

## Oponentský posudek doktorské práce Mgr. Petra Báčka **Studium srážek protonů a těžkých iontů v experimentu ATLAS na LHC**

Dizertační práce Mgr. Petra Báčka je věnována analýze spekter příčných hybností nabitých částic produkovaných ve srážkách Pb-Pb tak, jak je zaznamenal detektor ATLAS na urychlovači LHC v CERN. Předložená práce se skládá z 6 kapitol a jedné přílohy, přičemž příspěvek autora je podrobně uveden v 5. kapitole *Nuclear modification factor with the ATLAS detector* čítající však pouhých 30 stran. Celá práce je na můj vkus poměrně krátká, necelých 90 stran včetně citované literatury, a její lakoničnost popravdě škodí jak tématu práce, tak i vysoce kvalitním výsledkům v práci prezentovaným. Ty by si zasloužily poněkud větší diskuzi, srovnání s modelovými výpočty a též s podobnými měřeními z dalších experimentů na LHC. Výsledky dizertace uvedené v odstavci 5.1.12 *Results* jsou pouze prezentovány aniž by byly jakkoliv komentovány. V práci je dost chyb v anglické gramatice.

### Téma doktorské práce

Měření potlačení produkce vysokoenergetických hadronů a hadronových jetů patří v současné době do kategorie dvou všeobecně nejvíce uznávaných metod studia vlastností horké, husté a dekonfinované QCD hmoty produkované ve srážkách ultrarelativistických těžkých iontů<sup>1</sup>: *Panta Rhei of soft physics* a *Opaqueness of non-abelian plasma to hard probes*. Význam měření posledně jmenované signatury, tj. potlačení tvrdých sond, byl nedávno zesílen pochybnostmi o tom, zda-li ve srážkách těžkých iontů opravdu pozorujeme kolektivní radiální hydrodynamický tok<sup>2</sup>.

Konkrétní, všeobecně přijatou metodou kvantifikace potlačení produkce hadronů v jaderných srážkách je tzv. jaderný faktor potlačení  $R_{AA}$  definovaný v odstavci 2.5. Ten porovnává spektrum příčných hybností hadronů produkovaných v jádro-jaderných srážkách s obdobným spektrem ze srážek  $pp$ . Z důvodů normalizace je  $R_{AA}$  vztažen na jednu nukleon-nukleonovou srážku. V případě neexistence adekvátních dat z proton-protonových srážek se obvykle studuje poměr  $R_{CP}$  obdobně normalizovaných spekter ze srážek s danou centralitou vztažených ke srážkám periferním. Cílem předložené práce Mgr. Petra Báčka bylo poprvé v rámci kolaborace ATLAS doplnit dřívější měření  $R_{CP}$  o měření  $R_{AA}$  při téže těžišťové energii na nukleon-nukleonový pár. Dizertace je založena na publikaci G. Aad, *et al.* [ATLAS Collaboration]: *Measurement of charged-particle spectra in Pb+Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=2.76\text{TeV}$  with the ATLAS detector at the LHC*, JHEP 1509 (2015) 050 jejíž hlavním autorem je dizertant.

Všeobecně známým nedostatkem měření  $R_{AA}$  či  $R_{CP}$  hadronů je skutečnost, že ke své úplné interpretaci v rámci současných představ o průchodu vysokoenergetických partonů hustou a horkou jadernou hmotou vyžadují dobrou znalost procesu hadronizace těchto partonů v jaderném prostředí. Tímto nedostatkem netrpí studium analogických veličin pro jety, které umožňuje přímo kvantifikovat ztráty energetických partonů při průchodu horkou a hustou hmotou. Nevýhodou posledně jmenovaného přístupu je vysoká náročnost rekonstrukce jetů ve srážkách těžkých iontů<sup>3</sup>. Proto mne poněkud překvapuje, že ačkoliv je dizertant spoluautorem práce věnované potlačení produkce jetů (G. Aad, *et al.* [ATLAS Collaboration]: *Measurements of the Nuclear Modification Factor for Jets in Pb+Pb Collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=2.76\text{TeV}$  with the ATLAS Detector*, Phys. Rev. Lett. **114**, no. 7, 072302 (2015)) se (s výjimkou obr.45) nikde ve své práci s těmito měřeními nesnaží provést srovnání neřku-li diskutovat obě metody současně. Tento dojem neopraví ani

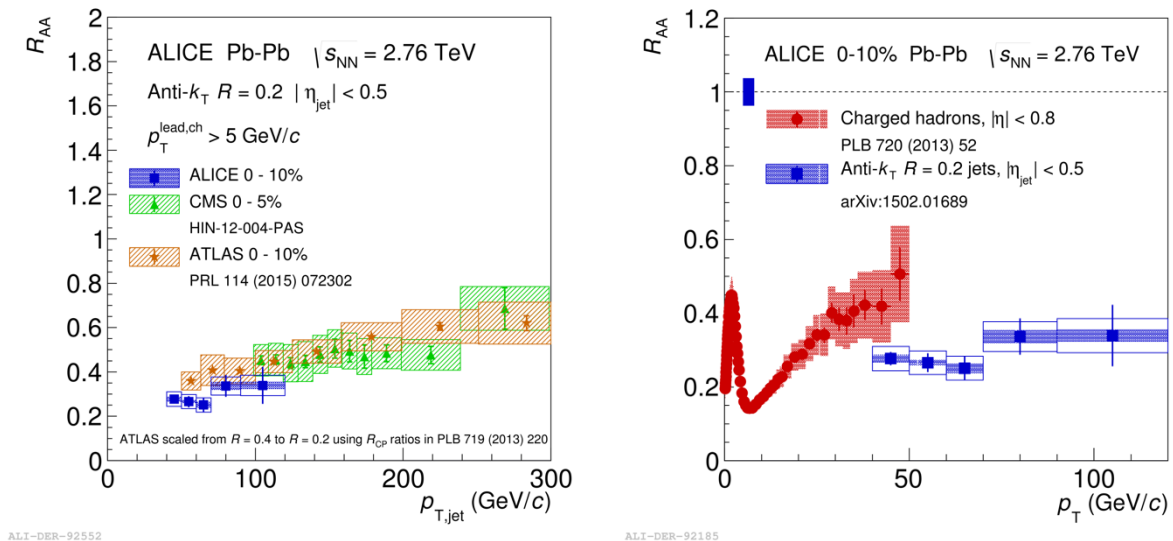
---

<sup>1</sup> U. A.Wiedemann: *Introductory Overview of Quark Matter 2012*, Nucl. Phys. A **904-905**, 3c (2013).

<sup>2</sup> P. Romatschke: *Collective flow without hydrodynamics: simulation results for relativistic ion collisions*, Eur. Phys. J. C **75**, no. 9, 429 (2015).

<sup>3</sup> G.O. V. de Barros, B. Fenton-Olsen, P. Jacobs and M.Ploskon: *Data-driven analysis methods for the measurement of reconstructed jets in heavy ion collisions at RHIC and LHC*, Nucl. Phys. A **910-911**, 314 (2013).

kompile vybraných výsledků měření  $R_{AA}$  nabitých hadronů z experimentů na urychlovačích SPS, RHIC a LHC uvedená v kapitole 4. Velmi bych proto uvítal. Kdyby mohl při své obhajobě prezentovat srovnání analogické níže uvedeným obrázkům.



### Metodika zpracování

Metodika zpracování odpovídá postupům používaným při řešení fyzikálního tématu, tedy analýze dat z experimentu ATLAS. Autor použil standardní metodiky používanou ve velkých kolaboracích, kdy měl k dispozici předzpracovaná experimentální a simulovaná data. Za výrazný autorův přínos považuji skutečnost, že sám analyzoval současně data ze srážek p-p i ze srážek Pb-Pb při energii  $\sqrt{s_{NN}}=2.76\text{TeV}$ . Výsledkem jsou inkluzivní spektra příčných hybností nabitých částic ze srážek Pb-Pb a p-p změřená stejnou metodikou v rekordním rozsahu 0.5-150 GeV/c a s lepší přesností nežli doposud. Podařilo se mu též velmi dobře se vypořádat se skutečností, že jím analyzovaná data byla získána za použití různých triggerů. Sloučení triggerovaných spekter do minimum bias spektra při splnění podmínky, že každá část spektra maximálně využívá dostupnou statistiku a současně je každá dráha nabitě částice použita pouze jednou, považuji za velmi náročný úkol.

K samotnému textu práce mám následující připomínky:

#### Kapitola 1:

- První věta v *Introduction*: *In collisions of heavy ions (HI), a hot and dense matter is produced. This matter is known as a quark-gluon plasma (QGP) because quarks and gluons become deconfined.* To neplatí o srážkách HI všeobecně, ale od jisté oblasti energií. Je kupříkladu známo, že signály QGP nebyly pozorovány ani na SIS či AGS a při energiích SPS to dodnes není zcela vyjasněno.
- Tamtéž o 15 řádků níže: *The charged-hadron yield is a product of QGP-affected jet yield and of QGP-affected jet fragmentation functions.* Toto je poněkud nešťastná formulace. Autor ignoruje skutečnost, že i při LHC energiích více než 90% částic vzniká v měkkých procesech.
- Není mi jasné proč autor nevymezil cíle své dizertace již v této úvodní kapitole a odložil jejich formulaci až na počátek 5. kapitoly.

#### Kapitola 2:

- *Quantum chromodynamics (QCD) describes strong NUCLEAR force which acts between quarks and gluons.* Jaderná síla, tj. síla působící mezi hadrony je pouze důsledkem sil QCD mezi kvarky a partony a představuje pouze jakési vyšší členy mutipólového rozvoje.

STRANA 13

Ve vztahu (2.29) není zmíněno, co je to x.

#### Kapitola 4:

- STRANA 26  
Fig. 13 a text odstavce 4.1.1 neuvádí, o jaká jádra se jedná.

#### Kapitola 5:

- *The jet trigger required a presence of a jet found with the anti-kt algorithm.*  
Lze tomu rozumět tak, že v experimentu ATLAS se používá anti- $k_t$  rekonstrukce jetů on-line? To asi ne.
- STRANA 45:  
*Leptons, coming from W and Z decays, are also considered to be secondary and are excluded from results as well; that will be also discussed later in this chapter.*  
Na téže straně o něco výše však píšete, že primární částice jsou také ty, které pocházejí z rozpadu matek s poločasem rozpadu  $\tau < 0.3 \times 10^{-10}$  s. Tuto podmínku ale leptony z rozpadu W a Z splňují také.
- V odstavci 5.9 uvádíte aniž byste to doložil, že rozdíly v efektivitě mezi kladnými a zápornými částicemi jsou malé. Mohl byste ukázat jejich porovnání?
- Z čeho vznikají píky v efektivitě na obrázku 39? Jedná se o místa s malou statistikou?
- Efektivita na Fig. 40 vykazuje pro PbPb data v oblasti  $p_T > 10$  GeV skok (0-5% centralita), který fit nereprodukuje. Vzhledem k tomu, že se tak děje ve více panelech, to asi není fluktuace. Je to zahrnuto v systematicce?
- Vzhledem k tomu, že provádíte analýzu strmě padajících spekter (Fig 41), měla by být provedena tzv. *bin shift korekce*. Ta bere v úvahu, že strmý tvar spektra v rámci binu posouvá měření v tomto binu blíže k levému okraji. Tedy pokud se rozhodnete malovat značku uprostřed binu, měl by se bod posunout o něco níže, než to normálně zobrazuje program root. Jak je to velká oprava ve Vašem případě?
- U obrázku Fig. 45 byste měl napsat, že to jsou tam výsledky týkající měření jetů zrekonstruovaných pomocí anti- $k_T$  algoritmu s poloměrem  $R = \dots$ ?. Pak by tam mělo být i uvedeno, kolik je  $\langle z \rangle$  hadronů, které mají  $60 < p_T < 95$  GeV/c a též srovnání s jety které mají  $60 < \langle z \rangle < p_T < 95 < \langle z \rangle$  GeV/c.

K práci, kterou až na její výše zmíněné výhrady, považuji za dobře vypracovanou mám ještě několik otázek:

1. Ačkoliv jste získal  $pp$  spektra nabitých hadronů v rekordním rozsahu  $p_T$  nikde je nesrovnáváte s pQCD výpočty. Můžete vysvětlit proč?
2. V kapitole 4 uvádíte přehled experimentálních výsledků týkajících se měření  $R_{AA}$ . Co nám tyto výsledky vypovídají o závislosti této veličiny od energie srážky? Lze z nich odvodit charakter energetických ztrát tvrdých partonů při energiích urychlovačů RHIC a LHC?
3. V odstavci 5.5.3. píšete: *High- $p_T$  tracks without the appropriate jet are very suspicious. They are very probably produced by low- $p_T$  particle, and they shall be rejected from the analysis.* Mám tomu rozumět tak, že měření hybnosti nabitých částic v experimentu ATLAS je natolik nepřesné, že částice s malou příčnou hybností vyhodnotí jako dráhu s velkým  $p_T$ ? Pakliže se jedná jen o překlep je nasnadě další otázka. Do jaké míry je výše zmíněný požadavek omezující pro skutečnou fyziku? Simulace uvedená na Fig. 26 umožňuje odpovědět na otázku, jaké je složení drah, které nesplňují kritérium  $E_T$  vs  $p_T$  tj. jaká část dobrých a falešných drah je tímto kritériem vyloučena.
4. V odstavci 5.5.3. se praví: *In the jet-triggered samples, for both Pb+Pb and pp collisions, the reconstructed jets are required to be matched within  $\Delta R = \Delta\phi^2 + \Delta\eta^2 < 0.4$  to a trigger jet, which were described earlier in sec. 5.1.1.* Vzhledem k tomu, že v případě jetového triggeru používáte několik spodních hranic pro  $p_T$ , zajímalo by mne, zda-li uplatňujete podmínku  $\Delta R = \Delta\phi^2 + \Delta\eta^2 < 0.4$  na všechny jety, které splňují podmínku nejnižšího omezení na  $p_T$ .
5. Formule (5.2): proč jsou zde zahrnuty i případy bez vrcholu a s nepárovými BCID ( $N_{vu}$ )? Předpokládám, že tyto případy nebyly zahrnuty do analýzy spekter.
6. Vzhledem k tomu, že Fig. 28 ukazuje i efektivitu i pro případy s jednou dráhou (1 track), mohl byste specifikovat, za jakých podmínek považujete vertex za zrekonstruovaný?

7. Fig. 32: Vysvětlete, proč mají dráhy nabitých částic v *PbPb* srážkách větší *Primary fraction* (tj. jinými slovy puritu), nežli je tomu v *pp* srážek? Vzhledem k podstatně větší multiplicitě v případě *PbPb* srážek, bych čekal, že i pravděpodobnost náhodného propojení segmentů drah je pro *PbPb* systém větší nežli pro *pp*.
8. V odstavci 5.7.2. píšete: *When comparing the fake spectra of different JX samples of Pb+Pb MC samples from 2011, shown in fig. 34, it can be seen that J1 and J2 are very close to each other even at very high  $p_T$ . This is an indication that the fake tracks in J1 and J2 samples are actually coming from the underlying events, common to all JX samples, not real fakes, i.e. random combinations of the hits.* Jakým způsobem určujete v embedovaných eventech, že se jedná o fake? Předpokládám, že se díváte pouze na dráhy, které obsahují nějaké segmenty/hity vytvořené embedovanou částicí. Do jaké míry se při odečítání spektra falešných drah z J1 od J2-J5, tato spektra neochuzují o "skutečné" falešné dráhy.
9. Fig. 22: Jak byly stanoveny systematické chyby vyznačené čarami?
10. Odstavec 5.8 *Bayes unfolding*: Proč jste nepoužil *unfolding SVD*? Jaké *prior spektrum* bylo při unfoldingu použito? Oprava na efektivitu rekonstrukce se v principu dá dělat i v rámci unfoldingu. Zkoušel jste, zda dostanete stejný výsledek, jako když to děláte odděleně? Měl byste též ukázat, že po přenásobení unfoldovaného spektra Vaší maticí odezvy dostanete vstupní spektrum (ovšem poněkud vyhlazené). Zkoušel jste to?
11. Můžete podrobněji diskutovat závislost  $R_{AA}$  na  $\langle N_{part} \rangle$  prezentované na obr. 44 a obr.45? Můžete provést srovnání s jinými experimenty?

Závěrem chci stručně shrnout, že předloženou doktorskou práci Mgr. Petra Báalka považuji za přesvědčivé svědectví samostatné vědecké práce kandidáta. Proto doporučuji, aby mu byl po úspěšné obhajobě udělen titul Ph.D.

V Praze 11.12. 2015

doc. Michal Šumbera, CSc., DSc.  
Ústav jaderné fyziky AV ČR v.v.i.