

Podivnosti v gymnaziální fyzice¹

Aleš Trojáněk

Gymnázium Velké Meziříčí, Sokolovská 27, 594 01 Velké Meziříčí

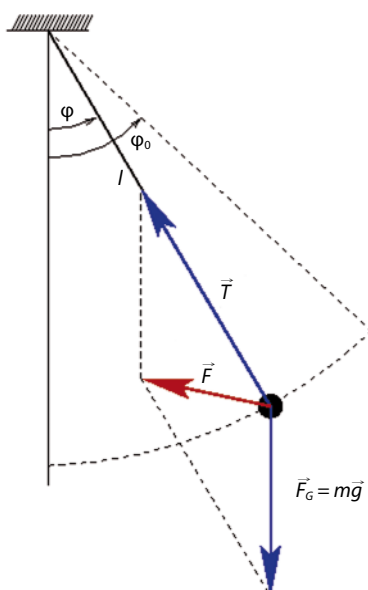
Co rozumíme pod pojmem „podivnosti v gymnaziální fyzice“?

Pod pojmem podivnosti v gymnaziální fyzice můžeme rozumět různé věci: velkou dotaci předmětu fyzika a přehnané nároky na žáky, nebo naopak velmi malý počet hodin fyziky v učebním plánu, nekvalifikovanou výuku apod. Když však pojem z nadpisu upřesníme na podivnosti kvantové fyziky na gymnáziu, bude již čtenářům jasné, a co se jedná. Jde o pokusné zařazení několika témat podivných zákonitostí kvantové fyziky do gymnaziální výuky.

Je vhodné se v gymnaziální výuce věnovat podivným věcem?

Je všeobecně známo, že žáci často nezvládají s porozuměním základní úlohy klasické mechaniky, že stále opakují při řešení úloh stejné chyby, že některé učebnice (a učitelé) jim v tom nepomáhají atd. V příspěvku [1] je např. uvedena úloha, ve které se má v případě matematického kyvadla určit v obecné poloze výslednice sil působících na kuličku. Nejčastější (nesprávnou) odpovědí je, že výslednice sil je k trajektorii tečná. Na obr. 1 je správně zakreslena výslednice všech sil působících na kuličku v obecné poloze. Míří na tu stranu, na

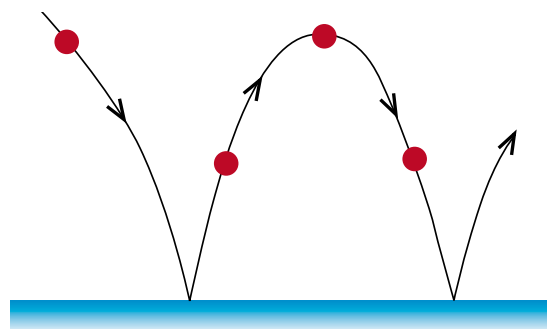
¹ Článek je součástí projektu *Podpora technických a přírodovědných oborů* (reg. číslo: CZ.1.07/4.2.00/06.0005), který je spolufinancován ESF a státním rozpočtem ČR.



Obr. 1 Matematické kyvadlo [1]

kteou je trajektorie zakřivená. (Má nenulovou tečnou i normálovou složku.)

Uveďme ještě jednu úlohu, u které je správné řešení spíše výjimkou: V homogenním tíhovém poli Země hodíme na stůl míč, a ten se pohybuje potom podle obr. 2. Zanedbejte odpor vzduchu a v bodech A, B, C, D určete a zakreslete všechny síly, které na něj působí.



Obr. 2 Pohyb míče v homogenním tíhovém poli

Podobných příkladů, nejen z mechaniky, bychom mohli uvést řadu. Není proto nadbytečné či přímo škodlivé v situaci, kdy si většina žáků neosvojí základní fyzikální vědomosti a postupy z klasické fyziky, snažit se do výuky zavádět nová témata z kvantové fyziky, která svou povahou jsou těžko „uchopitelná“? Nemá pravdu A. B. Arons v [2], když se obává, aby studenti „nebyli vychováni k planému mluvení o věcech, jejichž podstatě nerozumějí“?

Je samozřejmé, že ve výuce fyziky se budeme snažit věnovat pozornost správnému výkladu základních problémů a úloh klasických středoškolských partií fyziky. Přesto jsem přesvědčen, že nové poznatky kvantové fyziky je vhodné, potřebné a užitečné do výuky na gymnáziu zařazovat. V dalším textu budou uvedeny důvody pro takový názor a bude naznačen i možný postup.

a) Vývoj fyzikálního poznání nám předkládá nové pohledy na problematiku kvantové teorie a objevují se její neobvyklé aplikace. O tomto pokroku si můžeme přecíst nejen v odborných článcích, ale společně se žáky i v mnoha populárně vědeckých knížkách, jejichž autory jsou většinou erudovaní odborníci. Je potěšitelné, že mnoho titulů vychází u nás v překladech.² V nich je možno nalézt mnoho zajímavých témat, informací, ale i neotřelých a zajímavých po-

² V kapitole *Doporučená literatura* sborníku [3] je uvedeno 166 titulů, které populárním způsobem pojednávají o matematické a fyzikální problematice.

stupů výkladu apod. Uvedme alespoň některá hesla z oblasti kvantové fyziky: dokonalejší verze základních experimentů kvantové fyziky (dvojitřbinové experimenty a jejich jednofotonové verze, experimenty se zpožděnou volbou), interpretace kvantové teorie (Schrödingerova kočka, ...), EPR paradox, Bellovy nerovnosti, nelokalita kvantové mechaniky, kvantová teleportace, kvantová kryptografie, kvantové počítače atd. Jako inspirující publikace mohou uvést alespoň tyto: [4–19]. Dalším zdrojem informací a poučení je řada kvalitně zpracovaných internetových stránek, viz např. [20–23].

- b) Mnoho výsledků kvantové fyziky se uplatňuje ve světě kolem nás. Je např. velmi vhodné na gymnáziu podat jednoduchou informaci o tunelovém rastrovacím mikroskopu, o nanotechnologiích či o mnoha důmyslných, k lidskému zdraví šetrných a převratných diagnostických i léčebných přístrojích současné medicíny.
- c) Zařazení aktuálních prvků kvantové fyziky může zvýšit zájem žáků o předmět a pomoci při rozhodování o budoucím studiu. Mohou prožívat radost z poznávání doslova mystických záležitostí, např. filosofičtěji zaměřené žáky jistě zaujmou zmínky o koncepčních otázkách kvantové fyziky (nelokalita, ...).
- d) Pro podporu výše uvedených tvrzení uvedu tři citáty: „Klasická školská fyzika se zabývá podivnými nezajímavými laboratorními předměty. To vyústuje v odcizení. Do přírodovědného vzdělávání je možno vrátit život zavedením kvantové mechaniky.“

V. F. Weisskopf v roce 1975 [24]

... zamyslenie sa nad otázkami výuky kvantovej fyziky je to najlepšie, čo môžeme pri jej päťdesiatych narodeninách urobiť.

Ján Pišút v roce 1975 [25]

„Kvantová teorie je nepochybně jedním z velkých úspěchů kultury dvacátého století. Je příliš významná na to, aby zůstala pouze hájemstvím a potěšením profesionálních fyziků. Proto jsem se pokusil napsat o ní způsobem, který by byl přístupný a srozumitelný pro kohokoli s přiměřenou dávkou inteligence a trpělivosti, kdo je připraven nelítovat námahy a pustit se do toho.“

John Polkinghorne v knize *Kvantový svět* [4]

Elementy fyziky mikrosvěta na gymnáziu

Minimální požadavky na obsah a rozsah fyziky mikrosvěta na gymnáziu jsou dány obecným dokumentem RVP [26]:

Mikrosvět – Očekávané výstupy

Žák

- využívá poznatky o kvantování energie záření a mikročástic k řešení fyzikálních problémů
- posoudí jadernou přeměnu z hlediska vstupních a výstupních částic a energetické bilance
- využívá zákon radioaktivní přeměny k předvídání chování radioaktivních látek
- navrhne možné způsoby ochrany člověka před nebezpečnými druhy záření

Učivo

- kvanta a vlny – foton a jeho energie; korpuskulárně vlnová povaha záření a mikročástic
- atomy – kvantování energie elektronů v atomu; spontánní a stimulovaná emise, laser; jaderná energie; syntéza a štěpení jader atomů; řetězová reakce, jaderný reaktor

Z Rámcového vzdělávacího programu (RVP) vycházejí jednotlivé školy při tvorbě svého Školního vzdělávacího programu (ŠVP). Nebudu zde vést úvahy o rozsahu fyziky v ŠVP. Domnívám se však, že výše uvedené minimální požadavky by měly být rozšířeny, byť za cenu redukce klasických témat. Stručný obsah *Fyziky mikrosvěta* na gymnáziu by mohl být dán takto:

Kvantová fyzika

1. Fotoelektrický jev
2. Rentgenové záření
3. O povaze světla
4. Vlnové vlastnosti částic (dvojitřbinový experiment a jeho rozbor, princip superpozice)
5. Heisenbergův princip neurčitosti
6. Podivný svět kvantové fyziky³ (dvojitřbinové experimenty se zpožděnou volbou, kvantová guma, entaglované stavy, kvantová teleportace, kvantová kryptografie, kvantové počítání, tunelový jev, ...)

Atomová fyzika

7. Hodnoty některých fyzikálních veličin v mikrosvětě
8. Spektra prvků a kvantování energie atomů
9. Elektron v pasti, atom vodíku
10. Atomy s více elektrony, Pauliho princip, spin, periodická soustava prvků

Jaderná fyzika

11. Základní pojmy
12. Vazební energie jádra, hmotnostní úbytek
13. Slučování a štěpení jader
14. Radioaktivita, časový průběh radioaktivní přeměny
15. Experimentální metody jaderné a částicové fyziky, využití radionuklidů
16. O elementárních částicích a fundamentálních silách (orientačně) (PET, CERN, ...)

Při výkladu jednotlivých kapitol je třeba věnovat pozornost i aplikacím: laser, nukleární magentická rezonance – NMR, řádkovací sondová mikroskopie – SPM, manipulace s atomy, nanotechnologie, ...

Výše uvedený přehled témat se může jevit jako příliš maximalistický. Je možné z něho samozřejmě ubírat podle hodinové dotace, podle úrovně třídy, zájmu učitele apod. Navíc je možné věnovat se těmto partiím např. ve volitelném fyzikálním semináři nebo se pokusit zavést volitelný předmět *Základy přírodních věd (s podtitulem „od jádra atomu po buňku“)* a uvedená témata chápat jako úvodní, fyzikální část. Kurz *Fyziky mikrosvěta* by měl obsahovat i několik jednoduchých experimentálních úloh. Při nedostatečném vybavení je výhodné využít pomoci fyzikálních pracovišť vysokých škol.⁴

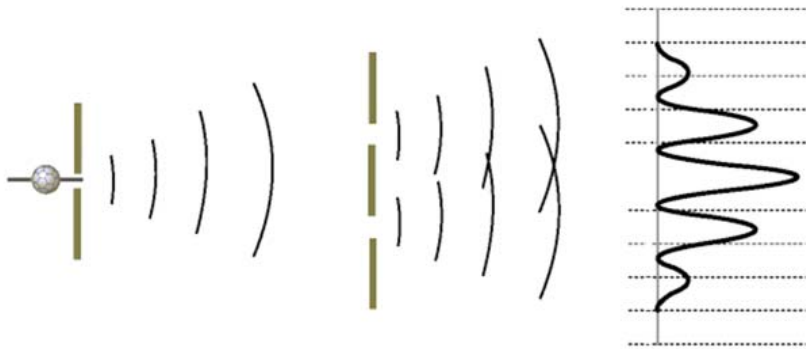
Poznámky ke kapitole 6. Podivný svět kvantové fyziky

Celou kapitolu je třeba chápat jako pokus o zařazení tematiky do gymnaziální výuky, který nebyl zatím v praxi ověřen. Jedná se o motivaci, inspiraci a osvětlení žáků, rozhodně by daný obsah neměl být např. předmětem zkoušení.

³ O zařazení a významu 6. kapitoly bude pojednáno v odstavci 4 tohoto článku.

⁴ Příkladem zajímavé nabídky na provedení vybraných experimentálních úloh je Středoškolské fyzikální exploratorium Ústavu technické fyziky Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně (<http://physics.fme.vutbr.cz/ufi.php?Action=0&Id=1553>).

» Kvantová fyzika je příliš významná na to, aby zůstala pouze hájemstvím a potěšením profesionálních fyziků. «



Obr. 3 Dvojštěrbinový experiment s fullerenem

Pro náznak populárního výkladu alespoň některých „podivností“ je podle mého názoru třeba nejdříve stručně vyložit:

- dvojštěrbinový experiment;
- princip superpozice;
- Heisenbergův princip neurčitosti.

Dvojštěrbinový experiment je základem pro elementární výklad fyziky mikrosvěta⁵ a jeho pěkné elementární vyložení je již v mnoha publikacích standardem. Již samotné chování částic při průchodu dvojštěrbinou, správná interpretace výsledků apod. představují základní překvapení či podivnost. Zvlášť je třeba rozebrat např. interferenci jediného fotonu, experiment se zpožděnou volbou či sdělit, že se již podařilo prokázat vlnové vlastnosti „velkých molekul“, např. fullerenu.

Z tohoto pokusu můžeme také vyjít při náznaku vyložení **principu superpozice**: Difrakční obrazec, typický pro vlnový proces, dostaneme i v případě, že zařízením (dvojštěrbinou) prochází vždy jen jeden elektron. Kdybychom se snažili zjistit, kterou štěrbinou elektron prošel, difrakční obrazec by zmizel. Postupnými úvahami (vyločením všech jiných možností) dojdeme k závěru, že elektron prošel oběma štěrbinami najednou. **Pohybový stav elektronu je složením stavů „průchod horní štěrbinou“ a „průchod dolní štěrbinou“.**

Heisenbergův princip neurčitosti je možno zavést pomocí Heisenbergova myšlenkového experimentu s mikroskopem. Vztah (1) pro neurčitost určení složky x polohy a téže složky hybnosti je však třeba patřičně objasnit a interpretovat.

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar/2 \quad (1)$$

V relacích neurčitosti vystupuje Planckova konstanta \hbar jako jistý „převodník do mikrosvěta“ a relaci neurčitosti je možno využít pro přiblížení se světu atomů. Jsou i užitečným nástrojem pro odhady fyzikálních veličin. Je nutné zdůraznit, že relace neurčitosti určují meze použitelnosti pojmů z makrosvěta v mikrosvětě a že to není tak, že např. elektron má současně přesnou polohu i hybnost, jen my to nedovedeme přesně určit. Neurčitost je prostě dána strukturou kvantové mechaniky. Pro potřeby zjednodušeného výkladu např. tunelového jevu a „propletenosti fyzikálního světa“ je třeba se zmínit o tom, že relace neurčitosti platí i pro energii a čas a pro složky spinu částice.

5 Vzorem pro výklad dvojštěrbinového experimentu bývá právem považován Feynmanův postup v [27]. Také jeho charakteristika uvedeného pokusu je výstižná: „Budeme zkoumat jev, který nelze vysvětlit žádným klasickým způsobem a který tvoří samou podstatu kvantové mechaniky. Obsahuje vlastně celou a jedinou záhadu. Tuto záhadu nemůžeme vysvětlit. Můžeme si jen říct, jak to funguje, a tím si ozřejmíme základní zvláštnosti kvantové mechaniky.“

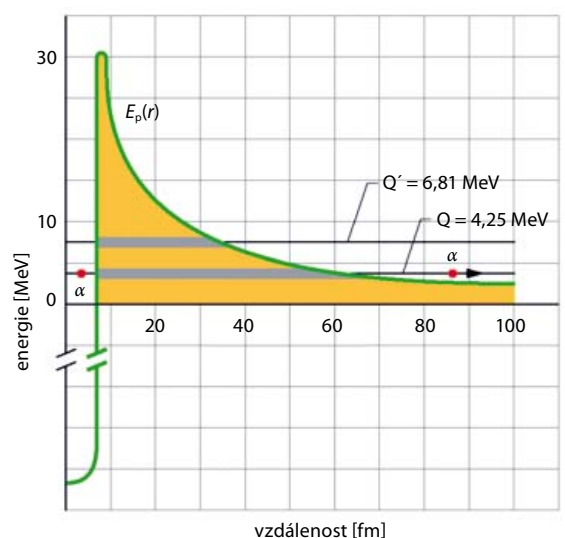
Uvedme dva příklady podivností. V tom prvním používáme částečné postupy z [4] a [9], v druhém případě byla inspiračním zdrojem publikace [5].

Příklad 1 (vysvětlení tunelového jevu):

Jak je možné, že např. částice α může vyletět z jádra, i když nemá dostatek energie pro překonání potenciálové bariéry?

„Populární“ vysvětlení tunelového jevu je možno podat pomocí Heisenbergových relací neurčitosti mezi energií a časem: $\Delta E \Delta t \geq \hbar/2\pi$. (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. (Právě pomocí tunelového jevu skutečně vyložil v roce 1928 G. Gamov α -rozpad jader.⁶)

6 Snaha autora článku o takovéto postupy je posilována např. názorem J. Polkinghorna z [5]: „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.“

Obr. 4 Tunelový jev (α -rozpad) [28]

Příklad 2:

Pokusíme se zde poukázat na jistou „provázanost“ fyzikálního světa. Popíšeme ve velmi zjednodušené podobě tzv. **EPR paradox**, kterým chtěli v roce 1935 jeho autoři A. Einstein a jeho spolupracovníci Boris Podolsky a Nathan Rosen ukázat, že kvantové zákony, pokud by platily, by měly podivné důsledky pro chování dvou separovaných částic. Výklad povedeme podle názornější varianty, kterou později navrhl David Bohm.

Předpokládejme, že připravíme dvě částice v tzv. singletovém stavu s opačnými spiny \vec{s}_1 a \vec{s}_2 ($\vec{s}_1 = -\vec{s}_2$), a ty se pak dostanou daleko od sebe. Změříme-li složku x vektoru \vec{s}_1 a dostaneme výsledek $\vec{s}_{1,x}$, pak složka x vektoru \vec{s}_2 musí být $-\vec{s}_{1,x}$. Podobně by to dopadlo, kdybychom měřili ostatní složky. Heisenbergovy relace neurčitosti nedovolují měřit současně obě spinové složky podél x a y . Einstein a jeho kolegové argumentovali, že prostorová oddělenost částic má za následek nezávislost fyzikálních dějů s nimi probíhajících. Za tohoto předpokladu, když pomocí měření spinu částice 1 ve směru x nebo y získáme zároveň znalost odpovídající složky spinu částice 2, musí mít tato částice spinové složky ve skutečnosti již předem určené, a to bez ohledu na to, zda se měření opravdu uskuteční, nebo ne. To však relace neurčitosti nedovolují. Podle Einsteina to vede k závěru, že kvantová mechanika je neúplná. Převládající interpretace však tvrdí, že žádný ze spinových vektorů (ani \vec{s}_1 ani \vec{s}_2) není až do okamžiku měření přesně určený. Až proces měření na částici 1 způsobí, že složka x částice 2 nabude hodnoty opačné. Měření na částici 1 vyvolá okamžitou změnu stavu částice 2, změnu, která závisí na tom, jaký byl výsledek měření na částici 1. Tedy mezi částicemi 1 a 2 existuje jakési spojení na dálku. Právě toto působení na dálku považoval Einstein za něco strašidelného a nepřijatelného.

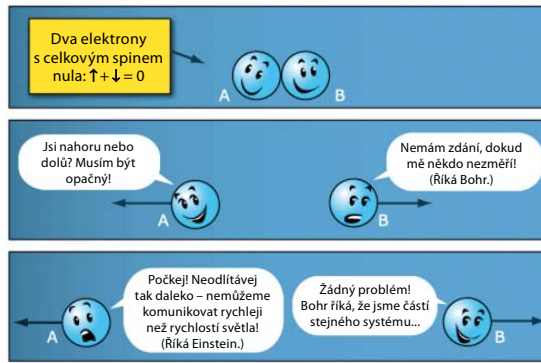
O řadu let později John Bell navrhl postup, který by umožňoval pomocí experimentů rozhodnout, zda vlastnosti částice 1 závisí jen na dějích lokalizovaných v místě 1 a vlastnosti částice 2 jen na dějích lokalizovaných v místě 2. Velmi sofistikované experimenty byly skutečně v 80. letech 20. století provedeny a potvrdily platnost kvantové teorie. Bylo dokázáno, že kvantové objekty, které byly někdy v minulosti spolu spojeny, zůstávají vzájemně propletené, i když jsou od sebe velmi vzdálené.

Závěr a blahopřání

Vhodný výklad témat kvantové fyziky (s řadou aplikací a zajímavostí) na střední škole budou podávat hlavně ti absolventi studia učitelství fyziky, kteří byli na univerzitě vzdělávání osobnostmi aktivně pracujícími v moderní fyzice, které mají nadhled a schopnost přiblížit obtížnou, ale zajímavou problematiku studentům. Mezi takové vzácné osobnosti patří **prof. RNDr. Ján Pišút, DrSc.**, z FMFI UK v Bratislavě, kterému je k jeho významnému životnímu výročí článek věnován s přáním, abychom si mohli ještě dlouho užívat jeho vědecké erudice, opravdového zájmu o výuku (zejména kvantové) fyziky a velmi přátelského vztahu ke kolegům a žákům.

Poděkování:

Děkuji prof. RNDr. Petru Dubovi, CSc., z Ústavu technické fyziky FSI VUT v Brně za podnětné připomínky k článku.



Obr. 5 Ilustrace EPR paradoxu [23]

Literatura

- [1] J. Musilová, L. Czudková: „Nástrahy newtonovské mechaniky“, Čs. čas. fyz. **58**, 103 (2008).
- [2] A. B. Arons: „Cesta k přírodovědné gramotnosti I, II“, Čs. čas. fyz. **35**, 58 a 151 (1985).
- [3] A. Trojánek, J. Novotný (editoři): *Matematika, fyzika a školství. Sborník z XIII. semináře o filosofických otázkách matematiky a fyziky*. Velké Meziříčí, 2006. Komise pro vzdělávání učitelů matematiky a fyziky JČMF v Nakladatelství Masarykovy univerzity, Velké Meziříčí 2008.
- [4] J. Polkinghorne: *Kvantový svět*. Aurora, Praha 2000.
- [5] J. Polkinghorne J.: *Kvantová teorie. Průvodce pro každého*. Dokořán, Praha 2007.
- [6] R. Gilmore: *Alenka v říši kvant. Alegorie kvantové fyziky*. Paseka, edice Fénix, Praha a Litomyšl 2007.
- [7] G. Gamov, R. Stannard: *Pan Tompkins stále v říši divů*. Aurora, Praha 2001.
- [8] T. Hey, P. Walter: *Nový kvantový vesmír*. Argo, Dokořán, edice Zip, Praha 2005.
- [9] B. Greene: *Elegantní vesmír. (Superstruny, skryté rozměry a hledání finální teorie.)* Mladá fronta, edice Kolumbus, Praha 2001.
- [10] B. Greene: *Struktura vesmíru. Prostor, čas a povaha reality*. Paseka, Praha 2006.
- [11] R. Penrose (A. Shimony, N. Cartwrightová, S. Hawking, sestavil M. Longair): *Makrosvět, mikrosvět a lidská mysl*. Mladá fronta, edice Kolumbus, Praha 1999.
- [12] J. Gribbin: *Pátrání po Schrödingerově kočce. Kvantová fyzika a skutečnost*. Columbus, Praha 1998.
- [13] J. Gribbin: *Schrödingerova koťata. Pátrání po skutečnosti*. Columbus, Praha 2001.
- [14] R. P. Feynman: *Neobyčejná teorie světla a látky*. Aurora, Praha 2001.
- [15] M. Veltman: *Fakta a záhady ve fyzice elementárních částic*. Academia, Praha 2007.
- [16] F. Close: *Částicová fyzika. Průvodce pro každého*. Dokořán, Praha 2008.
- [17] J. P. McEvoy, O. Zarate: *Introducing Quantum Theory*. Icon Books Ltd., UK, Totem Books, USA, 2004.
- [18] J. Pišút, R. Zajac: *O atómech a kvantování*. Alfa, Bratislava 1983, 1988.
- [19] P. Kulhánek a kol.: *Astronomie a fyzika na přelomu tisíciletí*. Dialog, Litvínov 2004.
- [20] <http://www.colorado.edu/physics/2000/>
- [21] <http://www-hep2.fzu.cz/adventure/>
- [22] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hph.html>
- [23] http://nobelprize.org/educational_games/physics/quantised_world/index.html
- [24] G. Marx: „Přírodovědné vzdělávání v Maďarsku“, *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie* **24**, 339 (1980); **25**, 44, 95 a 156 (1980).
- [25] J. Pišút: „Kvantová fyzika po pětadesátých letech“, *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie* **20**, 190 (1975).
- [26] Kolektiv: *Rámcový vzdělávací program pro gymnázia*. VÚP, Praha 2007. Dokument dostupný na www.rvp.cz.
- [27] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands M.: *Feynmanovy přednášky z fyziky*, díl 1 (2000), díl 2 (2001), díl 3 (2002), Fragment, Havlíčkův Brod.
- [28] D. Halliday, J. Resnick, J. Walker: *Fyzika. (Vysokoškolská učebnice obecné fyziky.)* VUT v Brně – nakladatelství VUTIUM a Prometheus, Brno 2001.

» **Vhodný výklad témat kvantové fyziky na střední škole budou podávat hlavně ti absolventi studia učitelství fyziky, kteří byli na univerzitě vzdělávání osobnostmi aktivně pracujícími v moderní fyzice, které mají nadhled a schopnost přiblížit obtížnou, ale zajímavou problematiku studentům.** <<