

Studium srážek protonů a těžkých iontů na LHC

Předmětem disertační práce Martina Rybáře je studium produkce jetů v srážkách těžkých iontů (Pb+Pb) pomocí detektoru ATLAS na urychlovači LHC v CERN. Produkce jetů slouží jako nástroj zkoumání vlastností nového stavu jaderné hmoty, kvark-gluonové plasmy. Jde především o efekty způsobené průchodem jetů tímto hustým a horkým médiem. Autor se ve své práci soustředil na změření produkce dvou úhlově blízkých jetů pocházejících ze stejné nukleon-nukleonové srážky a to v Pb+Pb srážkách při těžišťové energii $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV na jednu nukleon-nukleonovou srážku. Cílem práce je získat další experimentální data ohledně jevu *zhášení jetů* (jet quenching) pozorovaného v jaderných srážkách. Úhlově blízké jety procházejí přibližně stejným množstvím hustého média a data by tak mohla pomoci oddělit od sebe efekty fluktuací a různých délek drah při průchodu jety médiem. Jde také o první studii tohoto charakteru. Téma práce je tak aktuální a jedinečné a rozšiřuje předešlé práce experimentu ATLAS.

Práce je logicky členěna. V první části je představena detekční aparatura experimentu ATLAS. Pozitivně hodnotím jasnost popisu a to, že i přes relativní stručnost jsou zdurazněny hlavní vlastnosti detekční aparatury důležité pro prezentované měření. Myslím, že to svědčí o velmi dobrém experimentálním rozhledu autora.

Další kapitola je věnována základním aspektům teorie srážek těžkých iontů: kvantové chromodynamice, jetům, hydrodynamice srážek těžkých iontů a fenomenu zhášení jetu. Kapitola je opět velmi dobře napsána. Je zde ale hodně překlepů a dalších drobných chyb. Ty někdy zhoršují jasnost textu. DGLAP rovnice (3.10 a 3.11) postrádají díky chybějícím gluonovým distribučním funkcím smysl. Dále například koeficient u T^+ v rovnicích (3.18 a 3.19) by měl být $\frac{1}{10}$ dle odvození z (3.16 a 3.17).

Čtvrtá kapitola je věnována sumarizaci experimentálních výsledků týkajících se vlastností jetu ve srážkách těžkých iontů dosažených experimentem ATLAS. Je potěšitelné, že k mnohým těmto výsledkům autor přispěl a to včetně průlomového měření asymetrie v párové produkci jetu, tedy měření, ve kterém byl efekt zhášení jetů poprvé pozorován. Kapitola je opět výborně napsána. Z prezentovaných výsledků mě zaujalo měření struktury jetu (kapitola 5.2) a to obrázky 4.17 a 4.18. Značí chybové úsečky opravdu statistické chyby? Naivně mi přijde, že fluktuace mezi jednotlivými biny jsou mnohem menší.

Autorovo vlastní měření produkce blízkých jetů je prezentováno v 5. kapitole. Jde o velmi netriviální měření neboť součástí analýzy je odečtení kombinatorického pozadí obsahujícího náhodnou produkci jetů z jiných nukleon-nukleonových srážek, než ze které pocházel testovací jet. Toto pozadí je samozřejmě dominantní hlavně u centrálních srážek, kde přesahuje signál faktorem 6. Autor si je vědom, že je nutné toto pozadí velmi přesně určit, aby měření vůbec bylo možné a mělo smysl, a tomuto pozadí se věnuje s velkou pečlivostí. Základem je určení pozadí z dat nabraných minimum bias (MB) trigrem. Korekce je očištěna o vliv eliptického toku a také o vliv modifikace vlastností jetu díky přítomnosti blízkého testovacího jetu, který v MB datech chybí. Ze studia posledního efektu byla odhadnuta systematická chyba ve znalosti kombinatorického pozadí a to na úrovni 1,2% (ta se pak promítne do 8% chyby ve finálním měření).

Naivně mi přijde tato systematická chyba velmi nízká. Dovedu si představit několik dalších zdrojů, které by mohly mít obdobnou velikost. Např. kombinatorický příspěvek z MB dat definovaný v (5.3) by se měl, dle mého názoru, škálovat faktorem $(N_{int} - 1)/N_{int}$.

kde N_{int} je počet nukleon-nukleonových interakcí v jedné Pb+Pb srážce při dané centralitě. Důvod je ten, že se jedna interakce ve finálních datech spotřebovala na vytvoření testovacího jetu. Ještě při $N_{int} \sim 100$ to vede k 1% systematickému posunu korekce. Tento efekt navíc samozřejmě závisí na stupni centrality srážky a může vést k systematickému zkreslení finálního měření. V centrálních srážkách, kde počet kolizí přesahuje 1000, bude korekce minimální, ale např. v posledním binu s centralitou 40 – 80% s $N_{int} \sim 20$ bude dosahovat 5%, tedy několika násobně víc než uvedená systematika (zde však bude vliv na finální měření menší, protože kombinatorické pozadí je periferálních srážkách přirozeně menší). Při obhajobě bych uvítal kvantitativní odhad efektu.

Dalším zdrojem systematické chyby v určení kombinatorického pozadí může být zkreslení díky triggeru použitému pro nabránání jetových dat. Dodatečná podmínka triggeru může změnit charakter centrality. Autor si je toho vědom a MB data byla převážena tak, aby tok energie v dopředném kalorimetru odpovídal toku energie naměřeném v trigrovaných datech (obr. 5.16). Je však tato korekce dostačná? Protože jde o velmi jemný efekt, uvítal bych dodatečné ověření, např., že střední hodnota centrality v binu 0 – 10% je po převážení v minimum bias i jetovém souboru stejná. Dle obr. 5.26 stačí totiž drobná změna na úrovni 0.5%, aby indukovala systematiku kombinatorického pozadí na úrovni 1%.

Další otázkou je ovlivnění samotné definice centrality trigrem, tj. jestli se neposouvá samotná hodnota centrality definované tokem energie do dopředného detektoru při dodatečné podmínce triggeru. I zde bych očekával možné efekty. Vzhledem k dobrému popisu dat v MC, viz. obr. 4.1, by tato studie šlo provést na úrovni MC. Možná byla tato studie již provedena, odstavec 5.3.5 popisuje systematiku měření díky neurčitosti definice centrality. Není mi jasné, jestli ale byl zahrnut vliv této neurčitosti na nepřesnost v určení kombinatorického pozadí. Je v MB dostatečná statistika alespoň pro jety s menším p_T ? Tak by šel efekt určit přímo z dat.

Ze systematických chyb mě ještě zaujala nízká hodnota vlivu neznalosti energetického rozlišení jetů. Rozmytí energií jetů hraje dominantní roli při opravě dat na vliv detektoru, ta v některých bincích činí až 100% (obr. 5.25). Přesto je systematika v energetickém rozlišení na úrovni 1 – 2%. Tomu by pak musela odpovídat znalost energetického rozlišení jetů s relativní chybou na úrovni 1 – 2%, což mi naivně přijde velmi malé. Chápu, že autor aplikoval stejný postup, jako v případě pp srážek. Takové tvrzení, dle mého názoru, ale vyžaduje dodatečné podpůrné studie, obdobně jako prezentovaný obrázek 5.39 pro úhlové rozlišení. Dále bych uvítal v textu bližší vysvětlení přítomnosti členů $-\pi/2$ v rovnici (5.8).

Předložená práce je kvalitního charakteru, jak po stránce jazykové, tak i grafické. Drobnou kaňkou jsou jen časté překlepy. Uvedené dotazy a připomínky nejsou závažného charakteru a nic nemění na vysoké kvalitě autorova měření a množství odvedené mravenčí práce, bez které by toto měření nebylo možné. O vynikající kvalitě měření svědčí i to, že prošla připomínkovým kolaboračním řízením a výsledky byly prezentovány na konferencích. Stejně tak byl významný i autorův příspěvek k dalším pracem experimentu ATLAS zabývající se produkcí jetů ve srážkách těžkých iontů, především k průlomovému měření asymetrie v párové produkci jetů a první pozorování zhášení jetů. To vše svědčí o nesporných autorových experimentálních kvalitách. Předložená práce tak splňuje nároky kladené na disertaci a doporučuji udělit Martinovi Rybářovi po obhajobě disertace titul Ph.D.

V Praze, 5. ledna, 2015

Alexander Kupčo