

SYMPATICKÉ UČEBNICE FYZIKY

ALEŠ TROJÁNEK

I. Úvod

V příspěvku jsou stručně uvedeny autorovy názory na učebnice fyziky, které vycházejí z více jak dvacetiletých zkušeností s výukou fyziky na gymnáziu. Budeme tedy mít na mysli především učebnice fyziky pro gymnázia (či středoškolské učebnice), i když mnohá tvrzení mají obecnější platnost a týkají se fyzikálních učebnic obecně.

Význam dobrých učebnic pro výchovně vzdělávací proces je zřejmý. Podívejme se v této souvislosti např. na názor obecného pedagoga prof. Kopeckého [K]:

„Sledujeme-li vývoj snah o nápravu školství, v nichž významné místo představuje J. A. Komenský, nemůžeme nevidět, že východiskem školských „labyrintů“ byl vždy nějaký opěrný bod. Tím opěrným bodem byla téměř vždy učebnice. Klasickým dokladem je Komenského Brána jazyků ...

Učebnice jistě není pro zkvalitnění školního vzdělávání všelékem, ale mezi opory školního vzdělávání určitě patří. Zmínili jsme se o třech faktorech školního vzdělání, o učiteli, učivu a žáku. V učebnici jsou všechny tyto faktory pohromadě. Učebnice je totiž syntézou věcných (obsahových), psychologických a metodických složek vzdělání, což z učebnice vytváří pevný, spolehlivý bod, účinnou oporu školního vzdělání. Představuje syntézu vyučování vedeného učitelem a žákovy aktivity.“

J. Kopecký

II. Protichůdné (rozporuplné) požadavky na sympatické učebnice fyziky

I když se dá těžko říci, jaké učebnice jsou např. pro gymnaziální žáky nejlepší, pokusím se formulovat (velmi stručně a určitě ne jed-

noznačně) požadavky na učebnice, po kterých by žáci snad rádi sáhli a které by fyzikové (a učitelé fyziky) také rádi uvítali. Učebnice by měly být:

1. stručné, ale ne příliš zjednodušené či zavádějící a neměly by chybět „základní“ poznatky
2. jasné a fyzikálně (pokud možno) přesné, ale ne příliš složité a obtížné
3. přístupné (s množstvím pěkných úloh a příkladů) a čtivé, ale ne podbíživé
4. zajímavé a aktuální, ale ne za každou cenu
5. atraktivní a graficky pěkně provedené, ale ne příliš drahé

Nyní se pokusím o stručný komentář k jednotlivým bodům. Některá obecná tvrzení budou ilustrována na konkrétních fyzikálních ukázkách a příkladech.

1. Stručnost

Je zřejmé, že splnění jen tohoto prvního bodu je velmi těžkým úkolem, na jehož řešení existuje řada odlišných názorů. Ve fyzice, ale i v ostatních předmětech, musí vyučující i autoři učebnic stále řešit problém narůstajícího množství nových poznatků. Připomeňme jen nové poznatky moderní fyziky a jejich aplikací. Řešením této situace je a) vykládat jen fyzikální princip bez technických podrobností a b) „něco“ z tradičních témat vyřadit či výrazně zjednodušit.¹

Např. v učivu elektromagnetizmu na gymnáziu považuji za vhodné provést alespoň následující úpravy: Kirchhoffovy zákony vyložit formou příkladů a příliš se jim nevěnovat, v tématu elektrický proud v plynech a ve vakuu vyložit základní mechanismus dějů a vynechat popis rozboru dějů ve výbojových trubicích (katodové světlo, anodový

¹Předpokládám, že i v době zavádění poměrně liberálního Rámcového vzdělávacího programu (RVP) pro gymnázia [Vu] se na většině gymnázií dostane všem žákům "slušného" fyzikálního vzdělání s příslušnou hodinovou dotací. Názor, že všeobecně vzdělávací škola, jakou gymnázium je a snad i bude, by měla všem žákům, tedy i budoucím politikům, umělcům, novinářům apod. poskytnout dobré přírodovědné vzdělání a přehled, by chtělo podrobněji rozvést. Zaměření tohoto článku je však trochu jiné.

sloupec, . . .), vyložit jen fyzikální princip diody a tranzistoru bez elektrotechnických podrobností, podstatně zredukovat kapitolu o elektromagnetickém kmitání a vlnění.

2. Jasnost a přesnost

Jasnost a fyzikální korektnost jsou obecně nutné podmínky, aby učební text mohl být kvalitní a sympatický. Konkrétní míra naplňování těchto podmínek však bude u různých autorů jistě odlišná.

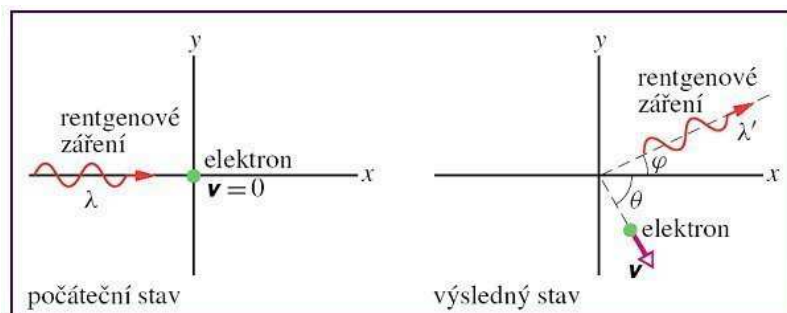
Např. v mechanice považují za nezbytné precizně vyložit pojmy jako rychlost, zrychlení, síla, Newtonovy zákony, práce, kinetická energie, konzervativní silové pole, potenciální energie soustavy a její různé druhy, vztahy mezi prací daných sil a změnou příslušné energie apod. Viz např. [ŠT, Š].

Uvedme dále příklad běžně používaného výkladu z úvodních kurzů fyziky mikrosvěta, který v sobě skrývá jistou nejasnost:

Příklad: Comptonův jev se uvádí jako přesvědčivý důkaz Einsteinovy hypotézy o existenci fotonů. Jedná se o rozptyl rentgenového záření o dané vlnové délce λ na elektronech v uhlíkovém terčíku. V rozptýleném záření našel Compton záření nejen s původní vlnovou délkou λ , ale i s vlnovou délkou $\lambda' > \lambda$. Při vysvětlení tohoto jevu je třeba popisovat interakci rentgenového záření s elektrony jako interakci jednotlivých fotonů s jednotlivými elektrony materiálu. (V některých učebnicích se správně vysvětluje, že energie fotonu rentgenového záření je velká ve srovnání s vazební energií elektronu v atomu uhlíku, takže srážku můžeme popsat jako srážku fotonu s volným elektronem.) Pomocí fotonové hypotézy a užitím zákona zachování energie lze kvalitativně vysvětlit změnu vlnové délky rentgenového záření.

Otázka (položil mi ji kolega R. Smutný): Jak je možné, že po srážce s elektronem ztratí foton jen část své energie, když přece dochází při interakci světla a látky jen k přenosu energie po částech – kvantech? (Rozptýlený foton má menší energii než dopadající foton.) Nevede rozbor Comptonova jevu ke zmatku v hlavě hloubavého žáka i učitele?

Stručná odpověď: Při interakci fotonu s elektronem dojde k pohlcení dopadajícího fotonu a potom k vyzáření jiného, s menší energií. To je naznačené následujícím obrázkem z [HRW] tím, že jsou zobrazeny odděleně počáteční a konečný stav.



Obr. 1: Comptonův jev

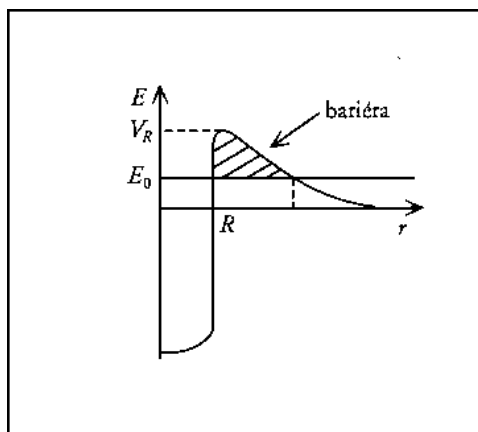
3. Přístupnost, názornost

Učebnice fyziky by se měla lišit od odborného článku (mimo jiné) stylem výkladu. Vždyť je možno (po vzoru autorů jako Feynman, ale i Pišút [PGČ, PZ] apod.) psát trochu „familiárním stylem“ a užívat obraty jako „uvažujme“, „zkusme si představit“ apod. Velký význam mají různá přirovnání a vhodné analogie.

Uveďme alespoň 2 příklady analogií.

První se týká výkladu tunelového jevu a vychází z postupů v populárních knížkách [P,Gr], kde se vysvětluje tunelový jev pomocí relací neurčitosti mezi energií a časem užitím jisté analogie. Na uvedeném příkladu je možno zároveň ilustrovat obtížnost popularizace fyzikálních témat. K níže uvedenému postupu mají totiž někteří kolegové výhrady, neboť zvolená analogie, jako každá analogie, „kulhá“. Naopak z citátu J. Polkinghorna z [P] je zřejmé, že se uvedeným postupům nebrání.

Příklad: (vysvětlení tunelového jevu): Jak je možné, že např. částice α může vyletět z jádra, i když nemá dostatek energie pro překonání potenciálové bariéry?



Obr. 2: Tunelový jev (α - rozpad)

„Populární“ vysvětlení tunelového jevu je možno podat pomocí Heisenbergových relací neurčitosti mezi energií a časem: $\Delta E \Delta t \geq h/2\pi$. (Tento vztah interpretujeme jako něco, co platí při předávání energie.) Představme si, že jednou dostaneme zprávu, že na druhém konci světa zemřel náš vzdálený příbuzný a odkázal nám fantastické dědictví. Jestliže je chceme získat, musíme je osobně převzít. Jediná potíž je v tom, že nemáme peníze na zakoupení letenky. Nikdo v okolí není schopen či ochoten nám půjčit, i když slíbíme, že mu vše štědrě vynahradíme. Až jeden starý přítel nám poradí, že letecká společnost, u které pracuje, má takový bankovní systém, který umožňuje zaplatit letenku do 24 hodin po příletu, aniž kdo zjistí, že letenka nebyla zaplacená už před odletem. Díky tomu se nám podaří získat dědictví. Podobně α částice si může „vypůjčit“ energii a dostat se přes překážku, je-li schopna ji vrátit za dobu určenou relacemi neurčitosti.

„Pokud jste osobností s určitými intelektuálními nároky, asi vás výklad v předchozím odstavci, který byl zhruba na úrovni dětské obrázkové knížky, příliš nepřesvědčil. Rozhodně souhlasím a také bych neměl

přílišnou důvěru k takovému vysvětlení tunelového efektu, kdybych nevěděl, že přesný výpočet založený na Schrödingerově rovnici dává úplně stejný výsledek. Není však dobré s odmítáním podobných polo-intuitivních argumentů příliš spěchat. Díky nim jsme schopni získat do určité míry názornou představu o předmětu našeho zkoumání, což je vždycky užitečné. Práce teoretického fyzika obvykle sestává ze dvou kroků. Nejprve se snaží získat nějakou základní představu, co se děje a jak věci probíhají. Teprve potom může být úspěšný při druhém kroku, tj. převedení svého pohledu do formálního kvantitativního jazyka rovnic a výpočtů. Při druhém kroku má příležitost předvést své technické dovednosti, při prvním musí uplatnit představivost a fyzikální cit. I když výpočty jsou často složité a náročné – někdy do té míry, že nejsme schopni provést je jinak než v hrubém přiblížení – je to právě první, tvořivá část, která je tím obtížnějším z obou kroků. Jakékoli pitoreskní úvahy, které podporují intuitivní chápání problémů, je třeba všemožně rozvíjet.“

J. Polkinghorne

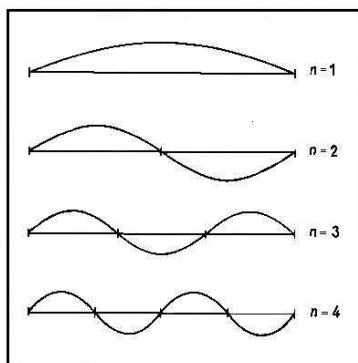
Poznámky:

1. Pomocí tunelového jevu (založeném na řešení Schrödingerovy rovnici) vyložil v roce 1928 G. Gamow α rozpad jader. G. Gamow je jedním z prvních autorů populárně vědeckých knížek [GS].²
2. Připomeňme velký význam tunelového jevu v různých zařízeních, jako např. u rastrovacího tunelového mikroskopu (STM).

Druhý příklad se týká v mnoha učebnicích používané a také hojně diskutované analogie: **kvantové stavy elektronů v atomu \sim stojaté elektronové vlny**.

Příklad – elektron vázaný na úsečku. Uvažujme pohyb elektronu, který je omezen jen na úsečku délky L . O stavu elektronu nebudeme uvažovat jako o pohybující se částici, ale jako o jistém vlnovém ději. Kvantovým stavům elektronu na úsečce délky L přiřadíme „stojaté elektronové vlny“. Pro názornost vyjdeme ze stojatých vln na struně se stejnou délkou L . (Kmity struny lze pěkně demonstrovat.)

²Podrobněji o G. Gamowovi např. v [Ga].



Obr. 3: Stojaté vlny na struně délky L

Podle obr. 3 platí:

$$L = n \frac{\lambda_n}{2},$$

kde číslo n je přiřazeno jednotlivým stacionárním stavům elektronu – jednotlivým stojatým vlnám. Nazývá se kvantové číslo.

Pro kinetickou energii volného elektronu platí:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{p^2}{2m}.$$

Z de Broglieova vztahu $p = \frac{h}{\lambda}$ a po dosazení do předchozího vztahu a úpravách dostaneme:

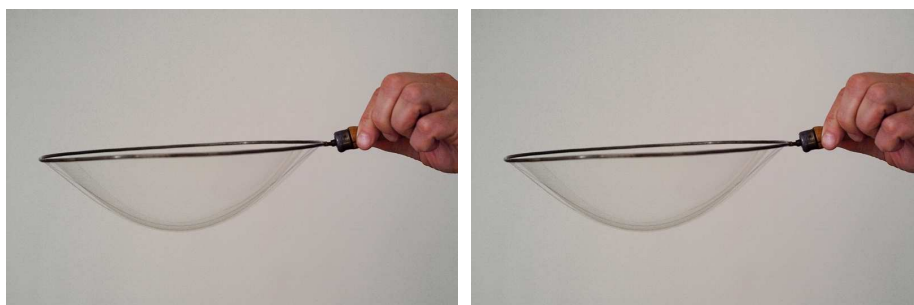
$$E_n = \frac{h^2}{8mL^2}n^2, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

Výše uvedený vztah (1) udává energie jednotlivých kvantových stavů elektronu vázaného na úsečku délky L .

Fyzikálně pedagogické poznámky:

1. Standardní řešení problému „částice vázané na úsečku“ pomocí bezčasové Schrödingerovy rovnice vede k přesně stejnému vztahu (1) pro kvantové hladiny energie.

2. Největší námitka proti uvedenému postupu je tato: O jedné vlnové délce přiřazené elektronu můžeme mluvit jen v případě, že je volný. Elektronu vázanému na úsečku je přiřazen vlnový balík, a nejde tedy uvažovat o jedné vlnové délce a použít jednoduchý de Broglieův vztah. Podrobněji např. v [L].
3. K uvedenému příkladu pohybu elektronu v jednom rozměru určité délky je možno přirovnat situaci v dlouhých organických molekulách, např. v butadiénu $CH_2 = CH - CH = CH_2$, kde některé elektrony se mohou v podstatě pohybovat volně podél molekuly.
4. Jednotlivý elektron lze uvěznit v podobné pasti [HRW, s. 1057].
5. Velký význam mají uměle vytvořené elektronové jámy (elektronové pasti) konečné hloubky (nanokrystaly, kvantové tečky, kvantové hradby).



a.

b.



c.

Obr. 4: Fotografie kmitajících mydlinových blán na drátěném rámu
a) horní půlvlna, b) dolní půlvlna, c) celá vlna

6. Výše uvedený postup na „odvození“ energie vázaného elektronu na úsečku lze rozšířit na dvojrozměrnou kvantovou hradbu (viz obr. 4)³ a pak na pravoúhlou krabici. Od umělých „atomů“ lze přejít k reálným, např. k nejjednoduššímu atomu – vodíku. Atom vodíku je podobnou elektronovou pastí – jádro váže svůj elektron na určitou oblast přitažlivou Coulombovou silou, a tedy jeho energie bude také **kvantována**.

Uvedme dále alespoň jedno pěkné přirovnání z učebnice [HRW]. (Vydání této knihy v českém jazyce považuji za výrazný počín, který může změnit celkový postoj fyzikálně pedagogického společenství k fyzikálnímu vzdělávání na různých typech a stupních škol. V článku se na tuto publikaci budeme vícekrát odvolávat.)

Přirovnání: Driftová rychlost elektronů je nepatrná ve srovnání s rychlostí chaotického pohybu: Názorný příklad dává roj rychlých komárů, zvolna unášených vánkem.

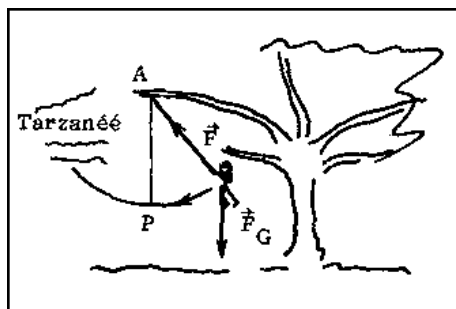
K názornosti a přístupnosti výkladu výrazně přispívají vhodně formulované a zařazované příklady a úlohy. Před uvedením alespoň tří ukázek úloh je zařazena teze prof. Šantavého z [ŠT]:

„Řešení vhodně formulovaných příkladů a úloh považujeme za součást poznávacího procesu, nikoli jen za procvičování a upevňování poznatků, s nimiž se čtenář seznámil ve výkladové části textu. V mnoha případech si totiž teprve při užití teoretických poznatků při vyšetřování konkrétních situací a dějů a při řešení konkrétních problémů uvědomujeme jejich vlastní fyzikální význam a osvojujeme si je neformálně.“

I. Šantavý

Úloha 1 [Š, str.105]: Na obr. 5 je nakreslen Tarzan (hmotnost $m = 90$ kg) spěchající za hlasem tak, že se zhoupl na liáně délky $l = 12$ m. Pro nejnižší bod P , kde měl rychlost o velikosti $v = 8$ m.s⁻¹, určete: 1. zrychlení Tarzana, 2. součet sil, které na něj působily, 3. sílu, kterou na něj působila liána.

³Jedná se o stojaté vlnění mydlinových blán na drátěném rámu. Autorem fotografií je J. Michlíček (2004).



Obr. 5: Tarzan na liáně

Úloha 2 [ŠT, str. 170]: Malá nabitá kulička je zavěšena v laboratoři na vlákně v homogenním elektrickém poli o intenzitě E , která má vodorovný směr a velikost $E = 1,9 \cdot 10^5 \text{ V.m}^{-1}$. Kulička je v klidu v rovnovážné poloze, v níž je vlákno vychýleno o úhel $\alpha = 20^\circ$ od svislého směru. Hmotnost kuličky je $m = 4,1 \cdot 10^{-5} \text{ kg}$, hmotnost vlákna je zanedbatelná. Sestrojte náčrtek a řešte úkoly: 1. Vyjmenujte všechny síly, které působí na kuličku, a určete jejich výslednici. 2. Určete směr a velikost všech sil, které působí na kuličku. 3. Určete elektrický náboj kuličky. 4. Určete směr a velikost zrychlení a , se kterým by se kulička pohybovala, kdyby se vlákno přetrhlo. 5. Je náboj kuličky kladný, nebo záporný?

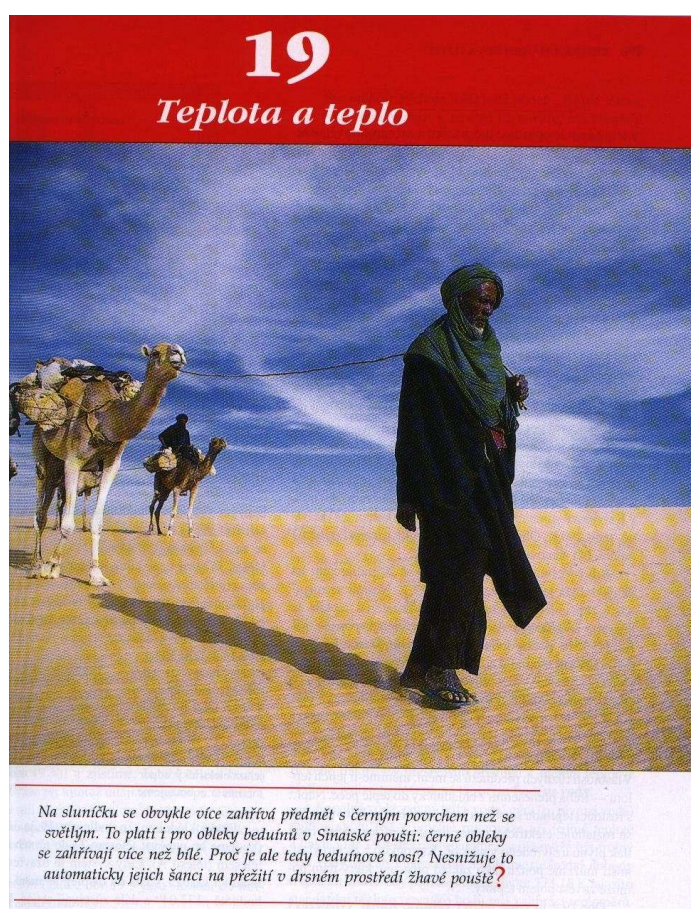
Úloha 3 [HRW, str. 712]: Housenka dlouhá 4,0 cm se plazí ve směru pohybu elektronů po neizolovaném měděném drátu o průměru 5,2 mm, kterým prochází proud 12 A. (a) Jaké je napětí mezi konci housenky? (b) Má její ocas vyšší, nebo nižší potenciál než její hlava? (c) Jak dlouho by housence trvalo, než by se odplazila o 1,0 cm, kdyby rychlost jejího plazení byla stejná jako driftová rychlost elektronů v drátu?

Poznámky k úlohám 1-3:

Úlohy 1, 3 jsou zajímavé svou formulací a ze zkušenosti vím, že zaujmou žáky mnohem více než podobné stroze formulované úlohy. V úlohách 1, 2 jsou jednotlivé otázky a úkoly zařazeny tak, že přímo navádějí na správný postup řešení.

4., 5 Zajímavost a aktuálnost, atraktivnost a pěkná grafická úprava

Jako příklad zajímavého a aktuálního zpracování je možno uvést učebnici [HRW]. Jsou v ní pěkné a motivující obrázky na začátku jednotlivých kapitol (viz obr. 6), ale také velké množství aktuální problematiky, která je stručně a názorně objasňována. Je potěšitelné, že české vydání má stejnou grafickou úroveň jako původní verze [H'R'W']. O úspěchu této doslova populární učebnice svědčí to, že na podzim roku 2003 byl vydán dotisk.



Obr. 6: „Motivační stránka“ z [HRW]

V poslední době se u nás objevuje poměrně velké množství populárně vědeckých publikací, hlavně přeložených z anglického jazyka⁴. V nich je možno nalézt mnoho zajímavých témat, informací, ale i neotřelých a zajímavých postupů výkladu apod. Jde zejména o tematiku astrofyziky, kosmologie, ale i fyziky mikrosvěta. Uveďme alespoň některá hesla z oblasti kvantové fyziky: dokonalejší verze základních experimentů kvantové fyziky (dvojštěrbinové experimenty a jejich jednofotonové verze, experimenty s opožděnou volbou), interpretace kvantové teorie (Schrödingerova kočka, . . .), EPR paradox, Bellovy nerovnosti, nelokalita kvantové mechaniky, kvantová teleportace, kvantová kryptografie, kvantové počítače atd.

Inspirující obsahově, ale také kvalitou provedení a úpravou jsou mnohé učební texty a jiné pomocné materiály na domovských stránkách pracovníků jednotlivých fyzikálních pracovišť u nás i ve světě. Z velkého množství zajímavých stránek věnovaných fyzice je možno zmínit např. [Co, H, Hy].

III. Shrnutí

Na závěr se pokusím formulovat návrhy, jejichž realizace by přispěla ke zkvalitnění učebnicové fyzikální literatury a tím ke zlepšení výuky fyziky:

- Při výuce fyziky i při psaní učebních textů se inspirovat populárně vědeckou literaturou, zejména učebnicí [HRW])
- Přeložit (pro srovnání) pěkný středoškolský zahraniční kurz fyziky

Literatura

- [K] Kopecký J.: *J. A. Komenský a naše školské reformy. Pocta Komenskému*. Odborná skupina Pedagogická fyzika FVS JČSMF, Brno 1991. Redakce M. Černožský, str.58.
- [Vu] <http://www.vuppraha.cz>

⁴V kapitole Doporučená literatura tohoto sborníku je uvedeno 92 titulů.

- [ŠT] Šantavý I., Trojánek A.: *Fyzika. Příprava k přijímacím zkouškám na vysoké školy*. Prometheus, Praha 2000.
- [Š] Šantavý I.: *Mechanika*. SPN, Praha 1993.
- [PGČ] Pišút J., Gomolčák L., Černý V.: *Úvod do kvantové mechaniky*. 2. vydanie. Alfa, Bratislava 1983.
Viz též: <http://www.ddp.fmph.uniba.sk/pisut/>
- [PZ] Pišút J., Zajac R.: *O atómech a kvantování*. 2. doplnené vydanie. Alfa, Bratislava 1988.
Viz též: <http://fyzikus.fmph.uniba.sk/Fyzikus/>
- [HRW] Halliday D., Resnick J., Walker J.: *Fyzika*. VUT v Brně, nakladatelství VUTIUM a nakladatelství Prometheus, Brno 2001. Dotisk 2003.
- [H'R'W'] Halliday D., Resnick J., Walker J.: *Fundamentals of physics. Fifth edition*. John Wiley & Sons. Inc. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 1997.
- [P] Polkinghorne J.: *Kvantový svět*. Aurora, Praha 2000.
- [Gr] Greene B.: *Elegantní vesmír. (Superstruny, skryté rozměry a hledání finální teorie.)* Mladá fronta, edice Kolumbus, Praha 2001.
- [G] Gamow G.: *Moje světočára. Neformální autobiografie*. Mladá fronta, edice Kolumbus, Praha 2000.
- [GS] Gamow G., Stannard R.: *Pan Tompkins stále v říši divů*. Aurora, Praha 2001.
- [L] Lacina A.: *Poznámka k analogii „stacionární kvantový stav - stojatá vlna na struně.“* PMFA, XXVIII, 1983, s. 342.
- [Co] <http://www.colorado.edu/physics/2000>
- [H] <http://www-hep2.fzu.cz/adventure/>
- [Hy] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hph.html>