

Posudek práce

předložené na Matematicko-fyzikální fakultě
Univerzity Karlovy

posudek vedoucího posudek oponenta
 bakalářské práce diplomové práce

Autorka: Bc. Jana Legerská
Název práce: Atom vodíku na vysokoškolské a středoškolské úrovni
Studijní program a obor: Fyzika (N1701), Učitelství fyziky - Učitelství matematiky
Rok odevzdání: 2022

Jméno a tituly oponenta: doc. RNDr. Leoš Dvořák, CSc.
Pracoviště: KDF MFF UK
Kontaktní e-mail: leos.dvorak@mff.cuni.cz

Odborná úroveň práce:

vynikající velmi dobrá průměrná podprůměrná nevyhovující

Věcné chyby:

téměř žádné vzhledem k rozsahu přiměřený počet méně podstatné četné závažné

Výsledky:

originální původní i převzaté netriviální kompilace citované z literatury opsané

Rozsah práce:

veliký standardní dostatečný nedostatečný

Grafická, jazyková a formální úroveň:

vynikající velmi dobrá průměrná podprůměrná nevyhovující

Tiskové chyby:

téměř žádné vzhledem k rozsahu a tématu přiměřený počet četné

Celková úroveň práce:

vynikající velmi dobrá průměrná podprůměrná nevyhovující

Slovní vyjádření, komentáře a připomínky oponenta:

Diplomová práce Bc. Jany Legerské má rozsah 110 stran: 76 stran vlastního textu práce plus 34 stran příloh. Skládá se ze čtyř kapitol (a stručného Úvodu a Závěru a Seznamu literatury čítajícího 25 položek) doplněných čtyřmi přílohami.

První relativně krátká kapitola (7 stran plus jeden odstavec) se věnuje rešerši. Stručně shrnuje a komentuje, jak je problematika atomu vodíku zpracována v sedmi VŠ učebnicích (dvou českých, jedné slovenské a čtyřech zahraničních), třech SŠ učebnicích (včetně učebnice Hallidaye a Resnicka, kterou lze považovat za přechod mezi SŠ a VŠ učebnicí) a v deseti článcích v mezinárodních časopisech, které se věnují problematice výuky atomu vodíku převážně na SŠ úrovni.

Jádrum práce jsou kapitoly 2 a 3. Druhá kapitola v rozsahu 34 stran je návrhem VŠ studijního textu o atomu vodíku – fakticky samostatné kapitoly do skript o kvantové fyzice pro budoucí učitele fyziky vznikajících na KDF MFF, v práci citované jako [1]. Třetí kapitola v rozsahu 26 stran pak popisuje seminář pro SŠ studenty seznamující je s danou problematikou. Je podrobným návodem pro učitele, jak vést navržený seminář; doplněna je o stručný popis pilotáže semináře, kterou provedla autorka na třech školách, a informaci o zpětné vazbě od studentů a expertním posouzení dvěma učiteli. K této kapitole se vážou dodatky A a B obsahující podrobný a zkrácený pracovní list k semináři; v dodatku C je pak dotazník použitý pro získání zpětné vazby od SŠ studentů.

Čtvrtá kapitola pak krátce (2 stránky) komentuje pět úloh vytvořených autorkou do elektronické Sbírkky řešených úloh, samotné úlohy včetně nápověd a řešení jsou pak v dodatku D (16 stran). Tři z úloh jsou zároveň součástí VŠ studijního textu v kapitole 2.

Práce má velmi dobrou grafickou úroveň, dobře se čte a navržený VŠ text o atomu vodíku bude nepochybně užitečnou kapitolou ve skriptech pro budoucí učitele fyziky (případně další zájemce). Cenné je, že obsahuje podrobnější odvození, výpočty a komentáře, než je tomu obvyklé ve vysokoškolských učebnicích (např. na s. 20-21 i jinde), a snaží se studenty aktivně vést k pochopení problematiky. Podobně užitečný může být navržený seminář pro SŠ studenty, ocenit je třeba jak podrobný pracovní list, tak text pro středoškolské učitele. Reálně ovšem bude možno přínos daného semináře zhodnotit, až jej povedou i jiní učitelé, než samotná autorka; rozhodně si však návrh semináře a materiály k tomu zpracované zaslouží šířit a propagovat mezi učiteli.

Zásady pro vypracování stanovené v zadání diplomové práce lze proto považovat za splněné, možná s drobnou výjimkou bodu, který se týká získání zpětné vazby na navržený VŠ text od cílové skupiny studentů a případných následných úprav textu; alespoň v diplomové práci toto není popsáno. Celkově lze práci jednoznačně hodnotit jako přínosnou a užitečnou; její výsledky rozhodně nebudou jen „založeny někde v archivu“, ale nepochybně budou dobře sloužit generacím jak budoucích učitelů, tak středoškolských studentů se zájmem o fyziku.

K práci lze samozřejmě vyslovit i některé připomínky ev. možné náměty na drobné úpravy vypracovaných studijních textů.

Pokud se překlepů týče, lze je vystihnout standardní formulací, že jsou nečetné a neruší. A většinu si čtenář opraví, např. označení dvou různých článků symbolem [19] na s. 8, „stacioární“ na 22₁₀, chybějící 1 v čitateli ve zlomku v poslední rovnici na s. 24, chybějící symbol ξ v derivaci v prvním vztahu na s. 30, zápis \cos^θ místo $\cos^2\theta$ ve vyjádření $Y_{3\pm 1}(\theta)$ na s. 32, „závis“ v poznámce 13 na s. 39, $p(r)$ místo $\varrho_{\text{rad}}(r)$ na s. 62, nemluvě o chybějící mezeře v „obrázky“ na 64₉. Přesto by bylo vhodné tyto tiskové chyby ve studijních textech opravit a texty ještě důkladně prohlédnout, zda neobsahují chyby další.

K tiskovým chybám mohou patřit některé chyby ve vzorcích, které mohou být rovněž přepsáním, ale mohly by čtenáře znejistit. Na s. 16 má být $\Delta M_p/M_p = \dots = 1/2$, nikoli $\Delta M_p/m_e = 1/2$. Na s. 26-27

má být v argumentu L_{nl} místo $2r/(na)$ výraz $2Zr/(na)$, podobně v exponenciální funkci, celkem jsou zde tyto výrazy sedmkrát. (Případně by bylo třeba uvést komentář, že vztahy platí jen pro samotný vodík, ne pro vodíku podobné atomy.) Na s. 30 má být ve vztahu pro P_{31} v závorce $(5\cos^2\theta-1)$, nikoli $(5\cos^2\theta-3\sin\theta)$. Na s.35 jsou ve výrazu pro $L^1_2(\xi)$ špatně znaménka, má být $3\xi^2-18\xi+18$ (jako ukáže třeba mathworld.wolfram.com, když uvážíme, že ten užívá ještě multiplikační faktor $1/!$).

Nikoli přímo tiskovou chybou, ale volbou fontu může dojít ke zmatení čtenáře v úloze Stupeň degenerace energetických hladin atomu vodíku v příloze D. Ve vzorcích na zvláštních řádcích tam kvantová čísla l a m nejsou vysázena kurzívou, takže číslo l vysazené jako l se snadno plete s číslicí 1, takže čtenář může vztah číst např. $|m|\leq 1$ a divit se, proč m nemůže být větší než jedna.

Na s. 36 zřejmě nejsou ve výrazech pro R_{nl} správné multiplikační faktory – neodpovídají vztahům uvedeným ve Skálově učebnici citované v práci jako [3] a po dosazení do (2.74) nedá integrál z $\varrho_{\text{rad}}(r)$ od 0 do nekonečna hodnotu 1 (jak si lze ověřit např. pro R_{10}).

Ještě dvě drobnosti k formalitám: V jinak velmi pěkně zpracovaném seznamu literatury je škoda, že učební texty [1] a [5] jsou označeny jen jako Rukopis a není uvedeno, zda a kde jsou dostupné na webu; přitom na některá místa v [1] se navržený učební text (kapitola 2 práce) odvolává a existující kapitoly jsou k dispozici na webových stránkách katedry. Poslední formalitou je skutečnost, že kapitola, která v daném učebním textu bude mít patrně číslo 5 má v diplomové práci číslo 2 a tímto číslem jsou číslovány i rovnice. Přitom se ale text na některých místech odvolává na části kapitoly 2 ve skriptech a vztahy z této kapitoly, což celkově může působit trochu matoucím dojmem. V práci sice autorka píše, že kapitola 2 bude kapitolou ve skriptech, upozornění na případné nejasnosti v odvolávkách však mohlo být výraznější.

Připomínky faktičtějšího rázu a upozornění, kde by navržený studijní text mohl být upraven:

K návaznosti na Teoretickou mechaniku: Na s. 11 pozn.1 působí dojmem, jako by se v teoretické mechanice řešil jen pohyb v poli gravitační síly; v příslušné přednášce se však řeší i problém s elektrostatickou interakcí (při odvozování Rurherfordova rozptylu). Navíc se na s. 11-13 odvozuje přechod od problému dvou těles k pohybu hmotného středu a hmotného bodu s redukovanou hmotností v poli centrální síly jako něco nového; přitom jde o problém, který se řeší již v úvodní přednášce z Mechaniky a poté znovu v přednášce z Teoretické mechaniky, byť jen v kontextu lagrangeovského formalismu, nikoli u Hamiltonových rovnic. Přesto myslím, že by autorkou navržený text mohl tyto věci spíše připomenout a ne prezentovat jako něco dosud neznámého.

Na s.13 text konstatuje, že operátor hamiltoniánu (2.13) získáme pomocí *principu korespondence*. Ovšem jako „princip korespondence“ se v řadě zdrojů (třeba ve zmíněné Skálově učebnici nebo na Wikipedii) chápe jako tvrzení, že výsledky kvantové mechaniky přecházejí ve výsledky klasické mechaniky v limitě $\hbar \rightarrow 0$ nebo velkých kvantových čísel; v souvislosti s tím se uvádí Ehrenfestův teorém. Čili nejde přímo o způsob, jak z klasického hamiltoniánu dostat operátor. Pod principem korespondence zjevně někteří autoři chápou tvrzení týkající se přechodu od klasických veličin k operátorům, najde se to např. v Matthewsových Základech kvantové mechaniky, ale použití tohoto termínu zřejmě není jednotné. Navíc ve skriptech [1], jejichž vytvořená kapitola bude součástí, není v kapitolách 1 až 3 pojem „princip korespondence“ vůbec použit. Bylo by proto vhodné přechod od (2.12) k (2.13) zdůvodnit jinak, a pokud možno podrobněji.

Podrobněji komentovat přechod od klasických výrazů k operátoru hamiltoniánu by bylo vhodné i proto, že \vec{R} a \vec{r} jsou fakticky zobecněnými souřadnicemi, nikoli kartézskými souřadnicemi původních bodů. A studenti nemusí být přesvědčeni, že budovat operátory ze zobecněných souřadnic a zobecněných hybností „funguje“ stejně jednoduše, jako v případě kartézských souřadnic a hybností – a ono to opravdu obecně není triviální, viz např. článek Quantum operators

in generalized coordinates, Am.J.Phys 49 (8), 754-756 a zdroje, které cituje. V případě lineárních transformací (2.5) a (2.6) to funguje, ale opravdu by bylo vhodné alespoň v poznámce toto nějak okomentovat. („Poctivě“ je přechod od operátoru hamiltoniánu v souřadnicích a hybnostech jednotlivých bodů proveden např. ve zmíněné Matthewsově knize; možná by na ni nebo na podobný zdroj šlo odkázat.)

Formulační drobnost na s.20₄: Bylo by vhodné lépe formulovat, proč můžeme zaměnit pořadí parciálních derivací; „díky spojitosti funkcí“ (pod čímž si čtenář představí funkce, na které operátor působí) to není. Podobně by bylo vhodné lépe zdůvodnit na s. 23¹¹, proč můžeme zaměnit pořadí derivací (nezávislost proměnných r, θ, ϕ k tomu nestačí).

Na s. 24 pod rovnicí (2.44) se tvrzení „protože i řešení této rovnice musí mít uvedený tvar“ jeví nepřiliš jasně a bylo by možná dobré ho přeformulovat. Osobně za poněkud zvláštní považuji i formulaci „členy konstantní vůči derivacím“ (na uvedené stránce i dále) – proč nemluvit prostě o tom, že členy nezávislejší na některých proměnných? Také by myslím bylo vhodné na s.25 v pozn.8

i dále místo $\left(\frac{d}{d\xi}\right)^l$ psát $\frac{d^l}{d\xi^l}$, přece jen jde o standardnější matematický zápis. Podobně na s. 26 v

(2.57) a dále by pro přehlednost bylo vhodnější psát závorku: $\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} RY\right)$. Na téže straně pod

(2.59) by úpravu uvozenou vyjádřením „Vydělením rovnice $Y \dots$ “ bylo vhodné zdůvodnit poněkud korektněji (pozorný čtenář může namítnout, že v některých bodech je $Y = 0$).

V posledním odstavci na s. 28 se píše „Energie vázaných stavů ... je záporná... Jde o vazebnou energii ..., kterou je nutno dodat pro vytržení elektronu z atomu.“ Vazebná energie je ovšem samozřejmě $|E|$, text proto bude vhodné přeformulovat. Stejná chyba je v řešení první úlohy v příloze D na s. označené 4/4 v druhém odstavci. V úloze o pozitroniu v odpovědi b) má být energie $-6,8$ eV (chybí znaménko mínus).

Na 42_{16} se o rozdílu energie základního stavu a excitovaných stavů píše, že se „pohybuje v desítkách eV“. Zřejmě má být „v jednotkách eV“, o desítky by šlo až u vodíku podobných atomů.

Další připomínky se už někdy týkají spíše některých „jemností“ výkladu a interpretace.

Například na s. 42 při výkladu spin-orbitální interakce se zmínka o možném výkladu z pohledu jádra jeví dost nejasná: Student si může představit, že elektron vytváří proudovou smyčku; ta jistě vytváří magnetické pole – ale při přibližování k dané smyčce magnetická indukce diverguje a navíc má různé směry. Při výkladu z pohledu elektronu zase jednak hloubavější student může váhat, zda to neznamena představit si, že elektron je lokalizován a má přesnou rychlost, jednak se zamýšlet, zda lze běžnou představu o poli generovaném proudovou smyčkou uplatnit v neinerciální soustavě (že jsou Maxwellovy rovnice invariantní vůči Lorentzově transformaci, nezaručuje jejich invarianci vůči transformaci do zrychleného systému). Vhodnější by patrně bylo nastínit úvahu, která je na příslušné stránce anglické Wikipedie: transformovat elektrické pole jádra do inerciálního systému, v němž je elektron právě v klidu; transformace dá nenulovou hodnotu magnetické indukce. Obecně by myslím bylo vhodné u spin-orbitální interakce poctivě přiznat, že jde o relativistický efekt. Navíc, vzhledem k tomu, že se zde uvažuje spin-orbitální efekt, by na 43₃ místo „čistě elektrostatická“ bylo lepší napsat „čistě elektromagnetická“.

Na 80₁₄₋₁₁ se v pracovním listu pro studenty píše „Atom vodíku má sféricky symetrické elektrostatické pole, hustota pravděpodobnosti má díky tomu válcovou symetrii.“ To nedává smysl a rozhodně nemůže v textu zůstat! O válcové symetrii řešení při sférické symetrii pole se mluví i v textu pro učitele v posledním odstavci na s. 58, zde již s vysvětlením v poznámce 11, že jde o důsledek toho, že vlnové funkce jsou i vlastními funkcemi \hat{L}^2 a \hat{L}_z . (O tom, že „rozložení hustoty pravděpodobnosti tak bude vždy rotačně symetrické kolem osy z“ se mluví i na 29_{6.5}.)

Jsem ale přesvědčen, že tuto problematiku by bylo třeba vysvětlit mnohem důkladněji. Nedovedu si totiž představit, jak by učitel na základě uvedeného textu dokázal reagovat na možný dotaz studenta, kolem které osy v prostoru jsou řešení resp. hustota pravděpodobnosti válcově symetrické – protože osu z můžeme díky izotropii prostoru volit v libovolném směru. Student může argumentovat, že tedy řešení musí být válcově symetrické kolem libovolné osy, čili že by proto mělo být sféricky symetrické (což řešení uváděná v práci a v pracovním listu zjevně nejsou). Myslím, že na podobné potenciální dotazy a námítky studentů by studijní text měl učitele připravit – ve stávající verzi tomu tak podle mého názoru není.

Na s. 36₁₀ se píše „*bodová hustota pravděpodobnosti* ... je pravděpodobnost, že elektron nalezneme v nějakém konkrétním místě o souřadnicích (r, θ, ϕ) “. To by chtělo zpřesnit a formulovat podrobněji – pravděpodobnost nalezení elektronu na přesně daném místě je samozřejmě rovna nule. Formulace uvedená v práci je tedy pro čtenáře zavádějící. Podobně je tomu pro radiální hustotu pravděpodobnosti (na témže místě o dva řádky dále) a pro obě hustoty pravděpodobnosti také v druhém odstavce na s. 61. O „pravděpodobnosti, že elektron nalezneme na povrchu sféry“ (tedy opět zjevně na konkrétním r , tj. v objemu, který je jasně roven nule) se mluví i na s. 62 – sice se pak uvažuje vrstva tloušťky Δr , ale na 62₁₁ se opět říká, že „elektron nalezneme ve vzdálenosti r od jádra“ místo aby se mluvilo o vzdálenosti v intervalu $(r, r+\Delta r)$. Všechna tato vyjádření by bylo vhodné upravit.

Na 61₁₁ se uvádí, že „bodovou hustotu pravděpodobnosti bychom získali jako pravděpodobnost nalezení elektronu v určité malé oblasti (např. v krychličce objemu $\Delta V = 1 \text{ cm}^3$, ...) dělenou objemem...“. V souvislosti s atomem vodíku označovat centimetr krychlový za malou oblast není zrovna šťastné – pravděpodobnost výskytu elektronu v ní (pokud tam bude daný atom vodíku) bude rovna jedné s přesností na hodně desetinných míst...

Drobnost týkající se jednotek: na 62₆ se jednotka hustoty pravděpodobnosti uvádí jako $1/\text{cm}^3$. Vzhledem k tomu, že už neužíváme soustavu CGS, přimlouval bych se za jednotku $1/\text{m}^3$, podobně i výše na dané stránce. Související drobnost: Na 37₃ se konstatuje, že v tab. 2.3 není měřítko na svislé ose grafů pro bodovou a radiální pravděpodobnost stejné; možná by stálo za připomenutí, třeba v poznámce, že není stejná ani jednotka. (Fakticky tedy pojem „stejně měřítko“ ani nedává přesný smysl.) Obecně myslím, že i když se na svislých osách grafů nikde nevyznačují měřítka, možná by stálo za to upozornit, jak jsou hodnoty hustot pravděpodobností velké (hodnoty ρ řádu 10^{15} m^{-3} mohou být pro studenty překvapením).

Pojem *orbital*, s nímž se ve studijním textu a pracovních listech dále významně operuje, je na s. 29 zaveden značně vágně. Zjevně je to proto, že se v literatuře, jak je i v práci naznačeno, používá v různém významu. Právě proto by však bylo velmi vhodné vysvětlit jej ve studijním textu podrobněji a detailněji komentovat jeho chápání v různých pramenech. (Je škoda, že tomuto pojmu se vůbec nevěnovala řešeršní část práce.) Například ve Vacíkové učebnici Obecná chemie je jako orbital brána i samotná vlnová funkce; toto pojetí není na s. 29 a zřejmě ani dále zmíněno. O souvislosti s chemií se text pro učitele zmiňuje na s. 66, kde se uvádí, že vhodnou matematickou transformací lze přejít od „fyzikálních funkcí“ k „chemickým funkcím“. Bez konkrétního příkladu však toto tvrzení působí značně abstraktně; bylo by velmi vhodné prezentovat (na grafech i matematicky) a komentovat alespoň nějaký jednodušší příklad, jak spolu souvisí orbitaly ve fyzice a v chemii, a pak případně dát čtenáři odkaz, kde najde příklady další. (Toto se týká i prvních dvou odstavců na s. 39.)

Odkazy na literaturu, kde zájemci najdou podrobná řešení, by byl vhodný i v případě poslední rovnice na s. 24, jejímž řešením jsou kulové funkce, a rovnice pro $R(r)$ na s. 26, jejímž řešením jsou Laquerrovy polynomy. Respektuji zde stanovisko vedoucí práce, že jde spíše o technický výpočet a že podstata přístupu k řešení byla ukázána jinde (na příkladu harmonického oscilátoru), přesto však bych považoval za užitečné doplnit informaci typu „řešením je“ ještě odkazem na zdroj, kde mohou zájemci nalézt podrobný srozumitelně popsany postup řešení.

Možné námítky a otázky k pracovnímu listu a textu pro učitele:

K myšlenkovému experimentu se střílením elektronů (obr. 3.1 b na s. 48 resp. obrázek na s. 77): Student nebo učitel může namítnout, že ve staré televizi s vakuovou obrazovkou elektrony létají vždy na určené místo stínítka a dávají vzniknout obrázku; podobně je tomu u osciloskopu s vakuovou obrazovkou. Kdyby dopadaly na terč náhodně, jak je to uvedeno v textu – může argumentovat student – tak by na obrazovce nevznikl jasný obrázek, možná by byla dokonce rovnoměrně „zašeděná“. Jinak řečeno: bylo by vhodné alespoň stručně zmínit škály, na nichž se na terči uvedené náhodné chování elektronů děje. A velmi vhodné by bylo uvést kromě teoretického nakresleného obrázku i fotografii výsledku nějakého reálného experimentu, který dokumentuje toto chování elektronů. (Chování elektronů je nové, zcela odlišné od chování objektů v makrosvětě, na něž jsme zvyklí, proto by zde bylo vhodné dokumentovat toto chování co nejpřesvědčivěji.) Související drobnost: Na 77¹¹ text říká „Přestože byly počáteční podmínky elektronů stejné...“. Mají středoškolští studenti dostatečně zažitý pojem „počáteční podmínky“? Nebylo by vhodnější jednoduše říct, že elektrony byly vystřeleny stejně?

K fotografování kmitajícího závaží: Na 78₁ by myslím bylo lepší zmenšování Δx dělat po desetinasobcích: 1 cm, 1 mm, 0,1 mm, ... a zastavit se na té desetiné milimetru. Pro uvedený 1 μm jsme jednak skoro na hranici optického rozlišení a navíc, kdyby si student počítal, kolik pixelů by musel mít snímač daného fotoaparátu... Jde sice o myšlenkový pokus a je jasné, že technické detaily fotoaparátu zde nemají mít místo, ale přece jen je asi lepší takovým úvahám předejít. Navíc bych doporučoval i v pracovním listu pro studenty uvést, že fotografovat bychom měli v náhodných časech, podobně, jako je to uvedeno v textu pro učitele na s. 52.

Ještě k textu pro učitele: Na 47₈ se po zmínce o počáteční poloze a rychlosti píše „... a budou na ni působit stejné síly (tj. bude mít stejné počáteční podmínky)“. Síly ovšem mohou být různé i při stejných počátečních podmínkách, bylo by třeba zde text přeformulovat.

Na s. 49 se zdůrazňuje, že „vystřelení elektronu z děla“ je zjednodušení, že tím máme na mysli připravení elektronu v určitém kvantovém stavu. To zní ale velice abstraktně, ve skutečném experimentu bude nejspíš nějaké reálné „elektronové dělo“; bylo by vhodné zde trochu blíže komentovat, jak reálně elektron směřem k terči vyšleme. Stejně tak pro změření polohy elektronu při dopadu do terče. Jinak se lze obávat, že u studentů i učitelů vznikne představa o jakési tajemné a nepochopitelné „přípravě elektronu v daném stavu“.

Podrobně by si zasloužil komentovat i proces měření popsany na následující stránce; nebo by si alespoň zasloužil odkaz na pramen, kde je toto hlouběji rozebráno. Jestliže je totiž na 50¹²⁻¹³ napsáno „Kdybychom znovu měřili polohu této částice, dostali bychom už pokaždé stejný výsledek...“, může to u hloubavějšího studenta vyvolat představu, že současně známe polohu částice (to je ta změřená) i její rychlost (o té student usoudí, že je nulová – když má částice ve všech dalších časech stejnou polohu, zřejmě se nikam nepohybuje). Takže to vypadá, že jsme současně změřili přesnou polohu a rychlost (a tedy i hybnost) částice, v rozporu s relací neurčitosti. To je zjevný paradox – a jak má učitel, který si přečetl materiál k semináři, odpovědět na podobný dotaz studenta?

Na závěr už jen dvě připomínky k otázce, s jakou pravděpodobností lze nalézt elektron v jádře atomu. (Jde o otázku uvažovanou na s. 63 a řešenou ve třetí úloze v dodatku D.) Řešení v úloze v dodatku D se provádí pomocí integrace radiální hustoty pravděpodobnosti metodou per partes; to je dle mého názoru zbytečně složité. Odhad dané pravděpodobnosti lze totiž udělat i středoškolsky, prakticky z hlavy, a jen pomocí bodové hustoty pravděpodobnosti. Stačí si uvědomit, že v exponenciálním faktoru $e^{-r/a}$ v $R(r)$ je r v jádře a jeho těsné blízkosti cca o pět řádů menší než a . To znamená, že $e^{-r/a} \doteq 1$. (Odchylku 10^{-5} ukáže běžná kalkulačka.) Až na faktory řádu jednotek tedy bodová hustota pravděpodobnosti bude $1/a^3$. Vynásobením $(4/3)\pi r^3$ dá výslednou pravděpodobnost; výsledek je řádu 10^{-14} . Bylo by dle mého názoru vhodné, aby podobný jednoduchý postup byl pro středoškoláky také v úloze či v textu pro učitele prezentován.

A ještě jednu poznámku k tomuto problému: Výsledná pravděpodobnost 10^{-14} se jeví prakticky zcela zanedbatelná. Ovšem v jednom molu vodíku je asi $2 \cdot 6 \cdot 10^{23}$ atomů vodíku. Čili student může usoudit, že v daném molu vodíku je v každém okamžiku asi 10^{10} elektronů v jádře, tedy v protonu... Možná by alespoň v textu pro učitele mohla být podobná úvaha komentována, nakolik je odpovídající a nakolik zjednodušená.

Závěr:

Navzdory uvedeným připomínkám konstatuji, že jde o práci kvalitní. (Nekvalitní práci by ostatně nemělo smysl tak podrobně komentovat.)

Připomínky „techničtějšího charakteru“ půjde, jak věřím, zapracovat do finální verze kapitoly studijního textu, pracovního listu pro studenty a materiálu pro učitele. Některé obecnější výše vznesené připomínky souvisí s tím, že kvantovou mechaniku není snadné vykládat, zejména na úrovni přístupné středoškolákům, a se snahou o konceptuální pochopení. Snad i tyto připomínky pomohou texty alespoň zčásti vylepšit, byť to nemusí být jednoduché.

Na závěr bych chtěl znovu zdůraznit, že dle mého názoru jde o práci přínosnou, na jejíž výsledky nebude „padat prach“, ale budou dobře sloužit budoucím i současným učitelům a studentům.

Případné otázky při obhajobě a náměty do diskuze:

1) Kapitola 2 bude částí studijního textu k přednášce vedené vedoucí práce. To by mohlo vést k domněnce, že tato kapitola je vlastně do velké míry „přepisem“ ze stávajících přednášek. Co by zde autorka vyzdvihla jako vlastní přínos k vytvořenému studijnímu textu?

2) Při studentském řešení úloh z pracovního listu (Tab. 3.2 na s. 64) mají studenti barvy vlastně obráceně než je to na grafech z počítače: na bílém papíře zatmavují to, co je na grafech z počítače nejjasnější barvou. Nedělalo to při pilotáži problémy? A nebylo by vhodné vyzkoušet namalovat počítačové grafy také tak, že nulové hustotě pravděpodobnosti by odpovídala bílá barva a maximum ρ naopak intenzivní tmavá barva?

A související otázka: Na grafech z počítače (např. na s. 65 a jinde) jsou místa s nejvyšší pravděpodobností „přepálena“ (tak to je v práci popsáno) bílou barvou. Nebylo by vhodnější grafy vykreslit pomocí více barev, aby šlo rozlišit i vyšší hodnoty ρ ?

3) Zpětná vazba od studentů je v práci popsána jen dosti stručně a spíše obecně. Bylo by možno tuto zpětnou vazbu i hodnocení a posouzení od učitelů komentovat podrobněji, například uvést příklady toho, k jakým úpravám textů vedly připomínky studentů a učitelů?

Práci

doporučuji

nedoporučuji

uznat jako diplomovou.

Místo, datum a podpis oponenta:

v Praze, 30. 5. 2022