

*Subatomic Physics, P-25*

Los Alamos National Laboratory  
PO Box 1663, MS H846  
Los Alamos, NM 87545

## OPONENTSKÝ POSUDEK BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

*Oponent práce:* Dr. Ing. Jana Crkovská

*Autor práce:* Jakub Češka

*Název práce:* Fyzika těžkých kvarků v jádro-jaderných srážkách

Cílem této bakalářské práce bylo seznámení studenta s tematikou fyziky těžkých kvarků a jejich využití pro studium produkce kvark-gluonového plazmatu. Práce sestává z šesti kapitol, jež následují strukturu navrženou v zadání práce. V poslední kapitole navíc autor popisuje výsledky vlastního originálního výzkumu týkajícího se multiplicitní závislosti produkce bottomonií v experimentu STAR.

V první kapitole autor podává stručný úvod do Standardního Modelu, definuje veličiny typické pro částicovou fyziku a popisuje problematiku jaderných srážek. V druhé kapitole se blíže věnuje kvark-gluonovému plazmatu a jeho typickým známkám projevu, mezi nimiž zmiňuje potlačení produkce kvarkonií.

Kvarkoniím se autor blíže věnuje ve třetí kapitole. Zde vysvětluje nejvýznamnější teoretické modely popisující produkci okamžitých kvarkonií. Kapitola je stručná, na bakalářskou práci jde o dostatečně hluboké zpracování. Je škoda, že autor se věnuje výhradně bottomoniím, ačkoliv pro charmonia podléhající stejné fyzice existuje více výsledků, což by velmi prospělo diskusi v následujících kapitolách. U obrázků neodpovídá pořadí odkazů v textu jejich uspořádání. Na Obrázek 3.2 zcela chybí v textu odkaz, Obrázek 3.4 v odevzdané verzi práce chybí. Také bych uvítala ukázkou srovnání produkčních modelů s daty.

Ve čtvrté kapitole je uveden urychlovač RHIC a přehledně popsán experiment STAR. Kapitola je v rozsahu očekávatelného u práce zabývající se simulacemi.

Pátá kapitola má za cíl shrnutí aktuálních výsledků měření kvarkonií, tedy jak charmonií tak bottomonií. Autor zde mylně píše, že měřením kvarkonií na LHC se zabývají pouze ALICE, ATLAS a CMS. Ve skutečnosti LHCb také měří kvarkonia v pp, pPb, periferních a ultraperiferních PbPb srážkách. S ohledem na množství existujících a vyobrazených výsledků je tato kapitola velmi krátká. Na této kapitole je patrné, že byla sepsána velmi narychlo. Část 5.1 cílící na výsledky z RHIC je napsaná velmi zmatečně, ukázané výsledky nejsou diskutovány a použité obrázky nejsou dostatečně popsány. V práci nepadne ani zmínka o důležitosti měření jaderného modifikačního faktoru v proton(deuteron)-jaderných srážkách, ačkoliv jsou výsledky těchto měření v kapitole zahrnuty. V části 5.2 jsou popisovány výsledky z LHC, uvedeny jsou pouze měření z CMS jakožto experimentu majícího nejvíce výsledků pro bottomonia z PbPb srážek. Stejně výhrady jako pro část 5.1 platí i tady. V této části je nejvíce cítit absence diskuse charmoniových výsledků. Pro LHC existuje poměrně dost výsledků

měření relativního výtěžku  $J/\psi$  na relativní multiplicitě v různých rapiditních kombinacích, přičemž jediné výsledky beroucí v potaz skutečnou multiplicitu nabitých částic, nikoliv pouze počet zrekonstruovaných nabitých drah (což je veličina závislá na detektorových efektech) jsou z ALICE. Vzhledem k podobnosti efektů ovlivňujících charmonia a bottomonia jsou tyto výsledky vysoce relevantní.

Šestá a poslední kapitola pak obsahuje výsledky studentovy práce na simulacích produkce těžkých kvarků, konkrétně  $b$  kvarků, v proton-protonových srážkách na urychlovači RHIC. V části 6.1 autor detailně popisuje použité Monte Carlo generátory. V 6.2 autor vysvětluje rozdíly mezi použitými modely a předkládá použité parametry. Část 6.3 obsahuje metodiku a samotné výsledky studie, kde autor srovnává své výsledky s předběžnými daty ze STARu. V textu jsou nesprávně definovány „minimum bias“ události. Správnou definicí je, že jde o události zaznamenanou za použití nejméně selektivních triggerů (ideálně se počítají všechny srážky). Co autor popisuje je tzv. „underlying event“ (základní událost), což je měkká komponenta události, v kontrastu s kvarkoniem, které patří do tvrdé komponenty události.

Práce je psána kultivovaným jazykem, najde se zde několik překlepů, jejichž množství odpovídá délce textu. Nicméně jsou v práci často použity zkratky či cizojazyčné termíny bez vysvětlení a překladu. Některé symboly nebo názvy jsou v textu použity vícekrát, ale vysvětlení významu čtenář nalezne až při jejich druhém či pozdějším použití (např. škála QCD  $\lambda_{QCD}$  je poprvé použito v části 1.4.3, o jakou veličinu jde se však dozvídáme až v 2.2, o PYTHIA STAR Heavy Flavor tune se nedozvíme v relevantní kapitole 6, nýbrž v samém závěru práce). Citace internetových stránek neodpovídají normám. Citace modelů PYTHIA a HERWIG chybně uvádějí webové odkazy namísto publikací (správně pro PYTHIA 8.2 Torbjörn Sjöstrand *et al.*, Comput. Phys. Commun. 191 (2015) 159-177 a pro HERWIG 7 Johannes Bellm *et al.*, Eur. Phys. J. C 76 (2016) no.4, 196).

Naopak je třeba vyzdvihnout skutečnost, že práce obsahuje výsledky studentova vlastního výzkumu. Je patrné, že autor své práci dobře rozumí. Dobře popisuje použité metody a na srovnání multiplicitních distribucí vysvětluje výběr parametrů použitých pro další studium. Autor porovnává simulované relativní výtěžky s předběžnými daty ze STARu. Odvedená práce je vysoké kvality, což dokládá i přijetí výsledků k prezentaci na prestižní konferenci ICHEP 2020.

K práci mám několik doplňujících otázek:

1. Může autor lépe vysvětlit regeneraci kvarkonií? Jde o důležitý proces z hlediska STARu?
2. V části 5.1 jsou zmíněné „CNM“, může autor vysvětlit, co tím myslí? Jaké efekty ovlivňující kvarkonia jsou uvažovány?
3. Obrázek 5.4 ukazuje multiplicitní závislost relativního výtěžku  $\Upsilon(1S)$  z dat protonových ze STARu. Obdobná studie existuje pro  $J/\psi$ . Jak se korelace těchto veličin, relativního výtěžku a relativní multiplicity, vyvíjí s energií srážek?
4. Na obrázku 5.8 autor ukazuje výsledky z CMS srovnávající závislost relativního výtěžku  $\Upsilon(1S)$  v centrální rapiditě na relativním počtu drah nabitých částic, také v centrálním regionu. Ve studii je však uvedeno i jiné měření, a to závislost centrálních

$\Upsilon$  na aktivitě události měřené v dopředné rapiditě. Může autor okomentovat rozdíly mezi oběma výsledky? Proč nelze tyto výsledky porovnat s teorií?

5. Obrázek 5.8 porovnává měření v pp, pPb a PbPb. Jak autor vysvětlí rozdíly mezi těmito třemi měřeními?

Bakalářskou práci navrhuji hodnotit stupněm **B** (velmi dobře).

20. srpna 2020

Jana Crkovská