

## Oponentský posudek disertační práce

Ing. Miroslav Šimko

### Study of Heavy Flavor at the STAR Experiment

Posuzovaná práce se zabývá měřením produkce baryonu  $\Lambda_c$  v ultra-relativistických srážkách jader atomů zlata při těžišťové energii 200 GeV na nukleon-nukleonový pár v experimentu STAR na urychlovači RHIC v Brookhaven National Laboratory, USA. Měření tohoto krátce žijícího baryonu bylo umožněno díky novému dráhovému detektoru, tzv. Heavy Flavor Tracker (HFT), který byl instalován mezi léty 2014 a 2016. Na tomto urychlovači se jedná o vůbec první měření produkce baryonu obsahujícího c-kvark. Tento kvark díky své vysoké hmotnosti vzniká primárně v raných fázích srážky jader. Spolu s měřením  $D^0$  mezonu tak toto měření přináší nové informace o formování hadronů v kvark-gluonovém plazmatu. Může objasnit, jakou roli hraje při hadronizaci v tomto hustém prostředí tzv. koalescence. V kontrastu s koalescencí, hadronizace v proton-protonových srážkách probíhá tvorbou párů barva-antibarva ve vakuu. Předkládaná práce je tak velmi aktuální s významným dopadem na rozvoj obor.

Disertační práce je standardně členěna. První kapitola je věnována silným interakcím a fyzice kvark gluonové plasmy. Následuje pak přehled fenomenologie a nejnovějších experimentálních výsledků v oblasti produkce těžkých kvarků v relativistických srážkách jader. Obě kapitoly jsou velmi pěkně a srozumitelně zpracovány. Jsou zde jen drobná opomenutí nebo nepřesné formulace. Např. na straně 14 autor uvádí, že vůně je kvantové číslo. To je nepřesná zkratka, kvantová čísla jsou podivnost  $S$ , půvab  $C$ , apod., ne samotná vůně. Dále na straně 15 autor opomenul zmínit, že top kvark byl také objeven experimentem CDF a ne jen  $D_0$ , dokonce první evidence pocházela právě z experimentu CDF. Stejně tak mi přijde poznámka na straně 14 o neočekávanosti objevu  $J/\Psi$  v roce 1974 jako příliš zjednodušující, historie tohoto objevu je mnohem bohatší. Někteří teoretikové, jako Glashow, v roce 1974 doporučovali hledat mezony s c kvarkem v rozpadech na koany a piony. Překvapivá byla rozhodně velmi malá rozpadová šířka a samotný způsob objevu. K části týkající se fenomenologie produkce těžkých kvarků mám jen poznámku ohledně koalescenčních modelů hadronizace. Vzhledem k tomu, že jedna z hlavních motivací presentovaného měření je právě potvrzení role tohoto mechanismus při hadronizaci kvark-gluonové plasmy, by si vysvětlení koalescenčních modelů zasloužilo víc prostoru.

Kapitola 3 popisuje aparaturu experimentu STAR. Důraz je kladen na popis nového dráhového detektoru HFT, který hrál klíčovou roli při rekonstrukci  $\Lambda_c$  baryonů, včetně detailního popisu HFT pomalých simulací a jejich porovnání s daty, což byl jeden z hlavních hardwarových příspěvků Miroslava Šimka k experimentu STAR. Dále je více prostoru věnováno kalorimetru ZDC (Zero Degree Calorimeter). Autor práce v letech 2015-2019 odpovídal za provoz, údržbu a kalibraci tohoto detektoru. K této kapitole mám poznámku ohledně Vertex-Position Detector (VPD). Slušelo by se zde jednou větou vysvětlit princip měření pozice vertexu, tj. jak je informace o čase přiletů jednotlivých pionů převedena do polohy vertexu. Pro udávanou přesnost 1cm vychází potřebné časové rozlišení na úrovni 50ps. Jak je této přesnosti dosaženo?

Kapitola 4 obsahuje vlastní popis měření produkce  $\Lambda_c$  v Au+Au srážkách. Díky velmi krátké době života, odpovídající dráze letu 60  $\mu\text{m}$ , je identifikace těchto hadronů a rekonstrukce jejich rozpadů experimentálně velmi náročná. Po hardwarové stránce byla umožněna díky instalaci dráhového

detektoru HFT umístěného co nejbliž k interakčnímu bodu. Analýza dat je založena na pokročilých metodách zpracování dat, na tzv. boosted decision trees. Obrázek 4.11 přesvědčivě dokumentuje zvýšenou statistickou signifikanci oproti tradiční analýze založené na pravoúhlých výběrových kritériích ve vícedimensionálním prostoru. Samotné měření je robustní s dobře propracovanou metodikou, což je u experimentálních výsledků v oblasti částicové fyziky standard. Ještě před zasláním článku k publikaci prošlo měření několika stupňovou vnitřní kontrolou v rámci experimentu STAR. Měření produkce  $\Lambda_c$  baryonů je tak týmovou prací užší skupiny, tzv. primárních autorů, kteří provedli vlastní měření. Miroslav Šimko je jedním z těchto primárních autorů. Svůj podíl na analýze specifikuje na začátku práce: provedl nezávislý test rekonstrukce  $\Lambda_c$  baryonů, analyzoval rozdíly v produkci  $\Lambda_c^+$  baryonů a příslušných antičástic  $\Lambda_c^-$  a vyvinul metodu pro odečtení kombinatorického pozadí založenou na míchání částic z různých srážek jader. Tento podíl, spolu s prací na simulacích detektoru HFT a práci na provozu a kalibraci ZDC, hodnotím jako výrazný. K vlastní analýze mám několik otázek, které jsou připojeny na konec tohoto hodnocení.

Kapitola 5 obsahuje výsledky práce, nejen vlastní měření produkce  $\Lambda_c$  baryonů ale také kombinaci s předchozím měřením produkce mesonu  $D^0$  ve formě měření poměru baryonové a mesonové produkce. Kladně hodnotím také analýzu dat ve vztahu k různým modelům hadronizace, včetně modelů zahrnujících kolektivní jevy a koalescenci. Nepochopil jsem, proč se kapitola 5.2 nazývá účinný průřez, výsledky v ní presentované odpovídají dle popisu v tabulce 5.1 relativní četnosti produkce.

Práce je doplněna o krátké shrnutí a dále o autorovy výstupy na konferencích (dva postery a 2 proceedings) a o článek experimentu STAR publikovaný ve Physical Review Letters 124, 172301 (2020), který obsahuje presentované výsledky.

Práce je psána srozumitelnou a čtivou angličtinou s minimem překlepů. I po grafické stránce dosahuje výborné úrovně. Je zde minimum překlepů a chyb, většinou drobné povahy. Některé chyby ztěžují čitelnost textu. Mezi nejvýraznější patří: obr. 4.22, který je identický s obr. 4.20 (místo rozdělení pro piony jsou uvedena znovu rozdělení pro protony); v popisu systematických chyb se na str. 135 nedozvíme s čím je korelována chyba spjatá s MC closure; jednotky v tab. 5.1 mají být u četnosti produkce  $\text{GeV}^{-2}$  (to je obzvláště matoucí ve spojitosti s již zmiňovaným nadpisem kapitoly – účinný průřez); odkaz na obr. 2.9 na str. 42 má být zřejmě na obr. 2.8; odkaz na obr. 4.2 na str. 91 má být odkazem na tabulku; nebo na str. 37 je uvedeno, že se  $\Lambda$  baryon skládá z kvarků suu místo sud.

Uvedené nepřesnosti nemají vliv na vynikající experimentální výsledky obdržené autorem. Celkově hodnotím práci jako velmi kvalitní. Mám jen několik upřesňujících otázek přiložených k tomuto posudku. Dle mého názoru autor plně prokázal, že je schopen samostatně vědecky pracovat v náročném prostředí velkého mezinárodního experimentu a hodnotně přispět k jeho vědeckému programu. Získané výsledky jsou na špičkové mezinárodní úrovni a o jejich kvalitě svědčí to, že byly publikovány v tak prestižním periodiku jako je Physical Review Letters. Předloženou disertační práci doporučuji ke schválení a dále doporučuji, aby ing. Miroslav Šimko obdržel po zodpovězení následujících otázek a úspěšné obhajobě titul PhD.

V Praze, 1. března 2021

doc. Alexander Kupčo, Ph.D.

## Otázky k obhajobě

- V rovnici (3.5) je uvedeno, že typická hodnota exponentu je 4,2 – zatím co všechny presentované výsledky na obr. 3.21 mají výrazně větší hodnotu (typicky 5,0). Jde v rovnici (3.5) o překlep?
- Strana 105. Je opravdu možné z pěti případů vyrobit jen 12 kombinací? Proč musí být proton jen z EVT0 na obr. 4.12? Pokud povolím, aby byl i z dalších případů, dostanu celkem 60 kombinací.
- K metodě míchání případů. Nebylo by možné pro zvýšení statistické přesnosti kromě mixování případů se správnými náboji použít i mixování případů se špatnými náboji?
- Počet  $\Lambda_c$  je určen z dat prostým odečtením fitovaného pozadí v daném okně. Jsou získané četnosti konzistentní s četnostmi určenými z Gaussovského fitu signálu?
- Obr. 4.39. Je pozorovaný rozdíl v rekonstrukci kladných a záporných částic způsoben různou efektivitou HFT detektoru? Nemůže být příčina hlubší? Např. missalignment nebo špatná kalibrace?
- Obr. 4.42 znázorňuje tři různá pT spectra použitá pro odhad systematicky. Jsou všechna konzistentní s naměřeným spektrem? Pokud ne, proč jste je nevyloučily a nezlepšili tak systematickou chybu měření?
- Tab. 4.4 uvádí systematiku BDT kritéria na úrovni 14%. Z obr. 4.38 bych ji však odhadl na úrovni kolem 23%. V uváděném intervalu +-50% (str. 123/124) je posun na úrovni  $0,02 \times 10^{-3}$ , což je cca 23% naměřené hodnoty při nominálním BDT cutu (při  $BDT=0,33$  vypadá naměřená hodnota na úrovni  $0,087 \times 10^{-3}$ ). Můžete vysvětlit, jak se z obr. 4.38 došlo k oněm výsledným 13.6%?
- MC closure je jedna z dominantních chyb v tab. 4.4. V textu jsem nenašel vysvětlení, jak byla tato chyba určena.
- Kapitola 5.4, pT integrovaný podíl. Je opravdu rozumné snažit se ze tří měřených hodnot určit celkový integrál a to ještě v případě, kdy různé modely predikují naprosto rozdílné závislosti na pT, viz obr. 5.2? Ostatně už sama chyba spjata s extrapolací je na úrovni poloviny změřené hodnoty.
- Na závěr trochu provokativní otázka. Obr. 2.13 v kapitole 2.7.3. indikuje, že podílu produkce  $\Lambda_c/D^0$  nerozumíme ani ve srážkách p+p a p+Pb. Není pak odvážné činit z naměřených dat závěry ohledně koalescence (viz obr. 5.2)?