

Posudek oponenta disertační práce

Doktorand: **Mgr. Radim Slovák**

Název práce: **Study of jet fragmentation and inclusive jet production in heavy-ion collisions with the ATLAS experiment**

Disertační práce pana Radima Slováka je věnována studiu vlastností jetů v proton-protonových (pp) a jádro-jaderných srážkách v experimentu ATLAS na urychlovači LHC v CERN. Studium produkce jetů v jádro-jaderných srážkách a určení míry jejich modifikace horkou a hustou jadernou hmotou vůči jejich produkci ve srážkách protonů je citlivou sondou, která umožňuje získat detailní informace o jaderné hmotě vznikající v jádro-jaderných srážkách na urychlovači LHC. Jedná se o velmi aktuální fyzikální problematiku, a to nejen po stránce experimentální, ale také z hlediska fenomenologických výpočtů zabývajících se průchodem partonů horkou a hustou jadernou hmotou. Autor se v disertační práci konkrétně věnuje dvěma tématům týkajících se vlastností jetů: měření výtěžku a jaderného modifikačního faktoru inkluzivních jetů a měření jetových fragmentačních funkcí s cílem studovat detailněji efekt zhášení jetů (tzv. „jet quenching“) v jaderné hmotě vznikající v ultrarelativistických Pb+Pb srážkách při energiích jednotek TeV na nukleonový pár v těžišťové soustavě dosažitelných na urychlovači LHC v CERN.

Disertační práce je rozdělena na úvod následovaný šesti samostatnými kapitolami a závěr. Po krátkém úvodu motivujícím samotnou disertační práci a blíže specifikujícím vlastní vklad autora k výsledkům prezentovaným v jádru disertační práce, je v první kapitole podán stručný teoretický úvod do problematiky silné interakce, jetů a základních proměnných, které jsou v práci studovány včetně popisu určení centrality v jádro-jaderných srážkách. Druhá kapitola je věnována popisu experimentu ATLAS a jeho jednotlivých detektorů a jsou zde také zmíněny základní charakteristiky dalších dvou experimentů na urychlovači LHC – experimentu CMS a experimentu ALICE. Třetí kapitola shrnuje rekonstrukci jetů v experimentu ATLAS v obdobích sběru dat v tzv. Run1 a Run2 na LHC a zahrnuje diskusi určení efektivity rekonstrukce jetů, energetického rozlišení jetů a energetické škály. Jádro samotné disertační práce obsahující originální fyzikální výsledky je tvořeno čtvrtou a pátou kapitolou. Ve čtvrté kapitole je diskutována analýza fragmentace jetů zahrnující všechny potřebné korekce a určení systematických chyb nezbytných k získání fragmentačních funkcí jetů prezentovaných v závislosti na příčné hybnosti konstituentu jetu, $D(p_T)$, resp. longitudinální frakci hybnosti, $D(z)$, v závěru této kapitoly. Tyto distribuce jsou prezentovány v závislosti na rapiditě a centralitě Pb+Pb srážky a jsou porovnány s referencí změřenou v pp srážkách a vyjádřeny relativně vůči ní ve formě „jaderných modifikačních faktorů“ $R_{D(p_T)}$ a $R_{D(z)}$ a dále blíže kvantifikovány také ve formě proměnných N^{ch} a P_T^{ch} . V následující, páté kapitole se autor věnuje měření inkluzivních spekter jetů a studiu odpovídajících jaderných modifikačních faktorů (R_{AA}), které jsou opět diskutovány od nekorigovaných hodnot až po hodnoty plně korigované na detektorové efekty a pozadí a představující již tak veličiny přímo srovnatelné s teoretickými modely jádro-jaderných srážek. V šesté kapitole je podán souhrn existujících měření fragmentačních funkcí a jaderných modifikačních faktorů inkluzivních

spekter jetů měřených dříve kolaborací ATLAS, ale také experimenty CMS a ALICE. Disertační práce je završena závěrem stručně shrnujícím dosažené fyzikální výsledky.

Práce je logicky dobře členěna a je napsána vcelku přehledně, i když dle mého názoru by shrnutí již existujících výsledků studia fragmentačních funkcí a jaderných modifikačních faktorů jetů bylo vhodnější zařadit do první kapitoly disertace, aby čtenář nejprve získal přehled, co již změřeno bylo a viděl, jak výsledky disertační práce tato měření posouvají dále (např. Obr. 5.2. v páté kapitole porovnává starší měření kolaborace ATLAS s měřením provedeným p. Slovákem, avšak s tímto starším měřením je čtenář blíže seznámen až v Kapitole 6.2). Domnívám se, že samotná struktura první kapitoly by se také dala vylepšit. Diskusi o zhášení jetů na základě vlastností jaderného modifikačního faktoru (Kap. 1.3) by bylo vhodnější umístit až za diskusi toho, co je to centralita jaderné srážky (Kap. 1.4 a Kap. 1.5) a jak je jaderný modifikační faktor vůbec definován (Kap. 1.7).

Po jazykové stránce je práce napsána relativně dobrou angličtinou a obsahuje akceptovatelné množství překlepů. Dovolím si také upozornit, že u některých obrázků zcela chybí popisky (Obr. 3.1, Obr. 3.5) nebo chybí veličina vynesena na ose y či ose x (Obr. 5.6 – 5.8, 5. 11, 5.19 vpravo). U Obr. 4.5 vzhledem k tomu, že je v logaritmické škále, by bylo dobré ještě nakreslit i poměr obou distribucí v lineární škále. U hodnot v Tab. 5.3 a 5.4 by měl být počet platných číslic uveden na dvě a v Tab. 4.4. by měly být doplněny chyby určení počtu participantů N_{part} , stejně jako jsou uvedeny u této veličiny v Tab. 5.3. V neposlední řadě by bylo také dobré držet se jednoho stylu psaní referencí.

Z obsahu disertační práce je ale jasně patrné, že pan Slovák odvedl veliký kus práce a dosáhl velmi cenných a originálních fyzikálních výsledků, čímž prokázal, že je schopen samostatné vědecké práce. Své výsledky také prezentoval na velkých mezinárodních konferencích v oboru a jeho výsledky jsou či v blízké budoucnosti budou součástí impaktovaných publikací kolaborace ATLAS. K obsahu předkládané disertační práce mám pár věcných připomínek.

1. V Obr. 1.3 vpravo a na něj navazující diskusi v textu je naprosto stěžejní uvést rozsah příčné hybnosti, pro kterou bylo toto měření provedeno, neboť toto tzv. úplné zhášení jetů (vymizení korelačního píku při $\Delta\phi = \pi$) je pozorováno pouze v určitém intervalu příčných hybností.
2. Na str. 33 a 34 je diskutována JES („jet energy scale“) a efektivita rekonstrukce jetů a text je doplněn obrázky Obr. 3.4 a Obr. 3.5 (u posledně zmíněného naprosto chybí popis, jak je již uvedeno výše). V textu se autor odvolává na to, že by v Obr. 3.5 měl být vynesena závislost výtěžek jetů v závislosti na azimutálním úhlu, ale také JES či v neposlední řadě efektivita rekonstrukce jetů. Z dostupných obrázků se však jeví, že dva obrázky musely z disertace zřejmě omylem vypadnout, neboť Obr. 3.5 obsahuje pouze jeden panel.

K disertační práci mám také několik dotazů a uvítala bych, kdyby byly tyto dotazy panem Slovákem v průběhu obhajoby disertační práce zodpovězeny.

1. Na straně 30 v Kapitole 3.2 je uvedeno, že aplikovaná metoda odpočtu pozadí v Run2, která zahrnuje i 3. a 4. Fourierovskou komponentu anisotropického toku, vedla k vylepšení energetického rozlišení jetů oproti datům z Run1. Mohl byste prosím blíže diskutovat a kvantifikovat, o jak velké vylepšení se jedná oproti Run1?
2. Mohl byste prosím ukázat obrázky, které chybí na str. 33 a 34, viz můj komentář výše.
3. Na straně 40, Kapitola 4.3.1, je diskutováno, že z důvodu náhlého poklesu efektivity rekonstrukce nabitých částic o 20% v rapiditní oblasti $y=1.0-1.2$ byl tento interval rapidit vyloučen z další fyzikální analýzy. Je velikost této vyloučené oblasti skutečně dostatečná pro jety o velikosti $R=0.4$ (tj. nemůže stále docházet k tomu, že i např. v rapiditě $y=0.8$ nebo $y=1.4$ pro jety jejichž osa je např. poblíž $y=1.0$ či $y=1.2$ je pozice zrekonstruovaných jetů “posunuta” směrem k nižším, resp. vyšším rapiditám a také je podhodnocena jejich energie)?
4. Na straně 42 v souvislosti s Obr. 4.2 je diskutováno, že v Monte Carlo simulacích došlo k chybě v uchování všech členů kovarianční matice, což ovlivňuje chování efektivity rekonstrukce částic prezentované v Obr. 4.2. Jak moc složité by bylo Monte Carlo simulace předělat správně?
5. Na straně 47 je diskutován efekt kontaminace studovaných jetů b-jety a je uvedeno, že korekce na tuto kontaminaci je 0.9%, jak v centrálních, tak v periferálních Pb+Pb srážkách. Vykazuje tento korekční faktor nějakou závislost na energii jetu?
6. V Kapitole 5.2.2., ve které je diskutována dekonvoluce jetových spekter (tj. pouze dekonvoluce v jedné dimenzi), je zmíněno, že byla použita 1D Bayesovská dekonvoluce. Zkoušel jste v případě dekonvoluce v jedné dimenzi použít také jiné dostupné metody, které jsou běžně používány, např. SVD?
7. V dřívějších analýzách a publikacích kolaborace ATLAS pro Pb+Pb srážky při 2.76 TeV byly zveřejněny také hodnoty jaderných modifikačních faktorů pro jety začínající na 38 GeV/c, jak také diskutujete v Kap. 6.2. Tato oblast energií je velmi zajímavá právě v kontextu porozumění energetickým ztrátám partonů v jaderné hmotě. Navíc by se měření v této nižší energetické oblasti dostalo do překryvu s kinematickou škálou dostupnou na experimentu ALICE a umožnilo by tak vzájemnou kontrolu získaných výsledků a jejich návaznost. Z informací poskytnutých v Kapitole 5.1.1 se zdá, že experimentální data pro p_T jetů < 100 GeV existují i pro energii srážky 5.02 TeV, kterou jste se ve své analýze zabýval. Je nějaký důvod tato data pro $p_T < 100$ GeV neukazovat?
8. V textu disertační práce se objevují generátory POWHEG (v kontextu simulací) nebo také JEWEL a YaJEM (v kontextu fenomenologického popisu Pb+Pb srážek a energetických ztrát partonů v jaderném médiu). Mohl byste stručně nastínit na čem jsou uvedené modely založeny?

9. V samotném závěru disertace se zmiňujete o tom, že Vaše výsledky umožní precizní a detailní porovnání s teoretickými modely. Mohl byste alespoň stručně nastítnit, jaké další modely jste měl evt. na mysli (kromě již uvedených modelů JEWEL a YaJEM)?

Závěrem konstatuji, že pan Radim Slovák ve své disertační práci jasně prokázal, že je schopen samostatné vědecké práce na vysoké odborné úrovni a disertační práce i přes výše zmíněné připomínky a nedostatky splňuje podmínky kladené na udělení titulu Ph.D..

V Praze, dne 29. 8. 2017

**RNDr. Jana Bielčíková, Ph.D.
ÚJF AV ČR, v.v.i.**