

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Bedřich Velický

Kvantový svět ve škole a doopravdy

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 35 (1990), No. 1, 33--38

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/137996>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1990

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

- [7] SECHOVSKÝ V. a HAVELA L.: *Actinide Intermetallics*, v: *Handbook of Ferromagnetic Materials*. Ed. E. P. WOHLFARTH and K. H. J. BUSCHOW. Amsterdam, North-Holland 1988, 309.
- [8] HILL H. H., v: *Plutonium 1970 and Other Actinides*, Ed. W. H. MINER. New York, AIME 1970, 2.
- [9] OTT H. R., RUDIGIER H., FISK Z., SMITH J. L.: *Phys. Rev. Lett.* 50 (1983), 1595.
- [10] BUCHER E., MAITA J. P., HULL G. W., FULTON R. C., COOPER A. S.: *Phys. Rev.* B11 (1975), 440.
- [11] STEWART G. R.: *Rev. Mod. Phys.* 56 (1984), 755.
- [12] FISK Z., HESS D. W., PETHICK C. J., PINES D., SMITH J. L., THOMPSON J. D., WILLIS J. O.: *Science* 239 (1988), 33.
- [13] MAPLE M. B., CHEN J. W., LAMBERT S. E., FISK Z., SMITH J. L.: *Phys. Rev. Lett.* 54 (1985), 477.
- [14] BATLOGG B., BISHOP D. J., GOLDING B., VARMA C. M., FISK Z., SMITH J. L., OTT H. R.: *Phys. Rev. Lett.* 55 (1985), 1319.
- [15] BROHOLM C., KJEMS J., BUYERS W. J. L., PALSTRA T. T. M., MENOVSKY A. A., MYDOSH J. A.: *Phys. Rev. Lett.* 58 (1987), 1467.
- [16] TAILLEFER L., NEWBURY R., LONZARICH G. G., FISK Z., SMITH J. L.: *J. Magn. & Magn. Mater.* 63–64 (1987), 372.
- [17] DONIACH S., v: *The Actinides: Electronic Structure and Related Properties*. A. J. FREEMAN and J. B. DARBY, JR., editors. Academic Press, New York 1974, vol. II., p. 51–72.
- [18] KOELLING D. D., DUNLAP B. D., G. W. CRABTREE: *Phys. Rev.* B31 (1985), 4966.
- [19] STEGLICH F., AARTS J., BREDL C. D., LIEKE W., MESCHÉDE D., FRANZ W., SCHAEFER H.: *Phys. Rev. Lett.* 43 (1979), 1892.

vyučování

KLASICKÝ A KVANTOVÝ SVĚT
VE ŠKOLE A DOOPRAVDY

Bedřich Velický, Praha

1. Vymezení tématu

Společenská relevance kvantové fyziky v době atomové energie a samočinných počítačů je zřejmá. Její kulturní význam je rovněž uznáván: změnila základním způsobem obraz světa. Není divu, že se stává součástí všeobecného i speciálního vzdělání. Právě při snahách o širokou diseminaci kvantové teorie se však ukazu-

je, že téměř šedesát let vývoje jí ani nezaručilo všeobecné přijetí a věcnou, propedeutickou zralost. Snad nejobtížnější stránkou je vztah kvantového světa ke světu „klasickému“, přesněji k naivně realistické interpretaci světa nám fenomenologicky dostupného, jejímž posledním zjemněním je klasická fyzika 19. století. Právě tento vztah je však centrální pro elementární kurzy na úrovni nejnižších ročníků vysokých škol, tím spíše škol středních. Didaktickému zpracování základů kvantové teorie se věnovalo mnoho úsilí a mnohého bylo dosaženo. Úspěchy však nejsou všeobecné, jak ukazují např. nedávné práce na experimentálních učebnicích fyziky pro gymnázia. Cílem tohoto příspěvku je nikoli suplovat tolik potřeb-

Přetištěno z publikace: *Pedagogicko-fyzikální seminář „Nové impulsy“* — Seminární materiály 8. Red. M. ČERNOHORSKÝ a J. JANÁS. Brno, OS Pedagogická fyzika FVS JČSMF 1984, 24.

Autor, RNDr. BEDŘICH VELICKÝ, CSc. (1938), je vědeckým pracovníkem Fyzikálního ústavu ČSAV, Na Slovance 2, 180 40 Praha 8.

nou hlubokou analýzu jednotlivých otázek, ale pohlédnout na problém z určitého odstupu a upozornit na některé obecné aspekty.

2. Proč je obtížné vyučovat kvantové teorii

Prvotní a hlavní důvod spatřuji v tom, že kvantové myšlenky jsou obtížné a obtížně přijatelné. Narážíme tu na psychologickou bariéru vyrůstající ze staleté tradice karteziánské, bariéru ušlechtilé víry v klasický obraz světa a navozující neomezené možnosti vědy a techniky, ztělesněné Vernem v inženýru Cyrusi Smithovi. Ještě hlouběji působí atavismy geneticky fixované, jejichž racionálním shrnutím je aristotelská koncepce světa. Tyto vlivy zasahují každého, žáka či posluchače, učitele, vědce v oboru kvantové teorie a nakonec i samotné její tvůrce.

V historickém pohledu je kvantová koncepce jedním z epochálních zvrátů v lidské kultuře, k nimž došlo v jedinečné intelektuální atmosféře Evropy poválečných dvacátých let – onoho roku 1925 A. Breton vydává *Manifest surrealismu*, Le Corbusier své *Za architekturou* a světovou premiéru mají *Rhapsody in Blue* a *Pacific 231*. Integrace těchto a dalších geniálních podnětů do všeobecné kultury byla obtížná a rozporuplná. Vytvořila se historická zátěž a ta dodnes působí. Nejinak tomu bylo i s kvantovými teoriemi. Tak ze tří ekvivalentních verzí kvantové mechaniky, vzniklých – z dnešního pohledu – téměř současně, pouze vlnová mechanika byla široce přijata mezi fyziky i laiky, a to pro svou názornost. Ta však zastírala intuicionistické kořeny vlnové teorie a zároveň vedla k četným pozdějším interpretačním konfúzím. Zajímavá je také nespokojenost některých zakladatelů kvantové teorie

s jejím konečným vyzněním, zejména A. Einsteina, příznačně L. de Broglieho a E. Schrödingera, ale také H. A. Kramerse. Pokusů o „klasickou“ reinterpretaci kvantové mechaniky je stále mnoho a nelze je jednostranně bagatelizovat. Důsledné řešení paradoxu EPR (Einstein, Podolsky, Rosen), ačkoli podporováno experimenty, stále nebylo všeobecně přijato.

Co bylo řečeno o kvantové teorii jako vědecké disciplíně, platí ve stejné míře i o jejím didaktickém zpracování, zejména na elementární úrovni. Kvantová mechanika se vykládala a propagovala od samého začátku a postupně se vytvořil ustálený styl, který dnes můžeme nazvat tradičním, založený na vlnovém popisu. Je to styl používaný na středních školách výlučně a na školách vysokých s velkou převahou. Alternativní netradiční přístupy přinesly mnoho nového, např. známý pokus Feynmanův, projekt G. Marxe či u nás postup J. Formánka. Přesto je nelze zcela doporučit jako univerzální metodu. Do značné míry závisejí jednak na osobnosti učitele, jednak se vesměs ukázaly jako náročné na čas i vyspělost posluchačů; všechny tyto požadavky jsou v masovém měřítku, třeba středoškolském, nesplnitelné. Proto se kloním k názoru, že nejvhodnější je vyjít z metodiky tradiční, avšak oprostěné od některých nedostatků a poučené na postupech moderních.

Připomeňme si tradiční schéma elementárního kursu kvantové mechaniky: kvantové efekty v historických experimentech, de Broglieho teorie, difrakce elektronů a relace neurčitosti, časová Schrödingerova rovnice pro jednu částici (někdy Ehrenfestova věta), řešení nečasové rovnice pro jámu, oscilátor, vodík (někdy nadbariérový odraz a tunelový jev).

Jak málo! Pro mnohé je toto první setkání s kvantovým světem také setkáním

posledním. Z historických důvodů je tu všechno o vlnové mechanice podle stavu z r. 1927. Další vývoj chybí. Historické důvody vedou rovněž k zdůrazňování odlišnosti kvantového a klasického světa až k jejich antagonizaci. Týž dojem nutně vzniká i z formalismu samotného: kontrast klasického hmotného bodu s Newtonovým pohybovým zákonem a vlnové funkce stacionárního stavu nenechává adepty na pochybách, že kvantová teorie popis klasický neguje.

Jaký je však výsledný kvantový obraz světa? Zde záleží velmi na konkrétní verzi a nechci zobecňovat. Až příliš často však obcházení formálních obtíží a pokusy o navozující úvahy vyvolávají mylný dojem, že kvantová fyzika je indeterministická fyzika klasická. Neblahé také bývají výklady o kvantovém dualismu. Protože dále vlnový popis není spojen se schématem kvantového experimentu, na místě rozkotaného klasického světa se objevuje agnostická mlžina vln a kvant.

Na druhé straně se však kvantový svět nejeví příliš škodlivý, protože v uvedeném podání se týká buď subtilních experimentů prováděných kdysi v minulosti, anebo nepodstatných jevů týkajících se jednoho elektronu v soustavách atomárního rozměru.

Připojme, že četné historické experimenty k výkladu potřebují nejen kvantovou hypotézu, ale také znalosti statistické fyziky, speciální relativity a dalších, a že Schrödingerova teorie navazovala na hluboké znalosti z analytické mechaniky, které dnes těžko předpokládat. To znamená, že žák či posluchač je zatížen řadou vedlejších požadavků a hlavní cíl výkladu je tím znesnadňován.

Pokud je elementární kvantová mechanika pouze cyklem ve studiu kvantové teorie, uváděné obtíže se později kompen-

zuji a kromě toho nastoupí mimorozumové procesy, které Einstein nazval „Einfühlen“. To je však případ pouze studentů fyziky a nenastane u středoškoláků, ani u vysokoškolských směrů technických, biologických, lékařských ... Zde zároveň nemůžeme počítat s hlubší motivací pro studium fyziky a o zájem posluchačů bychom tu měli spíše usilovat. Proto základní úkol vidím právě v práci na didaktickém systému fyziky (se zvláštním zřetelem k fyzice kvantové), určeném pro studenty nefyziky na všech stupních škol.

3. Návrhy ke zlepšení tradičního elementárního výkladu kvantové teorie

Vycházíme-li z názoru, že tradiční postup má své zdůvodnění a je potřeba jen jeho modifikací, dá se z předchozího rozboru odvodit, jaké modifikace by se měly zavést, předpokládáme-li, že jde o jednodokolové a definitivní seznámení s problematikou. Shrnuji je do několika postulátů psychologicko-didaktického rázu:

1. Vymezit ty poznatky, které jsou nezbytné pro vytvoření správného dojmu o kvantové koncepci světa, a rozčlenit je na ty (elementárnější), které se hodí k formalizování, a na ostatní.
2. Přiznat otevřeně obtížnost kvantové teorie a nezastírat ji simplifikacemi, ať matematického či fyzikálního rázu.
3. Budovat kvantovou teorii jako nástroj pro popis chování fyzikálních soustav a výklad experimentálních výsledků, ukázat její univerzálnost a produktivnost a odtud přecházet k základním pojmům, kde není místa pro kompromis v interpretaci. Formalismus při tom potlačit na nezbytné části.

4. Kvantovou teorii v souvislosti s tím navázat neantagonisticky na fenomenologický obraz světa, který je ovšem klasický, a „klasickou mikrofyziku“ chápat jako neoprávněnou extrapolaci fenomenologie.
5. Při výkladu postupovat ne historicky, ale induktivně a dbát jeho relevance k zájmům a problémům posluchačů jako obyvatel současného světa.
6. Na každé úrovni umožnit posluchačům „být při tom“, umožnit jim pocit, že kvantová teorie se dá aktivně použít k vysvětlení i predikci fyzikálních dějů.

Tyto zásady není možné na tomto místě zevrubně rozebírat, připojím však několik poznámek ke specifickým otázkám.

Snad nejobtížnější je zvolit výběr témat tvořících na dané úrovni jádro kvantové koncepce světa. Hlavní nebezpečí je tu maximalismus a musíme přiznat jistou oprávněnost mezního názoru, že většina středoškoláků by se bez kvantové teorie dobře obešla. Na druhé straně svět, který nás obklopuje, je natolik zaplněn úkazy nekvantově nepochopitelnými, že základní poučení o kvantových úkazech patří do minimální intelektuální výzbroje moderního člověka. Ovšem to znamená začlenit do „jádra“ také kvantový problém mnoha částic s aplikací v kvantové chemii, v pevných látkách a v jádře. Teprve pak můžeme mluvit o relevanci kvantové fyziky.

Jestliže chceme otevřeně přiznávat obtížnost kvantové teorie, musíme také blíže stanovit její zdroje. Nejpatrnější je obtížnost formální. Optimální matematický aparát je pravděpodobně příliš náročný nejen pro středoškoláka, ale v nižších ročnících i pro vysokoškoláka. Tato vnější pseudoobtížnost přehluší skutečné obtíže pojmové, související právě s neklasickostí, a tedy s místy, kde se kvantová

teorie nejvíce rozchází s intuicí založenou na fenomenologickém obrazu světa. Můj návrh spočívá především v tom, aby formalismus byl odsunut do pozadí a aby plané hloubání o pojmových záhadách bylo zcela vypuštěno. Vzniklý prostor by byl věnován třetímu aspektu kvantové teorie, který můžeme nazvat operacionalistickým: vyložit, jak kvantová teorie napojí popis mikrosvěta na popis fenomenologický a jak se jí používá k získání výsledků – relevantních pro experiment a pro společenskou praxi. Z tohoto hlediska navrhuji také modifikace nebo úplné záměny v rozboru historických experimentů.

Na závěr bych chtěl ilustrovat shora vytčené zásady podrobnějšími zmínkami ke třem bodům.

Jedním z úseků elementárního kursu zastrašujících přemírou matematiky jsou příklady kvantování energie u oscilátoru a Keplerovy úlohy. Je jistě pěkné, že jsou přesně řešitelné, ale to neznamená, že příslušná řešení musíme detailně provádět; alternativně lze s nimi pouze seznámit a charakterizovat je pomocí jednoduchých prostředků, jako rozměrové úvahy o škálování, využití přesných vztahů typu zachování energie, věty o viriálu, využití symetrie, odhady pomocí relace neurčitosti, kvalitativní vlastnosti vlnových funkcí (oscilační teorém, asymptotika), vzájemné srovnání a srovnání s jámou, semi-klasické a korespondenční úvahy. Zdůrazňuji, že nejde o náhražkové řešení, ale o podstatně podnětnější přístup, podtrhující obecné kvalitativní vlastnosti, generalizující zkušenosti z jednoduchých modelů a zároveň umožňující aktivní účast studentů. Do dnešního studia rozhodně patří také využití počítačů, na kterých můžeme při jejich současných technických parametrech demonstrovat

např. podmínky kvantování, závislost na parametrech úlohy atd. v reálném čase, před očima studentů.

Heslovitě chci uvést některé cesty k vysvětlení relevance kvantové teorie:

– U klasických experimentů vybírat ty, které se používají i dnes a uvádět je v současné podobě. Třeba u difrakce elektronů jsou výsledky dosahované na komerčních aparaturách názorné a přesvědčivé a slouží k neobyčejně přesnému zkoumání např. molekul, povrchu krystalů, nedokonalostí v krystalech. Byly provedeny i pokusy s difrakcí na makroskopických štěrbinách a třeba Youngův pokus pro elektrony není pokusem myšlenkovým, ale byl detailně realizován.

– Závažná je otázka přesnosti kvantové teorie. Ta se postupně ověřovala se stále vyšší dokonalostí pro jednoduché soustavy (atom vodíku, He, Li, molekula H_2 , anomální moment elektronu ...) a shoda teorie s experimentem je omezována jen znalostí fundamentálních konstant; kvantové jevy vedou k jejich stálému zpřesňování (Josephsonův jev, laserová spektroskopie, ...) a kvantová metrologie je dnes samostatný obor, směřující k zavedení absolutních jednotek nezávislých na humánním faktoru.

– Z mnohačasticových jevů je periodická soustava prvků a její objasnění snad nejnáděrnějším úspěchem kvantové mechaniky, v návaznosti pak teorie chemické vazby. Dnešní úspěchy jsou natolik výrazné, že je škoda omezovat se na molekulu vodíku.

– Další opomíjený moment jsou makroskopické kvantové projevy. Vedle klasických příkladů jako specifická tepla krystalů, degenerace elektronového plynu v kovech jsou markantní např. kvantové galvanomagnetické jevy, kvantové jevy v inverzních vrstvách, tunelové diody,

Josephsonovy kontakty a zejména kooperativní jevy: feromagnetismus, supratekutost a supravodivost. Cenu těchto příkladů vidím jednak v jejich kráse, jednak v tom, že dokonce i ve světě přístupném přímo naší zkušenosti dochází k jevům prokazatelně kvantové podstaty.

Zastavme se ještě u srovnání klasického a kvantového popisu pohybu mikročástice. Jak již řečeno, v tradičním pojetí se oba popisy jeví jako odtržené a ve všem odlišné. Tento mylný dojem je vytvářen především tím, že se málo pozornosti věnuje časové evoluci kvantových soustav. Tam lze zjistit řadu strukturních shod: platí například tytéž zákony zachování a jejich souvislost se symetrií, inverze času, věta o viriálu. Platí zejména Ehrenfestovy věty, u nichž lze vystopovat i podstatné rozdíly proti klasickým Hamiltonovým rovnicím. Pro bližší objasnění je přiměřené použít klubek a jejich evoluce v kvaziklasických a podstatně kvantových podmínkách (opět skvělá možnost počítačové simulace). Pro oscilátor a pro rotátor můžeme také zavést koherentní stavy, ale nejspíše jen na verbální nebo obrázkové úrovni. Zásadně důležitá strukturní shoda obou popisů spočívající v oddělení pojmu stav soustavy a pozorovatelná veličina se neobjevuje snad v žádné učebnici. Přitom je dosti přirozené ji zavést zejména při úvodech do statistické fyziky, kde klasická fázová distribuce a její Liouvilleova rovnice stojí vedle matice hustoty a její rovnice von Neumannovy.

Při tomto srovnání obou popisů připadá nejasná úloha kvaziklasické limitě. Kdysi se hodně věnovalo principu korespondence, přednášela se Bohrova teorie, dnes se to pokládá za překonané. Jsou tu nejasnosti: Za prvé, zajisté Bohrova teorie je aproximativní, není však nesprávná, vždyť k ní lze dospět kvaziklasickou limitou.

Upozorňuji na to ze dvou důvodů: jednak užití kvaziklasiky může usnadnit matematické obtíže, jednak tradiční příklady kvantových soustav jsou kvaziklasické, především všechny kvadratické hamiltoniány, a tedy volná částice, částice v homogenním elektrickém, magnetickém, gravitačním poli, oscilátor. Za druhé, dosud jsem neviděl, že by se teorie difrakce uváděla jinak než v přiblížení fyzikální optiky, které je s kvaziklasikou rovnocenné. Za třetí, ve statistice se zavádějí buňky ve fázovém prostoru a to je táž úroveň kvantovosti. Konečně i sám vodík má ještě jeden integrál pohybu související s numerickou výstředností, který je odpovědný za akcidentální degeneraci různých orbitálních symetrií, ale také za kvaziklasické kvantování. Jak tedy s kvaziklasickým popisem naložit v rámci elementárního kursu, to pokládám za hodno hlubšího rozboru.

4. Místo shrnutí

Tento můj nesystematický příspěvek si nedělal nárok na autoritativní hodnocení prakticky uplatňovaných postupů při elementárních kursech kvantové teorie, snažím se však upozornit na některé okolnosti, jež mohou v detailním pohledu každodenní pedagogické praxe být nezpozorovány. K příspěvku jsem se odhodlal hlavně proto, abych si na širším fóru ověřil, nakolik je moje hodnocení adekvátní, a budu velmi zavázán za každý podnět a za každou poznámku, a to tím spíše, že souběžně připravuji k praktickému ověření vlastní verzi kvantové fyziky pro středoškolskou koncipovanou v duchu zde uvedených náhledů. Děkuji J. Klímovi a V. Freiovi z matematicko-fyzikální fakulty UK v Praze za plodné diskuse, během nichž jsem si mohl upřesnit své stanovisko.

jubilea & zprávy

ZEMŘEL PROF. RNDr. JOSEF ŠIMEK

Dne 28. března 1989 zemřel po delší, těžké nemoci ve věku 81 let prof. RNDr. Josef Šimek, nositel vyznamenání Za vynikající práci, bývalý proděkan přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého, člen její vědecké rady a dlouholetý vedoucí katedry algebry a geometrie, člen komise pro obhajoby disertačních prací v oboru teorie vyučování matematice, zakladatel studijního

