

I. IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE

Název práce:	Kvantové počítače pro fyziku vysokých energií
Jméno autora:	Ondřej Brož
Typ práce:	bakalářská práce
Fakulta:	Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská (FJFI)
Katedra:	Katedra fyziky
Oponent práce:	doc. Ing. Martin Štefaňák, Ph.D.
Pracoviště oponenta práce:	Katedra fyziky FJFI ČVUT v Praze

II. HODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH KRITÉRIÍ

Zadání	průměrně náročné
<i>Hodnocení náročnosti zadání závěrečné práce.</i>	
Zadáním práce je využití kvantových počítačů ve fyzice vysokých energií. Vzhledem k výraznému nárůstu možností kvantových počítačů v posledních letech lze očekávat praktické aplikace i v této oblasti fyziky. Jedná se tedy o aktuální téma, kterému je v zahraničí věnována velká pozornost. Úkolem studenta bylo především udělat rešerši literatury, seznámit se základními principy a metodami kvantového počítání, a vyzkoušet je na jednoduchém modelu.	

Splnění zadání	splněno
<i>Posuďte, zda předložená závěrečná práce splňuje zadání. V komentáři případně uveďte body zadání, které nebyly zcela splněny, nebo zda je práce oproti zadání rozšířena. Nebylo-li zadání zcela splněno, pokuste se posoudit závažnost, dopady a případně i příčiny jednotlivých nedostatků.</i>	
Přes výhrady, které k práci mám (viz níže), považuji zadání za splněné. Student splnil všechny body, které jsou zmíněné v pokynech pro vypracování, byť výsledný dojem z práce není příliš přesvědčivý.	

Zvolený postup řešení	vhodný s výhradami
<i>Posuďte, zda student zvolil správný postup nebo metody řešení.</i>	
Student se zjevně snažil pokrýt co nejvíce oblastí v zadaném tématu. Bohužel, kvantita byla na úkor kvality. Většina rešerše je velmi stručná až povrchní. Žádný z kvantových algoritmů nebo přístupů k realizaci kvantových počítačů není detailně vysvětlen. V práci je minimum matematického odvozování, autor se většinou snaží o intuitivní vysvětlení daného tématu, které ale často obsahuje nepřesnosti. Výsledný dojem z práce nepřesvědčí čtenáře o tom, že student zadanou problematiku pochopil a je schopen ji využít.	

Odborná úroveň	podprůměrná
<i>Posuďte úroveň odbornosti závěrečné práce, využití znalostí získaných studiem a z odborné literatury, využití podkladů a dat získaných z praxe.</i>	
Z odborného hlediska práci nepovažuji za příliš kvalitní. Práce obsahuje značné množství nepřesností a chyb: 1) strana 7, konec kapitoly 2.1 – „Hodnota quditu je tedy superpozicí $ 0\rangle + 1\rangle + 2\rangle + \dots + d-1\rangle$ stavů.“ – Obecný stav quditu je superpozicí bazických stavů, $ 0\rangle, 1\rangle, 2\rangle, \dots, d-1\rangle$, hodnota je určena měřením. 2) strana 10 – „Druhou nejjednodušší branou působící na více - dva - qubity a mající ze všech bran nejbližší ke klasické informatické bráně, konkrétně k NOT bráně, je CNOT brána.“ – CNOT není analogií klasické NOT (tou je X brána), ale XOR (exclusive-or) brány. 3) strana 11 – „Kvantových bran existuje velmi mnoho, ovšem všechny mohou být vytvořeny kombinací výše zmíněných bran, ...“ – výše zmíněné jsou Pauliho brány, Hadamardova brána a CNOT, ty ale netvoří univerzální sadu kvantových bran. 4) strana 13 – Obecná brána – zmíněná transformace U nepopisuje obecnou $U(2)$ transformaci - není unitární a ani nesouhlasí s maticovým zápisem o řádek níže.	

- 5) strana 13, kapitola 3.1 – Kvantový simulátor – nejedná se o pravděpodobnostní počítač, jde o simulace složitějšího kvantového systému pomocí jiného, který umíme dobře ovládat. Fundamentální jsou amplitudy a korelace, ne pravděpodobnosti.
- 6) strana 14, Kvantové dešifrování – „Problém nastává s kvantovými počítači a Shorovým algoritmem [83] vynalezeným Peterem Shorem v roce 1994, který využívá schopnosti kvantového počítače pomocí superpozice zkoumat více stavů zároveň,...“ - Nezkoumá se více členů zároveň, urychlení spočívá v efektivní implementaci kvantové Fourierovy transformace a modulární exponencializace.
- 7) strana 17, Groverův algoritmus – „Groverův algoritmus [48] je kvantový hledací algoritmus využívající superpozice qubitu ke zkoumání několika členů zároveň.“ – Opět se nezkoumá více členů zároveň, využívá se konstruktivní interference na řešení úlohy, díky které ho s velkou pravděpodobností najdeme po $O(\sqrt{N})$ iteracích.
- 8) strana 22, kapitola 5.1.2 Fotonové qubity – „... má foton také orbitální moment hybnosti jakožto složku své celkové hybnosti. Ta sice může nabývat "libovolných" hodnot, ovšem pouze ve dvou směrech - pravotočivém a levotočivém, což lze využít jako dva požadované stavy pro qubit.“ – Orbitální moment hybnosti (OAM) je společně se spinem složkou celkového momentu hybnosti fotonu, nikoli hybnosti. Hodnoty OAM jsou celočíselné, mohou tedy realizovat qudit, byť je to technicky mnohem náročnější než využití polarizace. „takzvaný interferometrický kvantový fotonický počítač, kde namísto toho, zda foton dorazil, zjišťujeme, kdy dorazil“ – všechny fotonické implementace kvantových počítačů využívají interferometrii, bez ohledu na to, jestli je v prostorové nebo časové doméně. „Hlavní výhodou fotonových qubitů je jejich odolnost vůči dekoherenci [65]. Fotony mezi sebou totiž příliš neinteragují, nestojí-li jim v cestě hmotná překážka.“ – dekoherence není způsobena interakcí částic využívaných k přenosu a zpracování kvantové informace, ale jejich nevyhnutelnou interakcí s okolím. „Díky této nízké poruchovosti je také překvapivě jednoduché (ve srovnání s ostatními metodami) škálovat na nich postavený kvantový počítač do vyšších paměťových rozměrů. Zásadní problém je ale rychlost, s níž jejich kvantové algoritmy operují (doslova rychlost světla), a je tedy náročné produkovat přesné současné počáteční stavy pro vyšší počty qubitů“ – Problém je spíše v generaci mnoha nerozlišitelných jednofotonových stavů, protože to v současnosti neumíme udělat deterministicky. Využívané nelineární procesy (sestupná konverze) mají pravděpodobnostní charakter, což vede na exponenciální pokles pravděpodobnosti produkce s rostoucím počtem fotonů. Škálování do většího počtu qubitů ve fotonických implementacích tak není vůbec jednoduché.
- 9) strana 28, chybovost počítačů Barium-137 fidelity SPAM a IBM Osprey machine – udávaná chybovost 99% je fidelita bran, chybovost je pod 1%
- 10) strana 30 – v matici ve vztahu (14) chybí mínus u jednoho z nediagonálních prvků, v tomto tvaru matice není unitární. Pokud ve vztahu (15) má být U jednoqubitová brána jako ve vztahu (14), pak X v rozkladu není CNOT, ale skutečně Pauliho X brána. Kontrolovanou U bránu pak získáme rozšířením A, B, C identitou na kontrolním qubitu, a nahrazením X brány pomocí CNOT (jak je graficky znázorněno v obrázku 12). Operátory R_Y ve vztahu (16) nejsou nikde zavedeny.

Formální a jazyková úroveň

průměrná

Posuďte správnost používání formálních zápisů obsažených v práci. Posuďte typografickou a jazykovou stránku.

Práce je psaná česky, neobsahuje moc překlepů. Obrázky jsou ilustrativní a většinou dobře zpracovány. V obrázcích 13 (a), (c) je špatný popis síly interference – v (a) má být zakázaná, v (c) silná. Za neobvyklý považuji způsob citací, kde odkaz na článek následuje po konci věty, kde je dané téma diskutováno. Některé formulace jsou poněkud zvláštní, např.:

- 1) strana 13 – „... řešení propabilistických problémů propabilistickým (kvantovým) počítačem.“ – slovo „propabilistický“ v češtině neexistuje, je to buď pravděpodobnostní nebo probabilistický
- 2) strana 22 – „... nechat nepozorovaný foton se lámat na rozcestích a změřit až na jejich konci, ...“ – myšlen je zřejmě průchod fotonu děličem paprsku.
- 3) strana 29 – „... operátor ... přeznačit do báze v níž je diagonalizovatelný, ...“ – diagonalizovatelnost je

vlastnost operátoru, nezávislá na bázi. Myšlen je zřejmě převod do báze, v níž je operátor diagonální.
4) strana 29 – „Inicializační bránu jsme realizovali pomocí maticí definované rotační jednoqubitové brány s maticí ...“

Výběr zdrojů, korektnost citací

podprůměrné

Vyjádřete se k aktivitě studenta při získávání a využívání studijních materiálů k řešení závěrečné práce. Charakterizujte výběr pramenů. Posuďte, zda student využil všechny relevantní zdroje. Ověřte, zda jsou všechny převzaté prvky řádně odlišeny od vlastních výsledků a úvah, zda nedošlo k porušení citační etiky a zda jsou bibliografické citace úplné a v souladu s citačními zvyklostmi a normami.

Práce odkazuje na téměř stovku původních článků a knih. Je však otázka, jak dobře je autor prostudoval. V několika případech jsem narazil na to, že odkazovaný článek pojednával o něčem jiném, než co popisoval student. Poměrně zásadní rozpor je např. v kapitole 5.1.4, kde v úvodním odstavci autor zmiňuje využití spinu jádra zachyceného iontu jako qubitu. To mi přišlo poněkud zvláštní, protože v iontových pastech se typicky pro realizaci qubitu využívají elektronové hladiny, buď v hyperjemné struktuře s mikrovlnnými přechody nebo základní a excitovaný stav s optickým přechodem. Zmiňovaná reference [79] pojednává ne o spinu jádra, ale o implementaci bran v optických qubitech. Reference [47] a [76] sice diskutují jaderný spin jako qubit, ale ne v zachyceném iontu, ale v NV centru v diamantu, resp. v atomu křemíku v krystalu. Podobně reference [46] se týká spinu jádra elektricky neutrálního atomu, ne iontu. Dále v kapitole 5.2 v diskusi kvantové nadvlády a výhody je citován článek [41], ve kterém ale rozdělení na 4 případy není. To je možné nalézt článek W. J. Zenga „Clarifying Quantum Supremacy: better terms for milestones in quantum computation“ na webu Medium, resp. v článku školitele „Kvantová výhoda nebo nadvláda? A kde jsme nyní?“ na qubits.cz, kde je původní článek komentován. Interpretace kvantové nadvlády je navíc chybná – nejde o superpolynomiální náskok ve všech úlohách (to prokazatelně není možné), ale v nějaké konkrétní úloze.

Další komentáře a hodnocení

Vyjádřete se k úrovni dosažených hlavních výsledků závěrečné práce, např. k úrovni teoretických výsledků, nebo k úrovni a funkčnosti technického nebo programového vytvořeného řešení, publikačním výstupům, experimentální zručnosti apod.

Znalosti získané během rešerše student uplatnil v kapitole 6, kde se zabývá jednoduchým modelem emise bosonu fermionem se dvěma vůněmi. Po vzoru článku [69] je představen kvantový algoritmus pro simulaci tohoto procesu. Student algoritmus implementoval v prostředí Qiskit a provedl simulace pro tři volby síly míchání vůní fermionů. Byla pozorována změna rozdělení počtu vyzářených bosonů, která je způsobena interferencí kvantových trajektorií.

III. CELKOVÉ HODNOCENÍ, OTÁZKY K OBHAJOBĚ, NÁVRH KLASIFIKACE

Shrňte aspekty závěrečné práce, které nejvíce ovlivnily Vaše celkové hodnocení. Uveďte případné otázky, které by měl student zodpovědět při obhajobě závěrečné práce před komisí.

Předložená bakalářská práce zpracovává aktuální téma s aplikačním potenciálem. Bohužel, výsledný dojem z práce není příliš dobrý, především pro přílišnou stručnost a nepřesnosti v rešeršní části. K obhajobě práce mám na studenta následující dotazy:

- 1) Jak vypadá matice obecné jednoqubitové brány?
- 2) Jaká je náročnost Deutsch-Jozsova problému pro klasický počítač, pokud bychom uvažovali pravděpodobnostní algoritmus, tj. tolerovali chybu menší než zvolené epsilon?
- 3) Strana 20 – „Nově se k tomuto zpracování začíná využívat i grafické neurální sítě (Graphical Neural Networks v angličtině), které vykazují lineární zrychlení.“ – Co myslíte pod pojmem lineární zrychlení?

Předloženou závěrečnou práci hodnotím klasifikačním stupněm **D - uspokojivě**.

Datum: 16.1.2024

Podpis:

