíření. Maxwell se experimentální verifikace svých geniálních teoretických poznatků již nedožil, protože roku 1879²⁾ ve svých 48 letech zemřel.

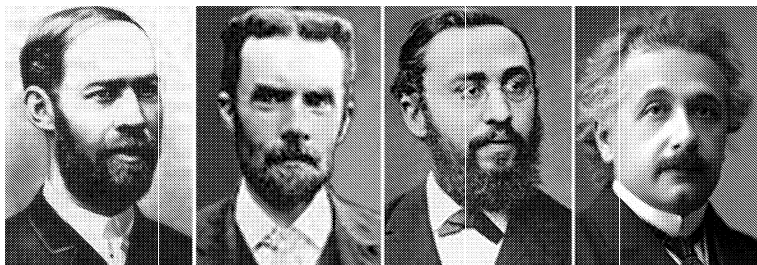
²⁾ Opět zajímavost: v tomto roce se narodil A. Einstein.

4. Postmaxwellovské období

4.1 Přínos Hertzův, Heavisideův, Lorentzův a Poyntingův

Významným Maxwellovým pokračovatelem byl německý fyzik *H. Hertz*. Tomu se v letech 1887 a 1888 především podařilo geniálně jednoduchými pokusy s jiskrovými oscilátory, jako vysílači a přijímači, generovat a přijímat elektromagnetické vlny o vlnové délce asi 4 m. Tím prokázal jejich existenci jako transversálního vlnění, které se chová stejně jako světlo, tj. odráží se, láme podle Snellova zákona a je polarizované. Rovněž obohatil Maxwellovu teorii jejím přehlednějším zápisem a pracoval také na teorii elektromagnetického záření (*Hertzovy vektory*, *Hertzův dipól*). Jeho život bohužel skončil ještě v nižším věku (37 roků) než život Maxwellův.

Méně známým, avšak významným Maxwellovým pokračovatelem je *O. Heaviside* (anglický samouk, matematik, fyzik a elektroinženýr), který se především zasloužil o přepis Maxwellových rovnic z málo srozumitelného kvaternionového tvaru do současně užívaného tvaru – pomocí vektorové analýzy, kterou (spolu)vytvořil. Tím výrazně přispěl ke srozumitelnosti a rozšíření Maxwellovy teorie. Velkým Heavisideovým přínosem je vypracování teorie elektromagnetického pole rychlých nábojů – jeho vztahy platí pro relativistické rychlosti, i když se psala teprve léta 1888, 1889. Vědecká komunita (zejména tehdejší) jej příliš neakceptovala, k čemuž přispíval Heaviside sám tím, že jeho příspěvky byly někdy málo srozumitelné a rigorózní (bez důkazů).



Obr. 5 Fyzikové 2. období elektrodynamiky: *Heinrich Rudolf Hertz* (1857–1894), *Oliver Heaviside* (1850–1925), *Hendrik Antoon Lorentz* (1853–1928) a zakladatel teorie relativity *Albert Einstein* (1879–1955)

Dalším velmi významným Maxwellovým pokračovatelem byl Holanďan *H. A. Lorentz*, který roku 1892, krátce po objevu *elektronu*, přepracoval

fenomenologickou Maxwellovu teorii na *teorii elektronovou* (mikroskopickou). Při „zápasu“ s éterovými hypotézami (viz čl. 5) to byl také on, který se dostal až před práh teorie relativity, avšak představu éteru přitom nedokázal opustit. Hlavní teoretické přínosy k Maxwellově teorii v 19. století uzavírají Angličan *J. H. Poynting*, jež rozpracoval teorii záření (*Poyntingův vektor*) a *A. M. Liénard* s *E. Wiechertem*. Liénard (1898) a Wiechert (1900) popsali elektromagnetické pole rychlých nábojů užitím retardovaných *Liénardových-Wiechertových potenciálů*; jejich přínos je známější, než přínos Heavisideův. Fyzikové 2. období rozvoje elektrodynamiky jsou na obr. 5.

4.2 Heavisideovo pole

Elektrodynamikou rychlých (v dnešní terminologii relativistických) nabitých částic se již v letech 1888 a 1889 zabýval *O. Heaviside* [4]. Za předpokladu, že Maxwellovy rovnice platí ve stejném tvaru jak v inerciální soustavě klidové, tak pohyblivé a že $c = \text{konst.}$, Heaviside odvodil elektrodynamickou sílu mezi elektrickými náboji Q (o rychlosti $\mathbf{v}$) a q (o rychlosti $\mathbf{u}$). Podle Heavisidea (ve vyjádření *Z. Horáka* – [5], [6]) platí

$$\mathbf{F} = q\Gamma \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \left[\mathbf{r}^0 + \frac{1}{c^2} \mathbf{u} \times (\mathbf{v} \times \mathbf{r}^0) \right] = q(\mathbf{E}_H + \mathbf{u} \times \mathbf{B}_H), \quad (4)$$

kde se předpokládají relace $u = \text{konst.} < c$, $v = \text{konst.} < c$. Důležitou veličinou ve vztahu (4) je

$$\Gamma = [1 - (v/c)^2] [1 - (|\mathbf{v} \times \mathbf{r}^0|/c)^2]^{-3/2}, \quad (5)$$

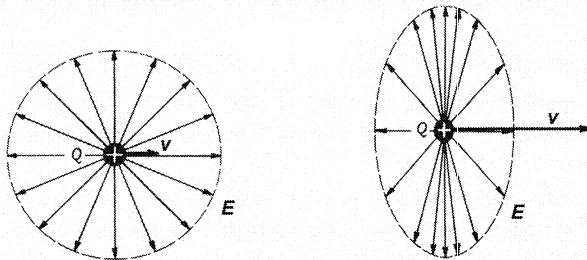
která se nazývá *Heavisideův rychlostní faktor* (má zřetelně relativistický charakter – což opět svědčí o tom, že pozdější speciální teorie relativity je konzistentní s Maxwellovou teorií elektromagnetického pole). Veličiny $\mathbf{E}_H$, $\mathbf{B}_H$ ve vztahu (4) popisují intenzitu elektrického pole a indukci magnetického pole rychlého náboje Q při jeho setrvačném pohybu v místě druhého rychlého náboje q . Toto pole se na Heavisideovu počest nazývá *Heavisideovo elektromagnetické pole* a zřejmě pro ně platí

$$\mathbf{E}_H = \Gamma \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{r}^0, \quad \mathbf{B}_H = \Gamma \mu_0 \frac{Q}{4\pi r^2} (\mathbf{v} \times \mathbf{r}^0). \quad (6)$$

Heavisideův rychlostní faktor Γ popisuje výraznou „deformaci“ pole velmi rychlých nábojů. Snadno to lze posoudit pro dva významné zvláštní případy směru mezi $\mathbf{v}$ a $\mathbf{r}$. Pro $\alpha = 0$ a $\alpha = \pi/2$ je

$$(\Gamma)_{\alpha=0} = 1 - \frac{v^2}{c^2} < 1, \quad (\Gamma)_{\alpha=\pi/2} = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2} > 1.$$

Z těchto výrazů plyne, že v porovnání se statickým polem nebo s klasickým případem malé rychlosti $\mathbf{v}$ je Heavisideovo pole ve směru pohybu náboje méně intenzivní než ve směru kolmém na rychlost $\mathbf{v}$ náboje. Vzniká tak „zploštění“ pole. V případě elektrického pole je tento jev zřejmý z obr. 6. Dokazuje se ([6], [13]), že výtok vektoru intenzity $\mathbf{E}_H$ libovolnou uzavřenou plochou, obklopující rychlý náboj, je stejný jako pro náboj v klidu. Tedy Gaussův zákon elektrostatiky (resp. druhá Maxwellova rovnice) platí i pro elektrické pole rychlého náboje. Heavisideovo pole podrobně rozpracoval Z. Horák (viz [5] a [6] – 1976, s. 576–588).



Obr. 6 Elektrické pole pomalého ($c \ll c$, $\beta \approx 0$, $\Gamma \approx 1$) a velmi rychlého kladného náboje ($v = 0,60c$, $\Gamma_{\alpha=0} = 0,64$, $\Gamma_{\alpha=\pi/2} = 1,25$)

Zajímavou otázkou bylo ověření *existence magnetického pole druhého řádu*, kterou formuloval Z. Horák. Za toto pole označil relativistický přírůstek magnetického pole rychlých nábojů k poli, které by vytvořily pomalé náboje o stejném elektrickém proudu. Nechť rychlost rychlých nábojů (např. elektronů ve vakuu) je $\mathbf{v}$ a jejich délková hustota náboje τ ; rychlost pomalých nábojů (např. elektronů ve vodiči) je $\mathbf{v}'$ a jejich délková hustota náboje je τ' . Pak stejný proud bude, když $I = \tau v = \tau' v'$ (protože $\mathbf{v}' \ll \mathbf{v}$, je $\tau' \ll \tau$). Očekávalo se, že tento relativistický jev bude s výjimkou ultrarelativistických nabitých částic velmi slabý (podobně jako např. relativistický jev kontrakce délek) a obtížně měřitelný.

Příslušný experiment provedl *B. Vybíral* (viz [16] až [18]). K experimentu byla využita vakuová aparatura pro sváření svazkem rychlých elektronů, přičemž rychlost elektronů (o proudu $I = 600 \mu\text{A} = \text{konst.}$) byla prostřednictvím změny urychlovacího napětí nastavována v intervalu $v \in (0,20; 0,41)c$. Aby bylo možné vznikající magnetické pole induktivně detekovat, byl svazek elektronů přerušován rotujícím ozubeným měděným kotoučem s frekvencí 121 Hz. Přerušované magnetické pole indukovalo v koncentricky umístěném toroidu měřicí sondy napětí, které filtrovalo synchronním detektorem a měřilo se. Elektrony se na konci sondy zabrzdily dopadem na kolektor a vracely se zpět koncentrickou trubkou, a to již jako indukční proud. Tím se dosáhlo toho, že sonda registrovala jen relativistický přírůstek Heavisideova magnetického pole (pole druhého řádu, které bylo funkcí $\beta^2 = (v/c)^2$). Tím, že elektrony byly brzděny dopadem na kolektor na konci sondy, vznikalo rovněž akcelerační magnetické pole, které je funkcí $\beta = (v/c)$. Napětí vypočtené podle teorie a napětí měřené při experimentu se lišilo v mezích měřicích chyb. Tím, že celkový proud v oblasti sondy byl nulový ($I - I = 0$), mělo být podle klasického zákona celkového proudu magnetické pole také nulové; nicméně nebylo – projevilo se jako zkoumané magnetické pole druhého řádu. Popsaný experiment *verifikoval existenci Heavisideova magnetického pole a akceleračního magnetického pole*.

Jak ukázal *Z. Horák* (viz např. [5], [6]), Heavisideovo pole a také akcelerační elektromagnetické pole splňují Maxwellovy rovnice elektromagnetického pole. Relativistická složka magnetického pole je tak součástí Maxwellových rovnic, i když je Maxwell intuitivně odvodil zobecněním jen klasických zákonů pro elektromagnetismus, formulovaných zobecněním experimentálních poznatků získaných pro indukční proudy.

Literatura

- [1] *Einstein, A.*: Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Annalen der Physik*, 17 (1905), s. 891.
- [2] *Einstein, A.*: Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? *Annalen der Physik*, 18 (1905), s. 639–641.
- [3] *Einstein, A.*: Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie. Braunschweig: Vieweg, 1921.
- [4] *Heaviside, O.*: Electrician, 23 (1888); *Phil. Mag.* 27 (1889), p.324, Electrical Papers, Vol. II.
- [5] *Horák, Z.* – *Krupka, F.*: Fyzika. Praha: SNTL/Alfa, 1966, 1976, 1981.

- [6] *Horák, Z.*: Heaviside Field. Elektrotechnický Obzor, 57 (1968). s.356–362.
- [7] *Laue, M.*: Dějiny fyziky. Praha: Orbis (MME), 1959.
- [8] *Malíšek, V.*: Co víte o dějinách fyziky. Praha: Horizont (MME) 1986.
- [9] *Maxwell, J. C.*: A Treatise on Electricity and Magnetism. Oxford: Clarendon Press, 1873.
- [10] *Mayer, D.*: Pohledy do minulosti elektrotechniky. České Budějovice: Kopp, 1999, 2004.
- [11] *Michelson, A., Morley, E.*: Americ. Journ. Sci. 34 (1887), p.333; Phil. Mag.24 (1887), p.449.
- [12] *Møller, C.*: The Theory of Relativity. Oxford: At the Clarendon Press, 1969.
- [13] *Rosser, W. G. V.*: Classical Electromagnetism via Relativity. London: Butterworths, 1968.
- [14] *Votruba, V.*: Základy speciální teorie relativity. Praha: Academia, 1969.
- [15] *Vybíral, B.*: Fyzikální pole z hlediska teorie relativity. Praha: SPN, 1976; Bratislava: 1980.
- [16] *Vybíral, B.*: Měření magnetického pole 2. řádu rychlých elektronů. Elektrotech. čas., 39 (1988), s. 266.
- [17] *Vybíral, B.*: Theoretical and Experimental Research of the Second-order Magnetic Field. Journal of Physics D: Appl. Phys. 22 (1988), pp. 1–10.
- [18] *Vybíral, B.*: Teorie relativity a gravitace. Hradec Králové: Gaudeamus, 2008.

(Pokračování)

Částicová struktura látek ab initio I^{*)}

ALEŠ LACINA

Přírodovědecká fakulta MU, Brno

Neveselá dosavadní bilance polistopadového vývoje českého školství (např. [ii–iv]), nutí k zamyšlení jak nad rozumností způsobu, tak nad kvalitou přípravy jeho „modernizace“. Řadu nanejvýš závažných změn s dalekosáhlými důsledky pro školní vzdělávání přinesla už sama politicky prosazená idea vzdělávacích programů. Ta našla svoji konkretizaci v rám-

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

cových vzdělávacích programech pro jednotlivé úrovně a typy škol, které nově upravily a kodifikovaly v podstatě všechny stránky výchovně vzdělávací činnosti. A tak rovněž *Rámcový vzdělávací program pro gymnázia* [v] zavedl jako ústřední pojem *klíčové kompetence*, pomocí nějž stanovil *cíle vzdělávání*, definoval *vzdělávací obsah*, vymezil *očekávané výstupy a učivo* a v neposlední řadě předepsal *časové dotace*. I když pomineme velmi kritizovatelný způsob, jímž to učinil [vi], nelze přehlédnout skutečnost, že tento frázovitý dokument postrádá ducha, koncepci i jasnou představu o věcném obsahu a způsobu realizace toho všeho. Tyto nejdůležitější, nejkvalifikovanější – a ovšem také nejobtížnější – aspekty celého inovačního procesu tak ponechal úřad značně nezodpovědně jiným. Tentokrát jednotlivým školám.

Natolik rozsáhlé formálně strukturální školské reformě – když už musela být (?) – měla nezbytně předcházet poctivá důkladná, věcná i didaktická, analýza konkrétního obsahu vzdělávání. Nic takového však – ani v náznaku – provedeno nebylo. Za této neutěšené situace nezbyvá zřejmě nic jiného, než aby se do dodatečné nápravy věcí pustili lidé, kteří si současný tristní stav uvědomují. – A poslední záchranou pak budou muset zřejmě být věčně podceňování a znevažování učitelé.

Tento příspěvek je prvním z trojice textů přinášejících konkrétní příklad rozboru, po němž se na předchozích řádcích volá. Zabývá se jedním z témat, která jsou ve středoškolské fyzice dlouhodobě odbývána – výkladem základních představ o stavbě látek.

Je příznačné, že většina lidí na tomto místě žádný problém nevidí. Všichni přece „vědí“, že: *látky se skládají z molekul, molekuly z atomů, atomy z těžkých jader a jejich lehkých obalů, ...* Stačí tedy tyto poznatky vštípit i žákům či studentům. Způsob, jímž se to tradičně dělá, je však alarmující: V nižších ročnících základní školy se tato *fakta* – zcela rozumně – prostě oznámí s tím, že vše bude hlouběji vysvětleno a detailně okomentováno později. Další „výuka“ tohoto tématu se však už děje metodou křížových odkazů typu: *Jak se dozvíte ve fyzice ...* (chemie), *Jak již víte z chemie ...* (fyzika), *Na střední škole se dozvíte podrobněji ...* (základní škola), *Již ze základní školy víte ...* (střední škola). Tento způsob výuky – metodou zjevených hotových pravd – nezlídka pokračuje také na školách vysokých. A tak dokonce i mnozí absolventi jejich přírodovědných a technických oborů nikdy neslyšeli otázku (natož, aby si ji sami položili) *Proč myslíte, ... ?, Odkud víte, ... ?, Z čeho plyne vaše přesvědčení, že ... : látky se skládají z molekul, molekuly z atomů, atomy z těžkých jader a jejich lehkých obalů, ... ?* Jak by asi vypadala jejich odpověď?

Úvod

Fyzika mikrosvěta je zvláštní disciplinou. Na rozdíl od ostatních fyzikálních partií, které jí ve školním učivu předcházejí a které většinou popisují svět naší každodenní zkušenosti (makrosvět), se totiž zabývá studiem chování a vlastností objektů, jež nelze vnímat lidskými smysly. Ani přímo, ani s pomocí jednoduchých přístrojů, jako je například lupa nebo optický mikroskop.

Máme-li se o čemkoli poctivě a zodpovědně vyjadřovat, musíme být schopni svá tvrzení podepřít srozumitelnými průkaznými argumenty. Při popisu a vysvětlování jevů probíhajících v makrosvětě je situace zjednodušena tím, že vyslovovaným závěrům dodává věrohodnosti i přímá smyslová zkušenost. Její absence v případě mikrosvěta naopak vede k nezbytnosti spolehnout se jen na výsledky experimentů. A teprve na základě jejich pečlivého kritického rozboru si postupně vytvářet představu o složení a vnitřním uspořádání smyslově nedostupného mikrosvěta a následně i o vlastnostech a chování mikroobjektů.

Dnes běžné vzdělávací postupy se však bohužel ubírají jinou cestou: s poněkud demagogickým odkazem na iluzorní potřebu přiblížit – i na střední škole – obsah vyučování současnému stavu vědy zpravidla rychle míjejí základy, na nichž je moderní fyzika vybudována a akcentují spíše „zajímavější“ aktuální témata. Praktickým důsledkem tohoto způsobu vzdělávání ovšem jsou jen povrchní útržkovité znalosti převážně deklarativního charakteru a – což je ještě horší – tendence studentů, nechápajících pojmy a představy, jimiž se v diskusi takových problémů operuje, uvažovat a mluvit o věcech, jejichž skutečné podstatě nerozumějí. Preference vyspělých témat k vyšší vzdělanosti automaticky nevede. A pouštět se do nich se studenty, jejichž „přesvědčení“ např. o diskrétní struktuře hmoty spočívá jen v zapamatovaných názvech „atom“, „elektron“, „jádro“, . . . , které jim byly předloženy bez jakékoli informace o empirickém materiálu a úvahách, jež k vytvoření těchto pojmů vedly, je sice snad na první pohled efektní, ale rozhodně intelektuálně nečestné, pokud svým svěřencům napřed nepomůžeme vytvořit a důkladně pochopit nezbytné základy. Je zřejmě nanejvýš žádoucí – namísto mluvení (do značné míry planého) o efektních tématech, na něž jejich fyzikální erudice, ani rozumové schopnosti zatím nestačí – nechat studenty pohlédnout na tematiku mikrosvěta prizmatem sice méně vznešených, zato však poctivě zvládnutelných problémů.

Účelem a snahou následujících stránek je demonstrovat možnost naplnění tohoto požadavku připomenutím logiky (i historie) postupu, který

přivedl k přesvědčení o existenci atomů a k základní představě o jejich struktuře. Tyto fundamentální poznatky, na nichž stojí celá moderní přírodověda, se dnes ve školní výuce prezentují velmi formálně – v podstatě informativním způsobem [1]. Přitom cesta, jíž člověk dospěl od někdejší nevědomosti k současnému *porozumění*, je zvládnutelná i na gymnaziální úrovni a má nesmírnou jak fyzikální, tak pedagogickou hodnotu.

Toto třídílné pojednání je míněno jako náčrt úvodního výkladu zmíněné problematiky provázený rozšiřujícími poznámkami fyzikálně-metodického charakteru. Ke zvýraznění jeho hlavní ideové linie byly některé komentáře, které tento fyzikální příběh prohlubují a uvádějí jej do širších souvislostí, přesunuty do poměrně rozsáhlého poznámkového aparátu. Čtenář jich však zajisté může – podle svého uvážení – na libovolném místě libovolně použít k rozšíření či jiné vlastní modifikaci základního textu.

Od prvních atomistických představ k přesvědčení o existenci vnitřní struktury atomů

Nejpřirozenějším začátkem jakékoli úvodní prezentace fyziky mikrosvěta je jistě vytvoření základní představy o jeho struktuře. Právě ona je totiž východiskem všech dalších úvah a proto musí být nejen jasně formulována, ale měla by být také pečlivě, přesvědčivě zdůvodněna. Základní otázkou a prvním krokem do mikrosvěta je tedy problém jeho struktury. Všichni jsme od útlého věku vychováváni v přesvědčení (nebo ve víře?), že

• LÁTKY SE SKLÁDAJÍ Z ATOMŮ.

Tento závěr však není nijak samozřejmý. Obvyklé konstatování, že to věděli již staří Řekové, kriticky uvažujícího člověka neuspokojí: že dělitelnost látek končí atomy, starořečtí filozofové nevěděli, nýbrž pouze předpokládali. A navíc jen někteří, zatímco jiní zastávali opačný názor. Ani případný – rovněž často užívaný – odkaz na moderní vyspělé experimentální techniky není vhodným argumentem, poněvadž už jenom vysvětlit princip činnosti těchto přístrojů, natož pak porozumět jejich údajům, je samo o sobě podstatně obtížnější než odpovědět na výchozí otázku. (Dlouhou historii vývoje představ o struktuře látek stručně popisuje článek [2].)

Pokud již na existenci atomů přistoupíme – není bez zajímavosti připomenout, že přírodověda to bez výhrad udělala teprve před sto lety [2] – máme před sebou další krok: podrobněji atomy popsat. Dnes všichni „víme“, že

• ATOMY MAJÍ VNITŘNÍ STRUKTURU.

Toto tvrzení se však diametrálně liší od názorů duchovních otců atomistické koncepce (*Leukippos*, 500–450 př. n. l.; *Démokritos* 460–370, př. n. l.), kteří atomy považovali za nejmenší – dále nedělitelné – stavební jednotky látek. Vlastnosti různých objektů našeho světa pak zdůvodňovali různým tvarem, velikostí, pohybem a spojováním vnitřně nestrukturovaných atomů. Ani zakladatel chemického atomismu *John Dalton* (1766–1844) o třiadvacet století později o případné vnitřní struktuře atomů neuvažoval, když všechny svoje úvahy založil na hypotéze, že základními stavebními jednotkami látek jsou neměnné – nezničitelné a nestvořitelné – atomy, které jsou v chemických reakcích – jako celky – spojovány a rozlučovány.

První náznak, že se uvnitř atomů něco děje a že by tedy měly být strukturovanými objekty, přineslo ztotožnění optických spekter zahřátých zředěných plynů se spektry atomovými (tedy závěr, že elektromagnetické záření emitované zahřátými zředěnými plyny má původ uvnitř atomů), k němuž došlo ve druhé polovině devatenáctého století [P1]. Skutečnost, že jednotlivý atom vysílá (i pohlcuje) světlo, totiž není myslitelná bez průvodních změn v jeho nitru.

Mezníkem v nazírání na atom se však stal až objev přirozené radioaktivity (1896; *Henri Becquerel*, 1852–1908) a zejména následné podrobné experimentální prozkoumání tohoto jevu (*Ernest Rutherford*, 1871–1937). Z pozorované postupné změny chemického složení radioaktivních vzorků totiž vyplynulo, že současně s emisí radioaktivního záření dochází k přeměně jednoho prvku v prvek druhý. Jinak řečeno, atomy určitého druhu se mění v atomy jiného druhu, což ovšem znamená, že nejsou tak stále a neměnné, jak se doposud věřilo: „*Atomy [radioaktivních prvků], z chemického hlediska nedělitelné, jsou zde dělitelné,*“ píše *Marie Curie* (1867–1934) v roce 1900 a dodává, že vysvětlení radioaktivity vymrštěváním subatomárních částic „*vážně podkopává [stávající] chemické principy*“.

Následující úvahy o atomech již spočívaly ve spekulacích o vnitřním ustrojení – tedy o stavbě – atomu. (Cesta k jednoznačným formulacím uváděným v dnešních učebnicích však byla ještě dlouhá a je v mnoha směrech poučná.) Všechny tyto představy měly – přes veškerou svoji rozdílnost – jeden společný rys. Každá z nich předpokládala, že součástí atomu jsou mikroobjekty objevené rok po objevu přirozené radioaktivity – *elektrony*.

Literatura

- [i] *Lacina, A.*: Deset kroků do mikrosvěta. Čs. čas. fyz. 57, č. 4 (2007) 243.
- [ii] *Lacina, A.*: Aktuální problémy českého fyzikálního vzdělávání. Čs. čas. fyz. 54, č. 2 (2004) 92. <http://www.physics.muni.cz/kof/clanky/aktprobl.pdf>
- [iii] *Pitřha, P.*: Velká iluze českého školství. Přednáška na Pedagogických dnech na Univerzitě Hradec Králové, duben 2008.
<http://www.stolzova.cz/stolzova/view.php?cislocianku=2008041701>
- [iv] *Lacina, A.*: TIMSS 2007 – poučení z krizového vývoje?
http://www.physics.muni.cz/kof/clanky/TIMSS_2007_poucení.pdf
- [v] Rámcový vzdělávací program pro gymnázia. Výzkumný ústav pedagogický, Praha 2007.
- [vi] *Bečvář, J.*: Naše žhavá současnost. Přednáška na konferenci „Matematika základ vzdělanosti“. (Hradec Králové, září 2007).
<http://schol-methodicus.eu/Apel-k-verejnost.htm>
- [1] *Lacina, A.*: Postrecenze učebnice „Fyzika pro gymnázia – Fyzika mikrosvěta“. Školská fyzika VI, č.3 (2000) 72. <http://www.physics.muni.cz/kof/recenze/post7.pdf>
- [2] *Lacina, A.*: Atom – od hypotézy k jistotě. Čs. čas. fyz. 48, č. 5 (1998) 282.
<http://www.physics.muni.cz/kof/clanky/atom.pdf>

Poznámky

- [P1] Emise elektromagnetického záření souborem navzájem neinteragujících částic (zředěným plynem) se realizuje navzájem nesouvisejícími procesy emise záření jednotlivými členy tohoto souboru. Záření emitované plynovým tělesem je tedy prostou sumou příspěvků od těchto elementárních zdrojů. Jsou-li jimi částice (např. atomy) téhož druhu, jsou jejich příspěvky stejné. Záření emitované atomárním plynem má tudíž stejné jak spektrální složení, tak relativní intenzity jednotlivých vlnových délek jako záření emitované jednotlivým atomem a liší se od něj jen celkovou intenzitou, která je úměrná počtu atomů v zářícím plynu. (Zcela analogické úvahy lze formulovat i pro absorpci záření.) Na spektra atomárních plynů – jak emisní, tak absorpční – se pak běžně odkazuje jako na spektra atomová. Vlastnosti těchto spekter – zejména jejich čárový charakter, ale i intenzity spektrálních čar – byly známy již hluboko v devatenáctém století.

Vzdáleně ovládané experimenty na internetu

FRANTIŠEK LÁTAL

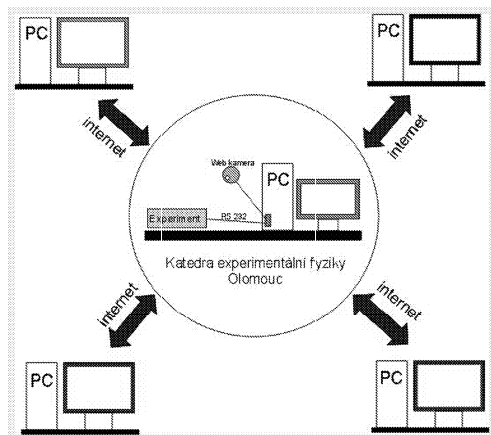
Přírodovědecká fakulta UP, Olomouc

Úvod

Experimentování je jednou z velmi důležitých součástí výuky fyziky na všech stupních vzdělávání. Z některých průzkumů, které byly v MFI dříve publikovány (např. v [1]), však vyplývá, že podíl žákovských pokusů nebo pokusů učitelů zabírá v průměru na základních a středních školách velmi malé procento vyučovací hodiny fyziky.

Cílem tohoto příspěvku je představit nikoliv nový, ale v dnešní době ne zcela využívaný druh fyzikálního experimentování, a to práci s tzv. vzdáleně ovládanými experimenty.

Mnozí učitelé využívají ve své výuce fyzikální aplety (resp. physlety), kterých lze na webových stránkách najít obrovské množství. Pomocí těchto apletů je možno namodelovat libovolný fyzikální děj, což v reálných „face to face“ školních fyzikálních laboratořích není možné nikdy dokázat.



Obr. 1

Na rozdíl od těchto virtuálních simulací, jsou vzdáleně ovládané experimenty sestaveny z reálných (skutečných) fyzikálních přístrojů, které lze prostřednictvím internetu vzdáleně ovládat z libovolného místa na světě v libovolnou denní dobu. Prostřednictvím webové kamery mají uživatelé internetu možnost on-line sledovat změny na vzdáleném experimentu, naměřená data stahovat do svých počítačů a dále s nimi dle libosti pracovat. Základní schéma vzdáleně ovládaného experimentu je zobrazeno na obr. 1.

Výhody vzdáleně ovládaných experimentů

Každý typ experimentů má své výhody, ale i nevýhody. Základní výhody tradičních školních experimentů spočívají v tom, že žáci:

- pracují v přímém kontaktu s měřicími přístroji;
- získají okamžitou zpětnou vazbu od svého vyučujícího;
- mohou týmově spolupracovat v kolektivu třídy.

Mezi hlavní výhody virtuálních aplikací patří:

- tvorba experimentů je zcela zdarma a lze namodelovat libovolný fyzikální děj;
- na internetu lze nalézt obrovské množství těchto experimentů;
- lze názorně zobrazit daný fyzikální jev.

Vzdáleně ovládané experimenty mají oproti tradičním a virtuálním experimentům tyto základní výhody:

- žáci pracují s reálnými fyzikálními pomůckami v libovolném čase z libovolného místa na světě, což umožní přístup k reálným experimentům i žákům, kteří např. ze zdravotních důvodů nemohou navštěvovat svou školu;
- nehrozí nebezpečí úrazu při práci s nebezpečnými přístroji;
- zapojení internetu do fyzikálního experimentování může zvýšit zájem mladých lidí o studium této přírodní vědy.

Vzdáleně ovládané experimenty na internetu

Na internetu se můžeme setkat s dvěma typy vzdáleně ovládaných experimentů. První druh reprezentují experimenty, k jejichž ovládní je potřeba stáhnout do počítače dodatečný program, který zprostředkuje komunikaci mezi počítačem a měřicími přístroji. Tento přístup využívá systém LabVIEW, který je vytvářen firmou National Instruments. Pro učitele nebo studenty, kteří prostřednictvím internetu experimentují jen zřídka, není

zcela ideální instalovat speciální software do svého počítače. Druhým typem jsou experimenty, které lze přes internet ovládat přímo z webového prohlížeče bez nutnosti instalování speciálních ovládacích programů. Jedinou podmínkou pro spuštění vybraného experimentu z webového prohlížeče je nainstalování zcela standardního programu JAVA.

V tomto příspěvku uvedeme několik zajímavých webových stránek, které obsahují právě tento druhý typ vzdáleně ovládaných experimentů.

1. <http://rcl.physik.uni-kl.de/>

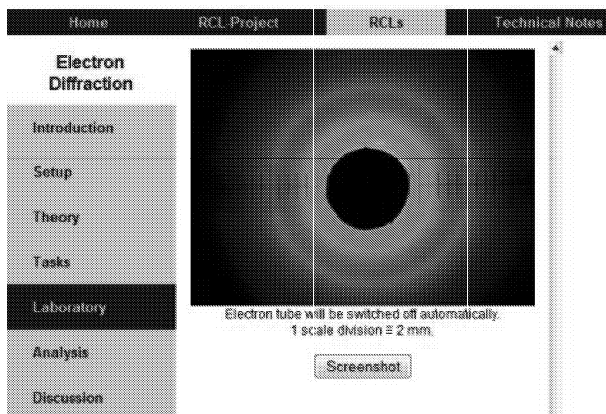
Na webové stránce [2] se nachází cca 15 funkčních vzdáleně ovládaných experimentů, které lze využít při výuce fyziky na základní nebo střední škole. Tyto webové stránky jsou v německém nebo anglickém jazyce. Pokud si např. zvolíme anglický jazyk, je třeba na titulní webové stránce kliknout na nápis „RCLs“, který otevře stránku se vzdálenými experimenty. Každý experiment obsahuje úvodní informace, teorii k experimentu, úkoly a analýzu naměřených dat. Pod nápisem „Laboratory“ se otevře okno s ovládacím prostředím vzdáleného experimentu a obraz z webové kamery, který zobrazuje aktuální dění v laboratoři. Mezi velmi zajímavé experimenty z této webové adresy patří:

- pozorování elektronové difrakce (obr. 2);
- určení rychlosti světla;
- prozkoumání fotoelektrického jevu;
- určení tíhového zrychlení z doby kyvu několika matematických kyvadel;
- studium radioaktivního záření;
- pokusy ve vzduchovém tunelu – aerodynamika.

2. <http://www.ises.info/>

Na českých webových stránkách [3] lze v současné době nalézt sedm vzdáleně ovládaných experimentů. Každý experiment obsahuje fyzikální základ, návod k experimentu a zadání úlohy. Zajímavé vzdáleně ovládané experimenty z této webové adresy např. jsou:

- ohyb elektromagnetického záření;
- přeměna solární energie;
- elektromagnetická indukce.



Obr. 2

3. <http://www.ictphysics.upol.cz/remotelab/>

Na webové stránce [4] je uživateli internetu k dispozici vzdáleně ovládaný experiment na určování voltampérových charakteristik šesti různých zdrojů světla (obr. 3). K tomuto experimentu je vytvořen návod měření a protokol, který lze použít pro laboratorní měření na střední škole.



Obr. 3

4. Další webové stránky se vzdálenými experimenty

Mezi další vzdáleně ovládané experimenty je vhodné zařadit českou stránku <http://ises.tym.cz/> [5], která obsahuje např. vzdálené měření na fotovoltaickém panelu, nebo záznamy měření z meteorologické stanice. Záznamy z meteorologických stanic nabízejí např. také webové stránky ZŠ v Šumperku [6] a stránky České zemědělské univerzity v Praze [7].

Závěr

Vzdáleně ovládané experimenty nabízejí zajímavou a moderní formu experimentování na základních a středních školách a mají potenciál zvýšit zájem studentů o studium fyziky. Tento druh experimentování nemůže nahradit reálné pokusy ve vyučovacích hodinách, ale poskytuje novou alternativu ve výuce fyziky a ostatních přírodních vědách. Doufáme, že vám tento článek ozřejmí základní charakteristiky vzdáleně ovládaných experimentů a webové adresy poskytnou zajímavý námět do výuky fyziky.

Tento příspěvek vznikl za podpory projektu „Moderní prostředky ICT v přírodovědných a ekonomických oborech a jejich prezentaci,“ reg. č. CZ.1.07/2.2.00/07.0062. Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.

L i t e r a t u r a

- [1] *Svoboda, E. – Höfer, G.*: Postoje učitelů základních a středních škol k výuce fyziky. MFI, r. 19 (2009/2010), č. 2, str. 84–97 & č. 3, str. 157–162.
- [2] <<http://rcl.physik.uni-kl.de/>>
- [3] <<http://www.ises.info/>>
- [4] <<http://www.ictphysics.upol.cz/remotelab/>>
- [5] <<http://ises.tym.cz/>>
- [6] <<http://hluchak.cz/?q=teplomer/>>
- [7] <<http://meteostanice.agrobiologie.cz/>>