



Vážený pan  
prof. RNDr. Zdeněk Dvořák, DrSc.  
Proděkan pro vědecké a výzkumné záležitosti  
Přírodovědecká fakulta UP

**Oponentní posudek na habilitační práci Mgr. Karla Lemra, Ph.D. „Kvantové zpracování informace s laditelným hradlem pro kontrolovanou změnu fáze“**

Předložená habilitační práce je převážně zaměřena na experimentální vývoj a související teoretickou analýzu podmíněných kvantových bran mezi dvěma kvantovými bity reprezentovanými stavy fotonů produkovaných spontánní parametrickou sestupnou konverzí a na potenciální aplikace těchto bran. Využití **interference dvou fotonů na lineárních optických elementech ke kvantovým operacím** je rozvíjeno na pracovišti kandidáta od roku 2003, především pod vedením doc. Jana Soubusty (kandidát byl jeho PhD studentem). Tyto typy experimentů byly ve světě realizované již dříve skupinami vedenými např. prof. Zeilingerem, prof. Gisinem, prof. Whitem a dalšími. Před působením dr. Karla Lemra jeho pracovišti již proběhly dvě fáze experimentálního vývoje v této oblasti: prvotní experimenty testující principy kvantové interference a provázanosti fotonů a druhá fáze – konstrukce a ověření kvantových klonovacích zařízení a základních podmíněných kvantových bran. Tyto informace zasazují habilitační práci dr. Karla Lemra do vývoje jeho pracoviště.

Podmíněné kvantové brány s lineární optikou sice nemohou plně nahradit potřebné deterministické kvantové brány nezbytné pro nadcházející kvantovou technologii (pro ně je potřebné využít jiné experimentální platformy), nicméně **jsou vhodné k řadě principiálních testů**. Jejich implementace a studium je proto stále důležitou částí výzkumu v oblasti kvantových technologií, nicméně není rozumné tyto čistě optické kvantové brány přeceňovat v budoucích aplikacích. Především vzhledem k jejich zásadním limitům a vzhledem k dynamickému rozvoji deterministických operací s pevnolátkovými kvantovými bity (např. NV centra v diamantech). Pro principiální testy kvantových operací s lineární optikou je pak prvotní kvalita, jednoduchá konstrukce a přestavitelnost prováděných elementárních operací. Až druhá v pořadí je pravděpodobnost úspěchu. Ta nemůže být nicméně velmi malá, protože pak jsou experimenty velmi časově náročné. Optimalizace pravděpodobnosti úspěchu bez značného zvýšení složitosti schémat je proto rozumná. Limity habilitační práce jsou proto vymezeny těmito objektivními faktory a současně omezeným rozvojem moderních kvantových technologií v České Republice.

Uvnitř těchto limitů představuje předkládaná habilitační práce již další generaci teoretických návrhů a realizací experimentů demonstrujících kvantové brány a jejich analýzu založených na interferenci dvou fotonů na lineárních optických elementech. **Je nepochybné, že Karel Lemr podstatně přispěl k této třetí fázi na jeho domovském pracovišti, jak v teoretickém, tak v experimentálním směru.** Jak je patrné z jeho publikační aktivity, v teoretickém směru především díky intenzivní spolupráci s dr. Karolem Bartkiewitzem, který působil na kandidátově pracovišti. V experimentální části pak především ve spolupráci s Antonínem Černochem ze stejného pracoviště.

**Práce je postavena na deseti původních vědeckých článkách kandidáta, které byly publikovány v letech 2011-2015** v časopisech Physical Review A (6x) a Physical Review Letters (1x), Journal of Physics B (1x), Optics Communication (1x), Journal of Optics (1x) a dále na sedmi publikacích, které s ní nepřímo souvisí. Dvě práce jsou experimentální, Karel Lemr je jejich prvním autorem, a pak je prvním autorem dalších pěti teoretických publikací z této základní sady 10 publikací. Na zbývajících třech teoretických publikacích je členem týmu. Konkrétní popis podílu autora na jednotlivých vědeckých pracích sice není uveden, z kontextu lze nicméně usoudit, že byl i na společných pracích podstatný. **Těchto deset vybraných publikací získalo ke dni 2.8.2016 kolem 45 citací bez autocitací** (podle Web of Science).

Práce je koncipovaná jako soubor publikací doplněný úvodem, což je z mého osobního pohledu postačující formát. Úvod vhodně doplňuje publikované práce a vysvětluje jejich vzájemné souvislosti. **Habilitační práce je psána velmi kvalitní angličtinou, srozumitelně a přehledně.** Slabší stránkou práce je popis zasazení a přínosu těchto publikací ve vývoji oblasti, v širším mezinárodním kontextu a také ve vztahu k jiným experimentálním platformám. Vzhledem k probíhající integraci dříve oddělených oblastí kvantového zpracování informace do jediné super-disciplíny kvantových technologií by to bylo pro kandidáta a práci samotnou přínosem.

Ze širšího pohledu kvantové optiky, přesněji kvantového zpracování informace s lineární optikou, považuji osobně za nejvýznamnější **implementaci fázového hradla s kontrolovanou silou interakce využívajících mechanismů posunu svazků**, která demonstruje, jak lze plně kontrolovat interferenci dvou fotonů. Předkládaná práce se o tuto techniku a její aplikace silně opírá. Další část práce směřuje svými **teoretickými návrhy k mnohem složitějším lineárně optickým kvantovým operacím s více fotony** (tzv. kvantové routery či zesilovače pro kvantové bity). Toto je určitě možný směr pokračování experimentálního výzkumu dr. Karla Lemra v oblasti lineární optiky, který již nicméně v současnosti dovedl do jistého stupně tým prof. Pana (experimenty s 10 fotony). Zásadní průlom v této oblasti lineární kvantové optiky je možný jen při použití deterministických zdrojů mnoha jednotlivých interferujících a kvantově provázaných fotonů s velkou opakovací frekvencí, což je stále velmi náročný problém. Také je nutné zajistit vysokou stabilitu komplexních lineárně optických obvodů, což je možné jen v integrovaných optických obvodech.

K předložené habilitační práci mám následující připomínky a dotazy. Věřím, že budou přijaty pozitivně. Věřím, že vyjasní některé otázky napadající čitatele a pomohou autorovi k zamýšlení a širšímu pohledu na některé body v habilitační práci.

- 1. v posledním odstavci úvodu práce se říká, že některé její ideje dovolí zvýšit účinnost kvantového počítání a jiné povedou k užitečným zařízením pro kvantovou komunikaci. Není zřejmé, které algoritmy kvantového počítání či protokoly kvantové distribuce klíče jsou myšleny. Bylo by dobré, kdyby toto autor přesně uvedl a podpořil citacemi.**
2. strana 2, pod vzorcem (1.1): tvrzení, že neomezené množství informace může být uchováno ve stavu jednoho kvantového bitu je zavádějící. Chtělo by to upřesnit.
3. strana 3, první věta sekce 1.2: tvrzení, že individuální fotony jsou jednou z vhodných platform pro kvantové zpracování informace, je skoro bezobsažné. Je jasné, že jednotlivé fotony mohou být vhodné pro kvantovou distribuci klíče na velké vzdálenosti, ale touto problematikou se autor v práci nezabývá. Bylo by dobré, kdyby dal tomuto zásadnímu tvrzení obsah a podrobně jej vysvětlil a doplnil relevantními experimentálními citacemi ze současnosti.
4. strana 6: autor se zde věnuje základnímu jevu interference dvou fotonů na vyváženém děliči svazku. Interferenční jevy, které následují, nicméně využívají interferenčních jevů na nevyvážených polarizačně citlivých a necitlivých děličích. Pokud tento úvod nemá být formální, určitě by si zasloužil jednoduchý a pedagogický výklad všech interferenčních jevů, které autor používá.

5. obrázek 2.3: autor zde požívá termín dvou-fotonová interakce, přestože v textu se používá dominantně dvou-fotonová interference. Bylo by dobré toto vyjasnit.
6. sekce 2.3: autor se věnuje kontrolované fázové bráně s optimální pravděpodobností úspěchu. Bylo by dobré jasně vysvětlit, proč je skutečně optimální pravděpodobnost úspěchu klíčová pro aplikace lineárně optických bran, či jejich použití pro principiální experimenty a jestli jednodušší schémata s nižší pravděpodobností úspěchu nejsou postačující.
7. strana 15: v poslední větě autor říká, že implementace laditelné fázové brány s maximální pravděpodobností úspěchu nebyla dosud zopakována jinou laboratoří. Autor by měl tuto informaci ozřejmit, speciálně, zda jiné laboratoře jdou také tímto směrem bran s optimální pravděpodobností úspěchu a pokud ano, doložit toto citacemi. Jestliže nikoliv, mělo by být řečeno, jaké důvody pro to mají.
- 8. strana 22: autor zavádí tzv. kvantovou provazovací účinnost ve vzorci (3.10), ale není jasné, kdy je tato míra skutečně relevantní. Autor by měl uvést aplikaci kvantově provázaných stavů dvou kvantových bitů, ve které kvantovou provazovací účinnost hraje zásadní roli a doložit tuto roli citacemi.**
9. strana 27, předposlední odstavec: tvrzení, že autorovo schéma zvyšuje pravděpodobnost úspěchu o desítky procent, není dostatečně přesné. Kolik je to skutečně a jaké náklady je proto potřeba vynaložit? Existuje stále zájem implementovat lineárně optická hradla s využitím KLM přístupu, když již existují deterministické operace mezi kvantovými bity např. v NV centrech v diamantech.
10. strana 28: klasický router pro klasické stavy přepíná informaci z jednoho kanálu do druhého bez ztráty informace. Klasický router pro kvantové stavy je potřebné zařízení a je jednoduše implementovatelné. Transformace (4.4) a obr. 4.2 kvantového routeru naznačuje, že dva kvantové bity (signálový a kontrolní) se přemění na superpozici signálového qubitu mezi dvěma výstupu. Za prvé, pokud foton nesoucí signálový kvantový bit je ve výstupu 1, jaký kvantový stav se nachází ve výstupu 2? Toto není z popisu transformace zřejmé. Ještě méně je z textu jasné, k čemu je vhodná nebo čím je speciální předkládané metodika vytvoření takové superpozice pro kvantové počítání, kvantovou distribuci klíče, kvantovou metrologii nebo jiné aplikace kvantové technologie.
11. strana 31: Autor říká, že definice a kritéria pro router předložena jím a dalšími spoluautory byla přijata dalšími autory a uvádí citaci na jednu práci [71]. Bylo by dobré, aby autor doplnil, zda i další práce na toto téma postupují podle této definice.
12. strana 33, pod vzorci (4.6a,b): autor uvádí, že je možné využít kvantový router k pravděpodobnostní verzi úplného rozlišení Bellových stavů. Je to skutečně v současné době relevantní aplikace, obzvláště po experimentální demonstraci deterministického a úplného rozlišení Bellových stavů v Hansonově laboratoři [Science 345, 532–535 (2014)]?
13. strana 37: rád bych, aby autor osvětlil, v čem se podstatně liší experimenty na obr. 2.6 a 4.9. Jedná se o stejný experiment, který se liší pouze v přípravě a analýze kvantových stavů fotonů.
14. strana 39 a obr 5.1: na obrázku a v textu je vysvětlena programovatelná kontrolovatelná fázová brána. Pokud je to možné, bylo by takovou bránu napsat pomocí interakčního Hamiltoniánu pro 3 kvantové bity.
- 15. strana 44, pod vzorcem (6.2): autor říká, že heraldované zesilovače kvantových bitů nezvyšují energii signálu. Proč jsou tedy nazývané zesilovači? Z obecného pohledu se jedná o tzv. kvantové filtry, což jsou prvky schopné navýšit přítomnost požadované komponenty stavu při jejím minimálním porušení. Tento koncept byl zaveden již kolem roku 2000 Frankem Verstraete pro zvýšení kvantové provázanosti. Souvislost je jasná ze vzorce (6.4). V roce 2004 publikovala skupina prof. Gisina experimentální test kvantového relé využívající provázané stavy a demonstrující podmíněnou eliminaci ztrát fotonu v optické lince popsanou vzorcem (6.1). V čem je navrhované schéma na obr. 6.1 výhodnější pro tento úkol?**

**16. strana 50: v posledním odstavci autor říká, že kvantové operace s lineární optikou se zdají být speciálně vhodné pro konstrukci kvantově komunikačních sítí. Je jejich potenciál skutečně tak značný, zvláště po experimentální demonstraci plně deterministické kvantové teleportace a porušení Bellových nerovností v Hansonově laboratoři na Universitě v Delftu? Prosím autora o vyjádření.**

Po jasném a krátkém zodpovězení zvýrazněných otázek mohu doporučit předloženou habilitační práci jako základ pro přiznání vědecko-pedagogického titulu *docent*. Závěrem, předkládaná habilitační práce je určitě postačující vstupenkou pro dr. Karla Lemra do další úrovně dynamicky a celosvětově se rozvíjejícího se směru kvantových technologií. Takové vstupenky není možné plně využít bez získání dlouhodobých zahraničních zkušeností na renomovaných pracovištích a následné kvalitní a široké zahraniční spolupráce. Plně také sdílím autorův názor, že nadaní studenti i bakalářského programu mohou přispět k vědeckému výzkumu, obzvláště pokud to vede k jejich dalšímu vědeckému vývoji. Mám, a řada mých dalších kolegů v oblasti také, v tomto směru dlouhodobé zkušenosti, a proto vítám a plně podporuji tuto autorovu aktivitu. Přeji dr. Karlu Lemrovi úspěch v jeho dalším vědeckém a pedagogickém působení a věřím, že v krátké době jeho nový tým podstatně rozšíří spektrum již existujících aktivit v kvantových technologiích na naší fakultě.

V Olomouci 9.8.2016

doc. Mgr. Radim Filip, Ph.D.  
katedra optiky Přírodovědecké fakulty UP