



**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ  
FAKULTA**  
Univerzita Karlova

## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Vojtěch Zívr

# **Studium tvrdých procesů na LHC**

Ústav částicové a jaderné fyziky

Vedoucí bakalářské práce: doc. Mgr. Martin Spousta, Ph.D.

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Fyzika zaměřená na vzdělávání

Praha 2019

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V Praze dne 18.7.2019

Podpis autora

Velmi rád bych zde poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Mgr. Martinu Spoustovi, Ph.D. za jeho cenné rady, vstřícnost, ochotu a trpělivost při vedení mé bakalářské práce.

Název práce: Studium tvrdých procesů na LHC

Autor: Vojtěch Zívr

Ústav: Ústav částicové a jaderné fyziky

Vedoucí bakalářské práce: doc. Mgr. Martin Spousta, Ph.D.,

Abstrakt: Byly studovány srážky jader olova na LHC o energii srážky v soustavě spjaté s těžištěm 2760 GeV. Při takovýchto srážkách dochází ke vzniku kvark-gluonového plasmatu a jetů. Konkrétně byly studovány vlastnosti událostí dominovaných gluonovými a kvarkovými jety. Studována byla multiplicita, pseudorapidita a příčná hybnost. Při studiu byla zjištěna větší multiplicita v událostech dominovaných gluonovými jety, oproti jetům kvarkovým. Dále bylo zjištěno, že se tvoří více elektricky nabitých částic, než jejich nenabitých partnerů. Při zkoumání pseudorapidity došlo k zjištění, že částice v jetech mají nižší pseudorapiditu oproti pozadí. Naopak v rozdělení příčné hybnosti v závislosti na druhu hadronu nebyly pozorovány statisticky významné rozdíly.

Klíčová slova: tvrdé procesy, LHC, gluony, kvarky, jety

Title: Study of hard processes at the LHC

Author: Vojtěch Zívr

Institute: Institute of Particle and Nuclear physics

Supervisor: doc. Mgr. Martin Spousta, Ph.D.,

Abstract: There were studied PbPb collisions at a per-nucleon center-of-mass energy of 2760 GeV. Such collisions produce quark-gluon plasma and jets. Specifically, the properties of events dominated by gluon and quark jets were studied. The properties were multiplicity, pseudorapidity and transverse momentum. The study found greater multiplicity in events dominated by gluon jets, compared to quark jets. Furthermore, it was found that more electrically charged particles are formed than their electrically neutral partners. Examination of pseudorapidity revealed that particles in jets have lower pseudorapidity compared to background. In contrast, no statistically significant differences were observed in the distribution of transverse momentum depending on the type of hadron.

Keywords: hard processes, LHC, gluons, quarks, jets

# Obsah

Úvod	2
<b>1 Fyzikální pozadí</b>	<b>3</b>
1.1 Standardní model částic . . . . .	3
1.2 Kvark-gluonové plasma . . . . .	6
1.3 Srážky těžkých iontů . . . . .	6
1.4 Shášení jetů (jet quenching) . . . . .	6
<b>2 LHC a ATLAS</b>	<b>8</b>
2.1 Large Hadron Collider . . . . .	8
2.2 Detektory částic . . . . .	9
2.3 ATLAS . . . . .	10
2.3.1 Vnitřní detektor . . . . .	10
2.3.2 Kalorimetr . . . . .	11
2.3.3 Mionový spektrometr . . . . .	12
2.3.4 Systém magnetů . . . . .	12
<b>3 PYTHIA a generování srážek</b>	<b>13</b>
<b>4 Experimentální výsledky</b>	<b>15</b>
4.1 Multiplicita hadronů . . . . .	15
4.2 Pseudorapidita . . . . .	19
4.3 Příčné hybnosti . . . . .	22
<b>Závěr</b>	<b>29</b>
<b>Seznam použité literatury</b>	<b>30</b>
<b>Seznam obrázků</b>	<b>32</b>

# Úvod

Objektem této bakalářské práce bude zkoumání základních charakteristik gluonových a kvarkových jetů. Bude zkoumáno rozdělení multiplicit hadronů, rozdělení příčných hybností a pseudorapidity studované v závislosti na druhu jetu a v závislosti na druhu hadronu.

Při srážkách těžkých iontů na Velkém hadronovém urychlovači (Large Hadron Collider - LHC) dochází ke vzniku kvark-gluonového plasmatu, které obsahuje částice s barevným nábojem. Při srážkách těžkých iontů vznikají i jety, spršky částic zvaných hadrony, které vznikají procesem zvaným hadronizace. Zatímco jety jsou dobře popsány v rámci kvantové chromodynamiky, tedy fundamentální teorií popisující silnou interakci, hadronizace je popisována pouze fenomenologickými modely. Jety při průchodu kvark-gluonovým plasmatem s tímto plasmatem interagují, jelikož i jety obsahují částice barevně nabitě. Ze změn charakteristik jetů je možné vyčíst vlastnosti tohoto plasmatu. Tento jev se nazývá shášení jetů.

V určitých raných fázích vývoje vesmíru, ještě před vznikem hadronů a tedy i atomů, vesmír obsahoval hmotu podobnou právě kvark-gluonovému plasmatu. A proto pochopení chování a vlastností kvark-gluonového plasmatu, může napomoci při zkoumání vlastností vesmíru jen chvilku po jeho počátku. To pomůže prověřit současnou fyziku v těch nejextrémnějších případech.

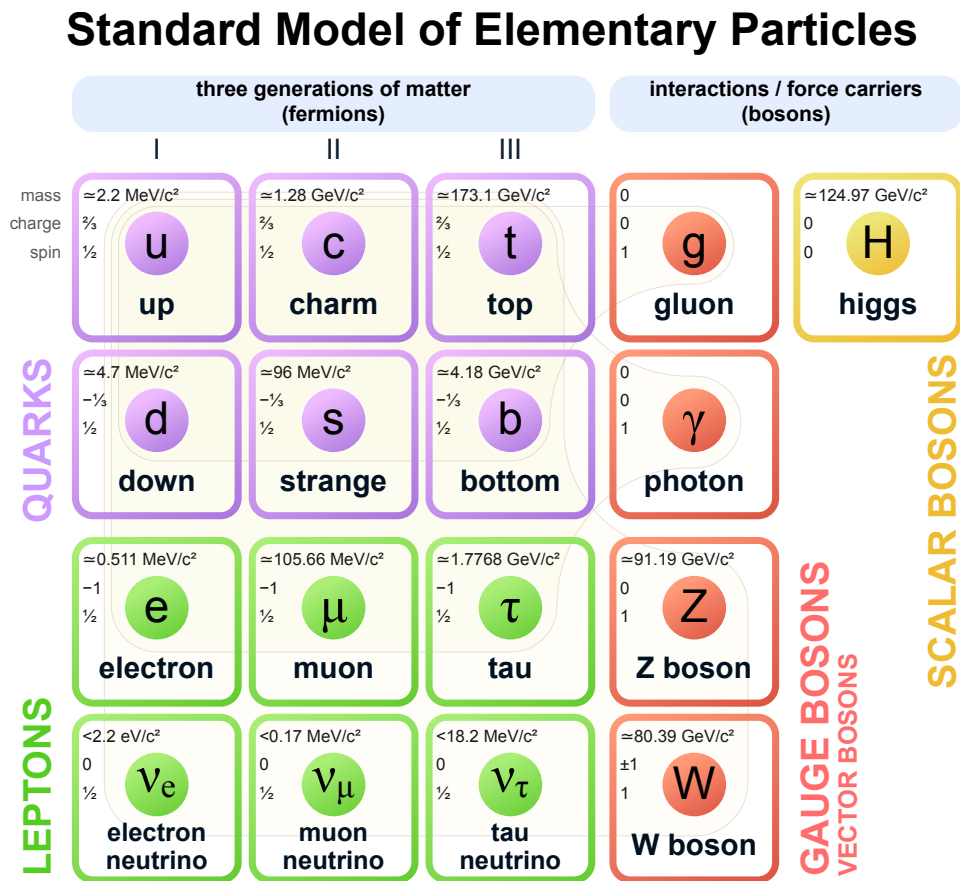
Dobré porozumění vlastnostem jetů je důležité i mimo studium srážek těžkých iontů, neboť jety jsou jedním ze základních nástrojů částicové fyziky na LHC.

Práce je uspořádána následovně. V kapitole 1 bude nastíněno fyzikální pozadí, v kapitole 2 je popsán Velký hadronový urychlovač a detektor ATLAS, kde jsou výše popsané jevy zkoumány. V kapitole 3 je popsáno základní nastavení programu použitého k simulování procesů. Nakonec v poslední kapitole 4 budou představeny a popsány výsledky samotného výzkumu.

# 1. Fyzikální pozadí

## 1.1 Standardní model částic

Všechny dnes známé přírodní jevy se vysvětlují pomocí základních čtyř interakcí - elektromagnetická, slabá jaderná síla, silná jaderná síla, gravitační [6]. Zatímco gravitační interakce je popisována pomocí obecné teorie relativity, která byla vytvořena Albertem Einsteinem v roce 1915, zbylé tři interakce jsou popisovány tzv. standardním modelem částic. Grafické znázornění modelu je na obrázku 1.1. Tento model předpokládá existenci několika elementárních částic, které můžeme rozdělit do dvou hlavních skupin podle velikosti spinu - fermiony a bosony.



Obrázek 1.1: Standardní model elementárních částic [3]

Spin je moment hybnosti, který částice má, přestože nevykonává žádný prostorový pohyb, tedy jakýsi vnitřní moment hybnosti. Tato veličina může nabývat buď poločíselného, nebo celočíselného násobku redukované Planckovy konstanty (konstanty pojmenované po jednom ze zakladatelů kvantové fyziky Maxovi Planckovi). Mají-li částice spin poločíselný, nazýváme je fermiony a pokud celočíselný, pak jsou nazývány bosony.

Elementární fermiony, též částice hmoty, pojmenované Paulem Diracem (fyzikovi známém pro svou rovnici spojující kvantovou mechaniku se speciální relativitou) po italském fyzikovi jménem Enrico Fermi. Fermiony se řídí Fermiho-Diracovým rozdělením a platí pro ně Pauliho vylučovací princip (dva identické fermiony nesmí být ve stejném kvantovém stavu). Vyskytují se ve třech generacích, kde generace se liší hmotnostmi. Navíc ke každé částici existuje i její antičástice (částice mající opačný náboj), které předpověděl výše zmíněný Paul Dirac. Páry částice a antičástice se mohou navzájem anihilovat a vyprodukovat bosony, částice definované dále v textu, z nichž nejznámější jsou fotony. Elementární fermiony se dále dělí na kvarky a leptony.

Leptony, jejichž název pochází z řečtiny a znamená lehká částice, nepodléhají silné jaderné síle a mají na rozdíl od kvarků celočíselný elektrický náboj. Mezi leptony patří nabitě částice elektron (1. generace), mion (2. generace) a tauon (3. generace). Dále k nim příslušné neutrální částice elektronové, mionové a tauonové neutrino.

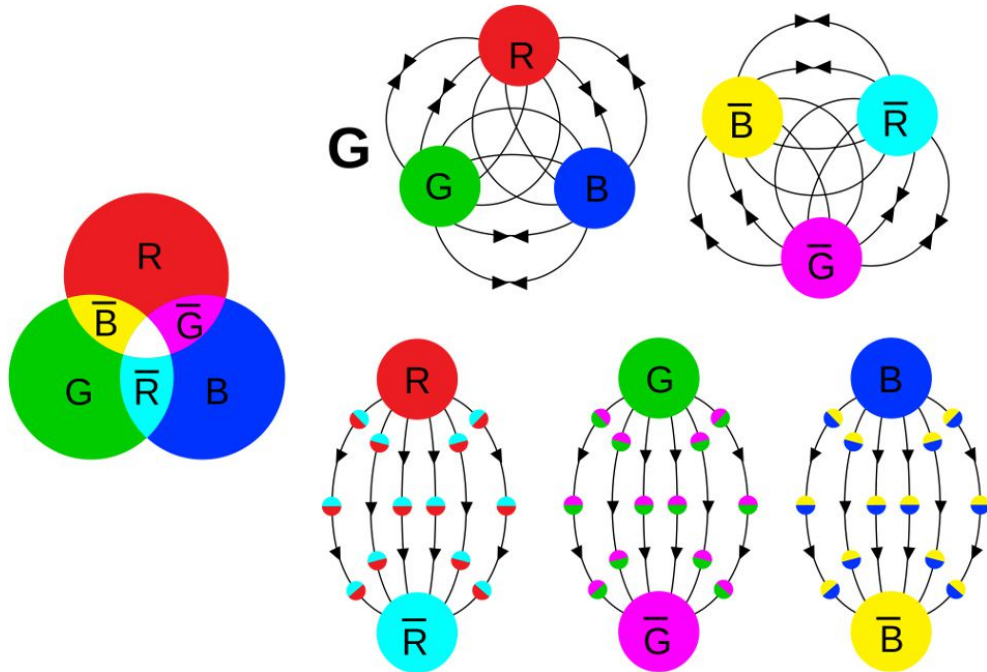
Druhou, a pro tuto práci podstatnější skupinou jsou kvarky. Kvarky byly navrženy nezávisle dvěma fyziky jmény Murray Gell-Mann a George Zweig v roce 1961. Experimentálně pak byla jejich existence potvrzena na přelomu šedesátých a sedmdesátých let minulého století v Stanford Linear Accelerator Center. Poslední a nejtěžší kvark (top kvark) byl pozorován roku 1995. Kvarky jsou elementární částice, které interagují všemi čtyřmi známými interakcemi a mají následující základní charakteristiky: elektrický náboj, hmotnost, spin, vůni (flavor), barvu (color). Vůně (flavor) odkazuje na druh elementární částice. Například u kvarků rozeznáváme šest druhů, neboli vůní (up, down, strange, charm, top, bottom).

Hlavní interakcí probíhající mezi kvarky je silná jaderná síla, která je zprostředkovávána pomocí gluonů a popisována pomocí kvantové chromodynamiky (QCD). Kvarky existují ve třech barvách (červená, zelená, modrá) a antikvarky mají k nim tři příslušné antibarvy. S barvami z naší každodenní zkušenosti však nemá tato barva žádnou spojitost, označení barva, popřípadě barevný náboj, se používá jen jako vhodná analogie. Grafické znázornění této analogie je možné vidět na obrázku 1.2.

První zajímavou vlastností QCD je tzv. barevné uvěznění (color confinement) [26], které diktuje fakt, že částice nemůže existovat volně, má-li některou z barev. Proto se kvarky seskupují dohromady a tvoří složené částice, protože složením všech tří barev (popřípadě antibarev) nebo složením barvy a antibarvy je dosaženo bezbarvosti. Jsou-li částice tvořeny kvarkem a antikvarkem s příslušnou barvou a antibarvou, říkáme takovým částicím mezony (např. piony, kaony). Jsou-li tvořeny ze tří kvarků různých barev, nazýváme je hadrony (např. protony, neutrony). Další vlastností QCD je asymptotická volnost (asymptotic freedom), která říká, že síla interakce asymptoticky slábne s klesající vzdáleností a rostoucí energií.

Další skupinou jsou bosony. Elementární částice mající celočíselný spin. Jsou to částice zajišťující interakce. Nejznámějším bosonem je foton, zajišťující elektromagnetickou interakci. Foton má nulovou klidovou hmotnost, proto se elektromagnetická interakce šíří rychlostí světla a na neomezenou vzdálenost. Moderní pohled na foton byl vyvinut na počátku minulého století například i Albertem Einsteinem, ale i dalšími vědci jako Max Planck, aby vysvětlil experimentální pozorování, které nezapadala do tehdejšího klasického vlnového modelu světla.





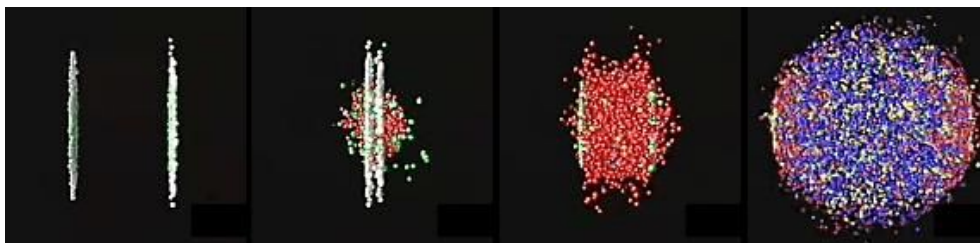
Obrázek 1.2: Grafické znázornění barevného náboje. Vlevo barvy označené R - červená, G - zelená, B - modrá, s pruhem označení antibarvy. Nahoře hadron (vlevo částice, vpravo antičástice). Dole tři možnosti jak barevně poskládat mezony. [2]

Takovým pozorováním byl například fotoelektrický jev, který byl vysvětlen tím, že fotony jsou nejen vlněním, ale i částicemi. Za vysvětlení tohoto jevu dostal roku 1921 Nobelovu cenu za fyziku.

Dalšími bosony jsou  $W^\pm$  a Z bosony, částice zprostředkující slabou interakci. Na rozdíl od fotonů nemají nulovou klidovou hmotnost a mají velmi krátký poločas života. Poločas života kratší než  $10^{-24}$  s a typický dosah  $10^{-18}$  m, což je asi tisícinu jádra. Odtud plyne i název jaderná, slabá pak proto, že je mnohokrát slabší než silná interakce. Silná jaderná interakce je pak zprostředkovávána pomocí již zmíněných gluonů. Pojmenování gluon pochází z anglického glue, neboli lepidlo, protože drží kvarky pohromadě a ty pak tvoří složené částice. Gluony se vyskytují v osmi barvách. Jelikož i sami nesou barevný náboj, mohou sami mezi sebou interagovat. Silnou interakci lze například přiblížit popisem, ve kterém jsou barevná pole omezená na objekty podobné struně. Energie této struny roste lineárně, a tedy po určité vzdálenosti je energetičtěji výhodnější vytvořit kvark a antikvark z vakua než protahovat dál strunu. Toto omezuje účinnost silé jaderné síly na  $10^{-15}$  m, což je velikost atomové jádra. Poslední částicí standardního modelu je Higgsův boson, elementární částice předpovězená v roce 1964 a potvrzená jako poslední ze standardního modelu v roce 2012 na LHC ve švýcarsko-francouzském CERNu. Higgsův boson byl předpovězen několika vědci, například P. Higgsem, F. Englertem, R.Broutem, G. Guralnikem, C. Hagenem, T. Kibblem.

## 1.2 Kvark-gluonové plasma

Kvark-gluonové plasma [18] je skupenství hmoty, ve kterém existují volné kvarky a gluony. Vzniká při velmi vysokých teplotách a hustotě. Těchto podmínek dosahoval vesmír krátce po svém vzniku a uměle lze takových podmínek dosáhnout na velmi krátkou dobu při srážkách v urychlovačích například ve Velkém hadronovém urychlovači. Ukázka vzniku QGP při srážce těžkých iontů je na obrázku 1.3. V těchto podmínkách již není proton schopen udržet se pohromadě a rozpadne se na elementární kvarky a gluony.



Obrázek 1.3: Vznik kvark gluonového plasmatu při srážkách těžkých iontů. [19]

## 1.3 Srážky těžkých iontů

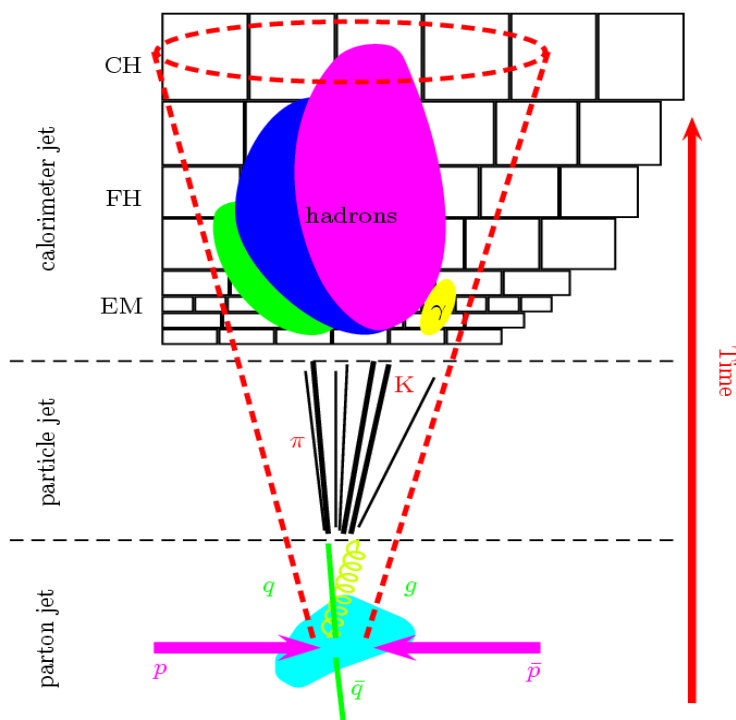
Podmínek, při kterých může existovat kvark-gluonové plasma (QGP) [18] můžeme dosáhnout ve srážkách těžkých iontů. Pro vytvoření QGP je potřeba dosáhnout teploty alespoň  $2 \times 10^{19}$  K, což je asi  $10^{12}$  krát více, než je teplota v jádru Slunce. QGP bylo poprvé pozorováno v Brookhaven National Laboratory na Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) a později na LHC. Dnes se na LHC srážejí jádra olova o energii až 5,02 TeV na nukleonový pár.

Při srážkách s vysokou energií může vznikat mnoho částic. Množství takto vzniklých částic může převyšovat i tisíc. Změříme-li vlastnosti takto vzniklých částic, můžeme zpětně zrekonstruovat, co se při srážce událo. K tomu je potřeba, aby detektor byl dostatečně přesný a zabíral co největší prostorový úhel. Těchto podmínek dosahuje například detektor ATLAS. Navíc energetická hranice dosažená na LHC nám dovoluje studovat i interakce kvarků a gluonů s velkou hybností s QGP, tedy jevu nazývaného shášení jetů (jet quenching) [25].

## 1.4 Shášení jetů (jet quenching)

V rámci srážky dvou protonů, nebo dvou jader na LHC, může dojít k tak zvanému tvrdému rozptylu dvou kvarků či gluonů. Při tomto procesu mohou vzniknout z původních dvou kvarků či gluonů dva jiné kvarky či gluony. Tyto částice se od sebe vzdalují, a pokud mají dostatečnou energii, pak při průchodu vakuem generují další kvarky, či gluony tak, že vzniká kolimovaná sprška částic, zvaná jet. Protože však nemohou kvarky ani gluony existovat jakou volné částice (color confinement) dochází k procesu hadronizace, kdy barevné kvarky a gluony rekombinují do bezbarvých hadronů, které tvoří jet pozorovaný v detektoru. Ze srážky hadronizací vznikají dvě spršky (jety) hadronů mířících opačným směrem.

Většinou jsou uspořádány do dvou kuželů mířících stejným směrem jako původní kvarky. Přestože nemůžeme měřit původní kvarky, můžeme měřit vlastnosti jetu a z nich pomocí algoritmu dopočítat například příčnou hybnost původního kvarku. V případě srážky těžkých iontů dochází v místě srážky ke vzniku, ale také dochází ke vzniku QGP, kterým musí jety projít. Částice jetu nesou nenulový barevný náboj a proto při průchodu QGP, ztrácejí část své energie a tím i příčné hybnosti, tento proces nazýváme shášení jetu. Množství ztracené energie, závisí na vlastnostech jetu i na vlastnostech QGP. V rámci srážek těžkých iontů je důležité zkoumat rozdíly mezi událostmi dominovanými kvarkovými a gluonovými jety, neboť potlačení jetů závisí na druhu jetu. Větší potlačení jetů je očekáváno pro gluonové jety, menší pak pro jety kvarkové. Je tedy možné ze změn vlastnosti jetu zjistit vlastnosti a strukturu QGP.



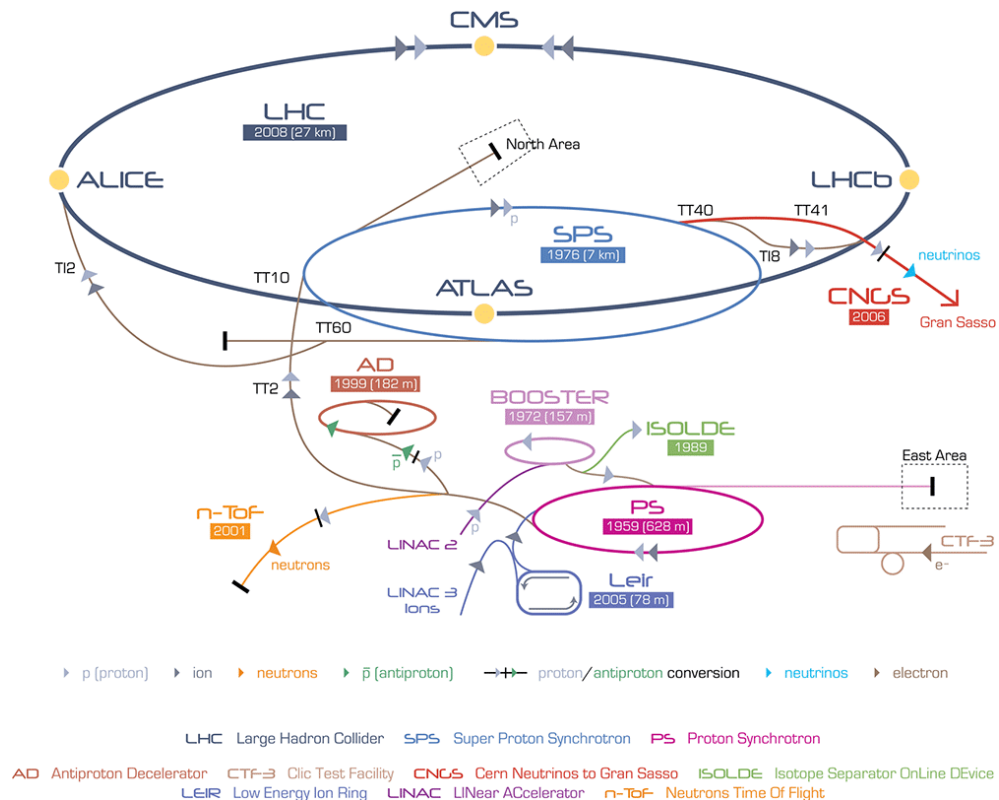
Obrázek 1.4: Vývoj jetu [8]

# 2. LHC a ATLAS

## 2.1 Large Hadron Collider

Jak již bylo zmíněno výše, ke zkoumání kvark-gluonového plazmatu či jevu shášení jetů, je potřeba použít urychlovač částic. Částicový urychlovač [11] je zařízení, které využívá elektromagnetické pole, aby nabitě částice urychlila na velmi vysoké rychlosti, blízké rychlosti světla. Takto urychlené částice se pak nechají narazit buď do terčiku, popřípadě do jiných částic obíhajících urychlovač v opačném směru. Studováním těchto srážek je možné studovat vlastnosti světa na těch nejmenších velikostních škálách. Největším, nejvýkonnějším a nejspíše i nejznámějším je dnes LHC (Large hadron collider) ve švýcarsko-francouzském CERNu (Evropská organizace pro jaderný výzkum). Prvně byl spuštěn 10. září 2008 a zůstává zatím posledním přírůstkem do komplexu urychlovačů v CERN. LHC není prvním urychlovačem v CERNu a využívá svých předchůdců jako "předurychlovače". Cesta protonu, který se srazí v LHC na jednom z detektorů začíná v láhvi se stlačeným vodíkem, odkud je napumpována do zdrojové komory lineárního urychlovače Linac 2 (Linear accelerator 2), zprovozněného v roce 1978, kdy nahradil Linac 1. Ve zdrojové komoře je zbaven elektronového obalu, tak aby zůstalo jen vodíkové jádro, mající elektrický náboj, který dovoluje proton urychlit pomocí elektrického pole. Po dosažení konce tohoto lineárního urychlovače má proton rychlost asi třetiny rychlosti světla a kinetickou energii 50 MeV. Odtud vstoupí do Proton Synchrotron Booster, který se skládá ze čtyř synchrotronových prstenců, ve kterých je proton urychlen na 96 % rychlosti světla a kinetickou energii 1,4 GeV. Druhým účelem boosteru je, že dovoluje udělat svazek s více protony, což zvyšuje využití svazku pro experimenty. Z boosteru do Proton Synchrotronu (PS), kde se nejen urychlují protony, ale je zde možné i urychlovat těžké ionty, pokud je komplex přepnut na srážky těžkých iontů. Ty se sem případně dostávají z Low Energy Ion Ring (LEIR), který je plněn lineárním urychlovačem Linac 3. PS začal urychlovat 24. listopadu 1959 a je částicovým urychlovačem s energií 25 GeV, které je docíleno na kruhové dráze o obvodu 628 metrů. Při této energii se urychlované částice pohybují téměř rychlostí světla, a proto další urychlování, ať již na tomto urychlovači nebo na dalších urychlovačích, vede k nárůstu energie, nikoliv už však k výraznému nárůstu rychlosti. Po dobu šedesátých let byl chloubou CERNu a dodával urychlené částice rovnou do experimentů, až v 70tých letech se stal "plnicem" mnohem silnějšího urychlovače a to Super Proton Synchrotron (SPS). SPS by zapnut v roce 1976. Se svým obvodem téměř 7 kilometrů operuje na 450 GeV. Tento urychlovač slouží opět jako předurychlovač pro LHC a nebo zásobuje další experimenty operující na nižších energiích než LHC, jako je například experiment COMPASS. Do popředí se dostal, když byl nastaven jako proton-antiproton collider (srážec) a byly zde objeveny intermediální bosony slabé interakce W a Z. Posledním a největším, nejvýkonnějším urychlovačem je pak již zmíněný LHC. Obsahuje dvě trubice ve, který se pohybuje svazek částic. V jedné trubici se svazek pohybuje po směru hodinových ručiček a v druhém naopak. Trubice se kříží na čtyřech místech, kde se nacházejí částicové detektory. Aby v trubicích nedocházelo ke srážkám s plynem, musí být v trubicích vakuum. Vzhledem k tomu, že obvod LHC je 27 kilometrů, radí to tento vakuový systém

k největším na světě. K zakřivování dráhy svazku se používají velmi silné magnety. Aby došlo ke zvýšení efektivity a snížení energetické náročnosti, používají se supravodivé magnety. Díky těmto a mnoha dalším zařízením je možné, aby každý proton měl před srážkou energii 6,5 TeV. Při proton-proton srážce je tak dosaženo 13 TeV. Na místě, kde se dnes nachází LHC, běžel od roku 1989 Large Electron-Positron Collider (Velký elektron-positronový urychlovač). Ten však byl spolu s experimenty roku 2000 rozebrán, aby uvolnil místo již zmíněnému LHC. Za svého provozu detailně studoval například elektroslabou interakci nebo data z něj získaná pomohla dokázat, že jsou zde právě tři generace částic. Na LHC se nesráží pouze protony, jsou zde například sráženy jádra olova, při kterých může vnikat již zmíněné QGP. Schématická ukázka urychlovačů je zobrazena na obrázku 2.1.



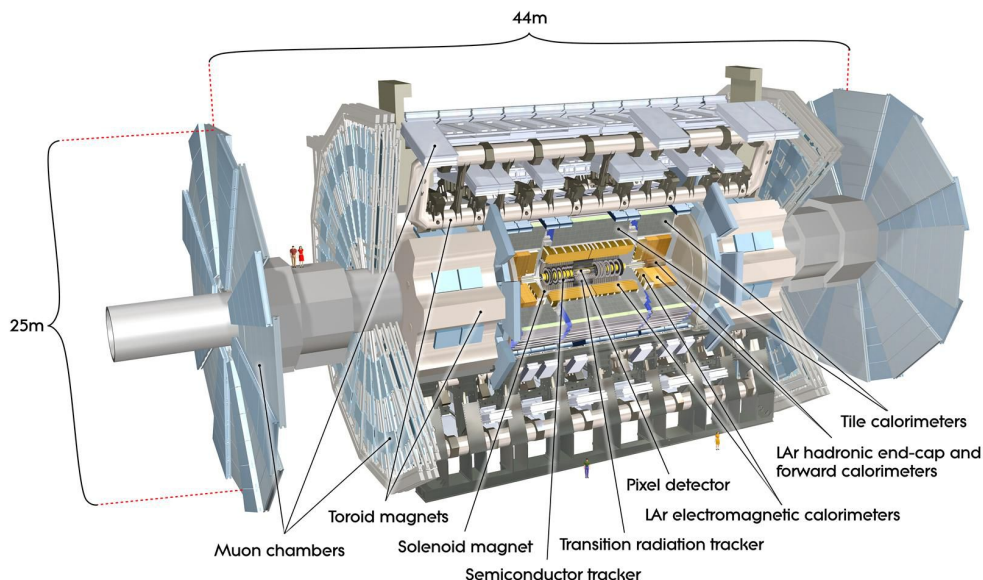
Obrázek 2.1: Schématická ukázka urychlovačů [2]

## 2.2 Detektory částic

Jak již bylo zmíněno výše, nachází se na LHC na čtyřech místech detektory částic [12]. Hlavními a největšími detektory snažícími se zabývat co největším rozsahem fyziky jsou ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) a CMS (Compact Muon Solenoid). Pracují nezávisle na sobě proto, aby mohlo dojít k porovnávání výsledků případných objevů. Dále se zde nachází i dva menší specializované detektory. ALICE (A Large Ion Collider Experiment) designován ke studiu silně interagující hmoty při extrémních hustotách, kvark-gluonového plazmatu. LHCb (Large Hadron Collider beauty) detektor, jak již název napovídá, specializující se na beauty kvark, nebo jen b kvark, studující tak jemné odchylky mezi hmotou a

antihmotou. Dále se zde nacházejí ještě další tři menší specializované detektory TOTEM, LHCf a MoEDAL.

## 2.3 ATLAS



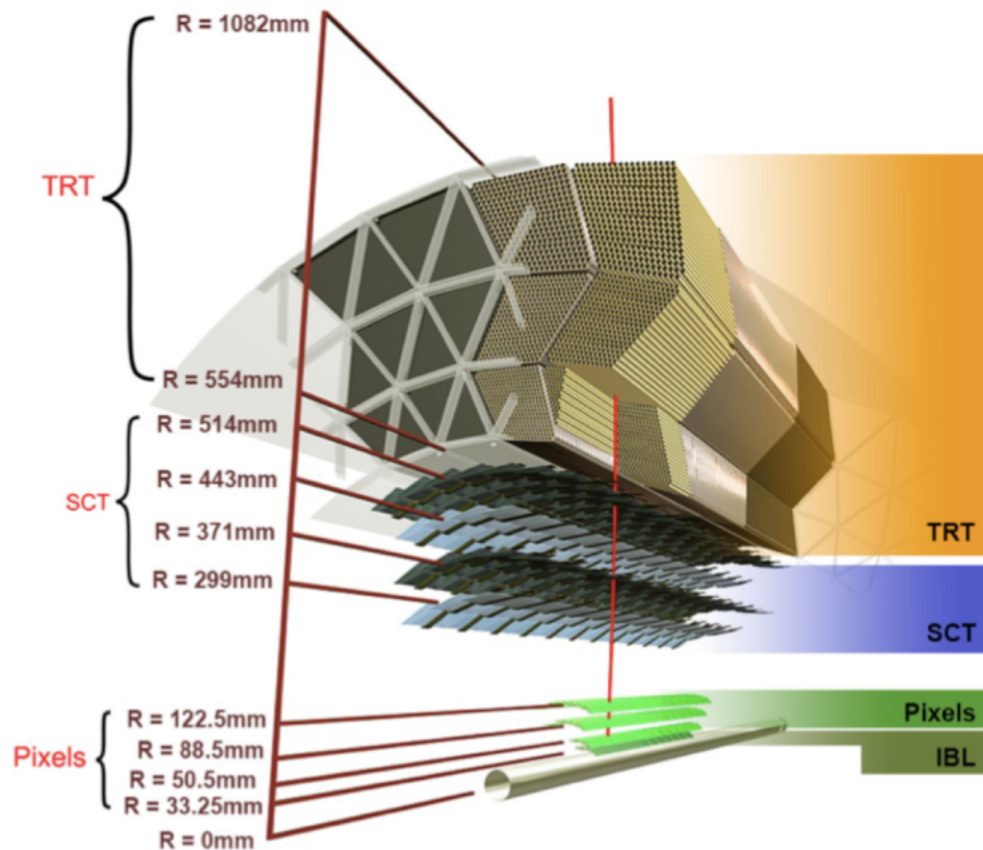
Obrázek 2.2: Detektor Atlas [4]

ATLAS (obrázek 2.2) [7] se skládá z několika soustředných válcově symetrických vrstev, kde v jejich středu se nachází místo srážek protonových nebo Pb svazků. Lze jej rozdělit do čtyř hlavních částí. Vnitřní detektor, kalorimetr, mionový spektrometr a magnetový systém. Každý z detektorů měří nějakou vlastnost a jsou tak schopny zjistit vlastnosti všech stabilních částic až na neutrino, která jsou dopočítávána z hybnostní nerovnováhy mezi detekovanými částicemi. K tomu, aby toto fungovalo, je potřeba, aby detektor byl hermetický a detekoval co největší množství ostatních částic, mimo neutrino.

### 2.3.1 Vnitřní detektor

Vnitřní detektor [24](obrázek 2.3) začíná několik centimetrů od osy srážky svazků a sahá až do poloměru 1,2 metru. V délce podél trubice urychlovače dosahuje 6,2 metru. Jeho hlavní funkcí je sledovat nabitě částic Institute of Particle and Nuclear physicse detekováním jejich interakcí s materiálem. Vzhledem k tomu, že vnitřní detektor je obklopen velmi silnými magnety, je tak možné měřit náboj částice, podle toho jakým směrem se zakřivuje a jejich hybnost tím, jak moc se zakřivuje. Pokud je zjištěno, že stopa některá částice nevychází z místa srážky, je pravděpodobné, že pochází z rozpadu jiných částic. Vnitřní detektor je pak možné rozdělit na tři části. Nejvnitřnější částí je Pixel Detector, který je rozdělen do tří vrstev v poloměrech okolo osy svazku 50,5 mm, 88,5 mm a 122,5 mm. Celkově se skládají z přibližně 1700 identických modulů odpovídajícím  $8 \times 10^7$  pixelů. Moduly, které jsou veliké 2 na 6 cm, jsou složeny ze sensorů a čtecích čipů

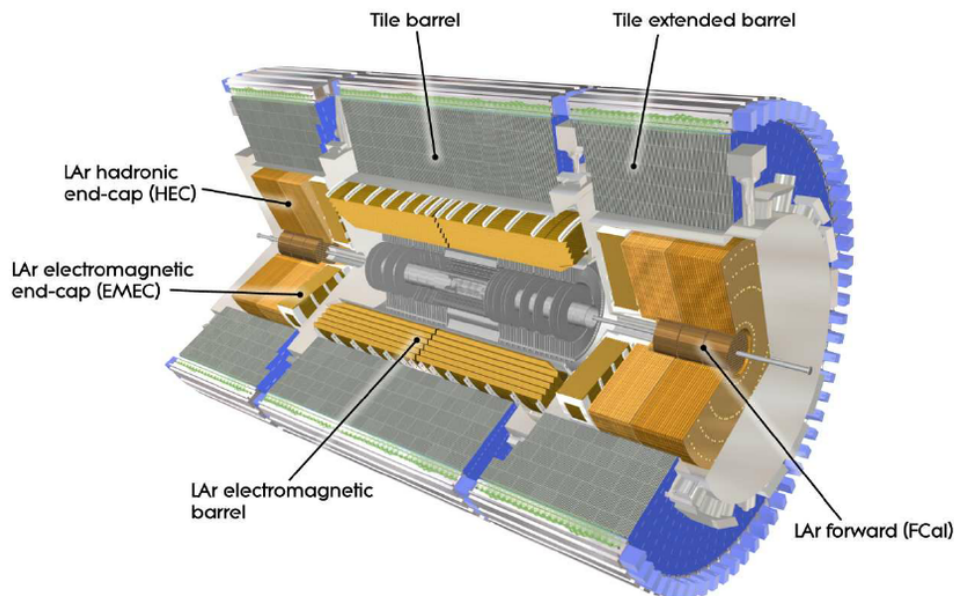
a na kterých je nanese na křemíková vrstvička [22]. V roce 2014 byla přidána ještě jedna vrstva, která je mnohem blíže ose svazku. Nese název IBL -Insertable B-Layer. Další částí vnitřního detektoru je Semi-Conductor Tracker, který je velmi podobný předchozímu detektoru s rozdílem, že místo malých pixelů je využito proužků o rozměrech  $80 \mu\text{m}$  na  $12 \text{ cm}$ , se kterými se lépe pracuje. Vnější část vnitřního detektoru je pak Transition Radiation Tracker. Za vnitřním detektorem se nachází magnet (solenoid), který slouží k zakřívování drah nabitých částic.



Obrázek 2.3: Grafické znázornění vnitřního detektoru. IBL - Insertable B-Layer, Pixels - The Pixel Detector, SCT - Semi-Conductor Tracker, TRT - Transition Radiation Tracker [1]

### 2.3.2 Kalorimetr

Kalorimetr [9] je složen z hustého kovu (železa) nebo tekutého argonu a jak částice prochází kalorimetrem, ztrácí energii. Základním mechanismem měření energie v kalorimetrech je měření energie částic, která je deponovaná v elektromagnetické či hadronové spršce vznikající v materiálu kalorimetru. Kalorimetr je vzorkovací, to znamená, že periodicky testuje tvar výsledné spršky. Kalorimetr je navíc rozdělen na dva. Vnitřní elektromagnetický absorbuje energii od částic interagující elektromagneticky (nabitě částice a fotony). Tento je velmi přesný jak v množství naměřené energie, tak i v místě kde byla daná energie naměřena. Měří s rozlišením v longitudinálním směru až  $0.0031$  radiánů. Naopak vnější hadronový kalorimetr je méně přesný (typicky  $0,1$  radiánů) a detekuje zejména hadronovou komponentu spršky.



Obrázek 2.4: Grafické znázornění kalorimetru. [10]

### 2.3.3 Mionový spektrometr

Mionový spektrometr [15] je veliký sledovací systém skládající se z 1200 měřících komor a několika tzv. triggerových komor s přesným časovým rozlišením. Triggerové komory jsou součástí komplexního triggerového (neboli spouštěcího) systému, který je speciálně určen pro rychlé zaznamenání událostí v případě výskytu požadované vlastnosti události, tedy např. výskytu vysoko-energetických mionů. Tento detektor se nachází od poloměru 4,25 m až do 11 m. Je to tedy největší část detektoru. Přesnost měření hybnosti částic je od 3 procent pro lehké částice (100 GeV) až po 10 procent pro nejtěžší (1 TeV).

### 2.3.4 Systém magnetů

V detektoru se nachází dva systémy supravodivých magnetů [13] k ohýbání drah nabitých částic. Síla (Lorentzova) působící na částice je závislá na rychlosti a pro poloměr takové dráhy platí  $r = \frac{pT}{|q|B}$  [5]. Vnitřní solenoid obklopující vnitřní detektor produkuje homogenní magnetické pole o indukci 2 tesla. Takto silné pole je potřeba, protože pro určení hmotnosti velmi hmotné nabitě částice důležité, aby se dráha dostatečně zakřivila a mohla tak být hmotnost dopočítána. Znamená to však, že dráha velmi lehké částice (pod 400 MeV) budou zakřivena tak moc, že začne rotovat v poli a pravděpodobně nebude změřena. Druhý, vnější, systém je složen z osmi velmi velikých supravodivých toroidálních magnetů, nacházejících se v oblasti mionového spektrometru, a dvou toroidálních magnetů tvořící vnější část magnetického systému. Magnetické pole není homogenní a pohybuje se mezi 2 a 8 tesla. Magnetické pole válcovitého tvaru je 26 metrů dlouhé a má poloměr 20 metrů.



### 3. PYTHIA a generování srážek

K simulaci srážek v urychlovači byl použit program PYTHIA ve verzi 8.240 [17] [28]. Program slouží k simulaci srážek, nejen protonů, při vysokých energiích. Konkrétně slouží k simulaci tvrdých procesů, partonových spršek, hadronizace a mnoho dalšího. Jde o jeden z nejpoužívanějších generátorů srážek současnosti, jehož vývoj zabral více jak 30 let. V této kapitole bude popsáno základní nastavení simulace[14].

Výpis kódu 3.1: Nastavení srážky

```
1 pythia.readString("Beams:eCM = 2760.");
2 pythia.readString("Main:numberOfEvents = 1000000");
3 pythia.readString("Main:timesAllowErrors = 10");
4 pythia.readString("Random:setSeed = on");
5 pythia.readString("Init:showAllSettings = off");
6 pythia.readString("Init:showChangedParticleData = on");
7 pythia.readString("Init:showAllParticleData = off");
8 pythia.readString("HardQCD:all = off");
9 pythia.readString("HardQCD:gg2gg = on");
10 pythia.readString( Form("PhaseSpace:pTHatMin= %.0f", pTHatMin) );
11 pythia.readString( Form("PhaseSpace:pTHatMax= %.0f", pTHatMax) );
```

Ve výpisu kódu 3.1 můžeme vidět základní nastavení srážky, které bylo užito při generování srážek za pomoci PYTHIA. Řádek číslo 1 nám říká, že energie srážky v soustavě spjaté s těžištěm je 2760 GeV. Řádkem 2 je nastavován počet srážek (událostí). Jak je vidno, počet byl zvolen 1 000 000, tak abychom měli dostatečně mohutný statistický soubor. Následující řádek 3 nastavuje, kolik chyb v části `pythia.next()` (část, ve které se generují srážky) je dovoleno, než je proces zastaven. Je nastaveno 10, protože je to základní nastavení, které doporučuje manuál. Řádek 4, mluví o tom, že bude nastaven náhodný seed. Seed je zadaná hodnota, která bude vložena do generátoru pseudonáhodných čísel k zahájení generování čísel. Následující tři řádky, tedy řádky 5,6 a 7 jen nastavují, co bude vypísáno na obrazovku, respektive do logfilu. Tedy všechna nastavení, data částic a rozpadů pro částice, jejichž vlastnosti se změnily, a v poslední řadě data pro všechny částice.

Následující dva řádky 8 a 9, jsou stěžejní, protože zde je nastavováno, k jakým srážkám bude docházet. Řádek 8 vypíná tvrdé QCD procesy, které byly ve výchozím nastavení zapnuty. Následující řádek pak zapíná z tvrdých procesů jediný a to takový, že dojde ke gluon-gluonové srážce a výstupem jsou zase dva gluony. Tyto gluony poté hadronizují a dávají vzniknout jetům, které jsou následně zkoumány. Místo tohoto spínače je možné zvolit výpis kódu 3.2, kde dojde k zapnutí gluon-gluonových srážek takových, že výstupem je pár kvark-antikvark. V základním nastavení je tímto kvarkem kvark  $u$ ,  $d$  nebo  $s$ . Tento přepínač nám tedy umožňuje zkoumat vlastnosti událostí, které jsou dominované jety iniciovanými gluony (procesy  $gg \rightarrow gg$ ), respektive kvarky ( $gg \rightarrow q\bar{q}$ ).

Výpis kódu 3.2: Alternativní nastavení

```
1 pythia.readString("HardQCD:gg2qqbar = on");
```

Poslední dva řádky tj. 10 a 11, určují minimální a maximální příčnou hybnost partonů vycházejících z tvrdého binárního procesu  $gg \rightarrow gg$  nebo  $gg \rightarrow q\bar{q}$ .

Pro tuto práci byly zvoleny dva intervaly, nižší 100 - 200 GeV a druhý vyšší 900 - 1000 GeV.

### Výpis kódu 3.3: Nastavení Standardního modelu

```
1 pythia.readString("6:m0 = 172.5");
2 pythia.readString("23:m0 = 91.1876");
3 pythia.readString("23:mWidth = 2.4952");
4 pythia.readString("24:m0 = 80.399");
5 pythia.readString("24:mWidth = 2.085");
6 pythia.readString("StandardModel:sin2thetaW = 0.23113");
7 pythia.readString("StandardModel:sin2thetaWbar = 0.23146");
8 pythia.readString("ParticleDecays:limitTau0 = on");
9 pythia.readString("ParticleDecays:tau0Max = 10.0");
```

V předchozím výpisu kódu 3.3 je možné vidět nastavení standardního modelu. V prvním řádku vidíme nastavení klidové hmotnosti pro top kvark v GeV. V druhém a třetím řádku jde o podobné nastavení, avšak pro klidovou hmotnost ze zadaného intervalu pro  $Z^0$ . Čtvrtý a pátý pak nastavuje interval klidové hmotnosti pro W bosony. Řádek 6 a 7 nastavují druhou mocninu sinu elektroslabých směšovacíh úhlů. Nakonec poslední dva řádky zamezují rozpadu příliš těžkých  $\tau$  leptonů. Tato nastavení nejsou přímo důležitá pro předmět našeho zájmu, tedy studium vlastností jetů, na druhou stranu jsou ilustrativní a jsou používána jako výchozí pro řadu studií na LHC, proto jsou tyto hodnoty v kódu uvedeny.

Zbývající nastavení je zobrazeno ve výpisu kódu 3.4 a zabírá se nastavením multi-partonových interakcí a partonových spršek

### Výpis kódu 3.4: Nastavení multipartonových interakcí

```
1 pythia.readString("Tune:pp = 5");
2 pythia.readString("MultipartonInteractions:bProfile = 4");
3 pythia.readString("MultipartonInteractions:a1 = 0.10");
4 pythia.readString("MultipartonInteractions:pT0Ref = 1.70");
5 pythia.readString("MultipartonInteractions:ecmPow = 0.16");
6 pythia.readString("SpaceShower:rapidityOrder=0");
```

## 4. Experimentální výsledky

V experimentu, jak již bylo zmíněno v minulé kapitole, byl vygenerován jeden milion událostí, jak pro události dominovanými jety iniciovanými kvarky, tak pro události dominovanými jety iniciovanými gluony s příčnou hybností jetů v události z intervalu 100 - 200 GeV. To samé bylo provedeno i pro jety s příčnou hybností jetů v události z intervalu 900 - 1000 GeV. Jak již bylo řečeno dříve, v rámci srážek těžkých iontů je důležité zkoumat rozdíly mezi událostmi dominovanými kvarkovými a gluonovými jety, neboť potlačení jetů závisí na druhu jetu. Větší potlačení jetů je očekáváno pro gluonové jety, menší pak pro jety kvarkové [27]. V proton-protonových srážkách jsou potom rozdíly mezi kvarkovými a gluonovými jety důležité například pro detekci nových částic produkovaných v dopředných částech detektoru [23] či pro kalibraci energie jetů [21].

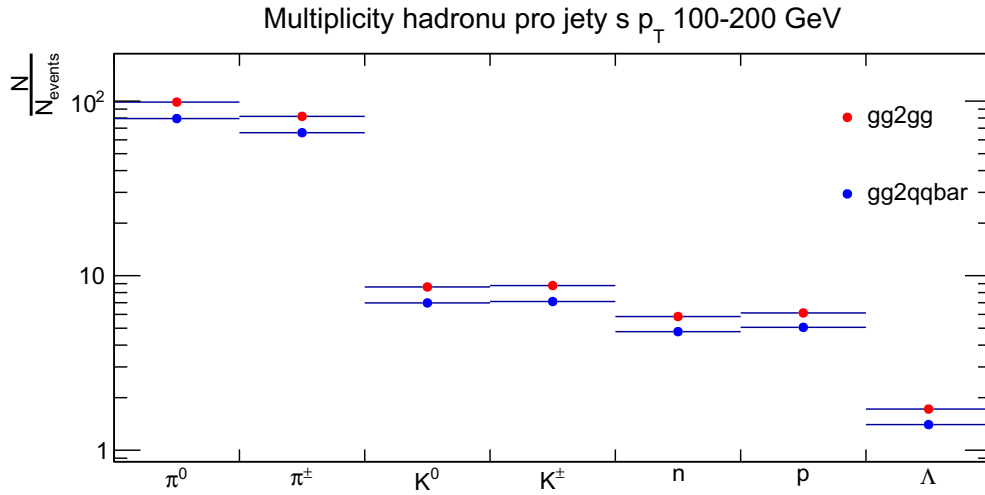
Sekce 4.1 se zaměřuje na multiplicity hadronů dle jejich druhu, tedy jaké částice jet tvoří, popřípadě jaké jsou mimo jet. Dále jak se od sebe liší kvarkové a gluonové jety. Popřípadě, dochází-li k nějakým změnám při zvýšení příčné hybnosti jetů v události. Při zkoumání multiplicit a pseudorapiditního rozdělení je používáno dělení na částice dominantně spojené s jetem a částice dominantně spojené s měkkým pozadím na základě prahu na velikost příčné hybnosti 4 GeV. Částice s příčnou hybností menší než 4 GeV jsou označovány jako měkké částice, nebo částice pozadí a částice s příčnou hybností větší než 4 GeV jsou označovány jako částice tvrdé, nebo částice v jetech. Hranice 4 GeV byla použita v některých předešlých studiích kolaborace ATLAS [20]. Jedná se o jednoduché dělení, které umožňuje postihnout základní odlišnosti v produkci částic bez nutnosti použití sofistikovaných nástrojů na rekonstrukci jetů.

Částice v jetu je ta, která má příčnou hybnost větší než 4 GeV. Mimo jet pak taková, co má příčnou hybnost menší. Další sekce 4.2 se dívá na pseudorapiditu částic. Poslední sekce 4.3 rozebírá příčné hybnosti, a to i pro každý druh částice zvlášť.

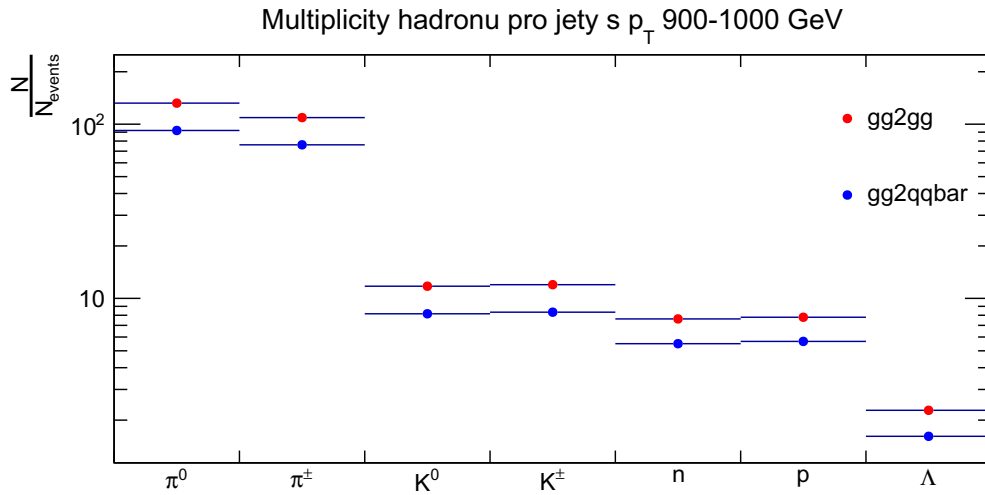
### 4.1 Multiplicita hadronů

Tato sekce se zabývá multiplicitou hadronů. Grafy jsou normovány tak, aby bylo vidět, jaký je průměrně počet částic daného typu v jedné události. Pro zkoumání byly zvoleny částice, které se vyskytují nejčastěji. Nejvíce bylo nenabitých pionů ( $\pi^0$ ) a o něco méně nabitých pionů ( $\pi^{+/-}$ ). O řád méně, oproti pionům, nenabitých kaonů ( $K^0$ ). Nabitých kaonů ( $K^{+/-}$ ) bylo o něco více než nenabitých. Dále pak neutronů (n) a opět o něco více protonů (p). Nejméně ze sledovaných bylo baryonů Lambda ( $\Lambda$ ).

Podíváme-li se na první graf 4.1, jak již bylo zmíněno, můžeme vidět, že výrazně nejhojnější částicí je pion. Obecně platí, že gluonové jety mají větší multiplicitu hadronů, tedy obsahují více částic. Podobnou situaci můžeme pozorovat i na druhém grafu 4.2, který zobrazuje události s vyšší příčnou hybností jetů. Můžeme zde pozorovat i další jevy, a to takové, že v událostech, kde jsou přítomny jety s větší hybností, dojde k obecnému nárůstu počtu částic. Podíváme-li se na nárůst u kvarkových a gluonových jetů je vidět, že rozdíl multiplicit se při zvýšení příčné hybnosti jetů v události zvětšil ve prospěch jetů gluonových. Budeme-li se



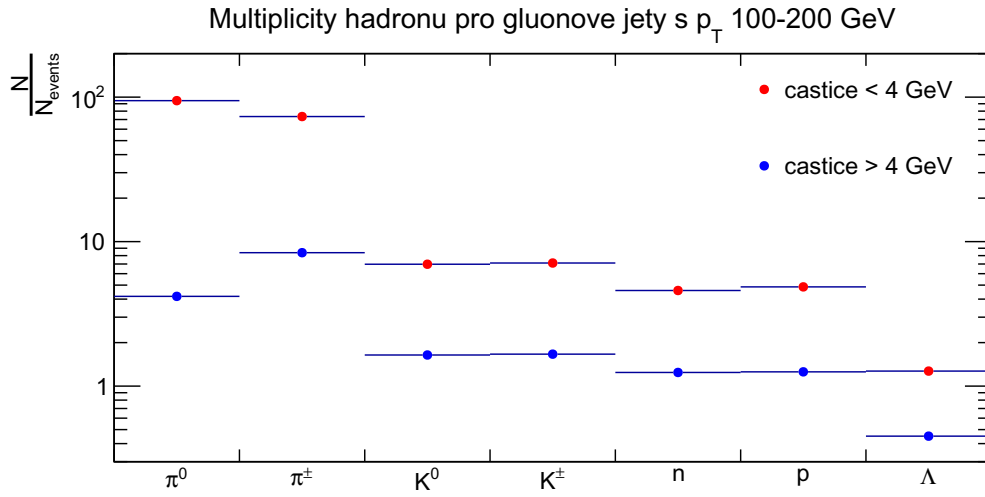
Obrázek 4.1: Porovnání multiplicít hadronů pro gluonové a kvarkové jety při 100-200 GeV



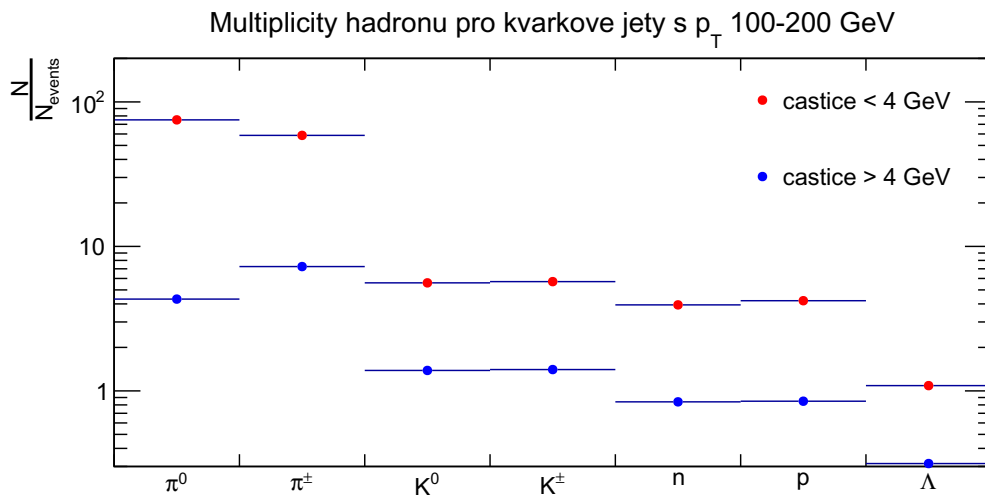
Obrázek 4.2: Porovnání multiplicít hadronů pro gluonové a kvarkové jety při 900-1000 GeV

ptát na rozdíl mezi nabitými a nenabitými částicemi, můžeme pozorovat, vyjma u pionů, nabitě částice ( $K^{+/-}$ , p) se tvoří mírně častěji než jejich nenabití partneři ( $K^0$ , n). U pionů je jev opačný, tedy nenabitých je více.

Graf 4.3 nám ukazuje, jak vypadá multiplicita hadronů jen pro gluonové jety. U pionů můžeme pozorovat další zvláštnost. Zatímco u ostatních částic (kaonů a nukleonů) není patrný žádný rozdíl v poměru mezi nabitými a nenabitými částicemi pro částice v jetu a v pozadí, piony se chovají jinak. U pionů můžeme pozorovat, že rozdíl mezi počtem částic v pozadí a počtem částic v jetu, je výrazně vyšší pro neutrální piony oproti nabitým pionům. Pro události s příčnou hybností jetů 100-200 GeV můžeme vidět, že většina částic se nachází v pozadí. Zvedneme-li příčnou hybnost jetů v události na 900-1000 GeV, výrazně se zvětší množství částic v jetech, zatímco v pozadí se zvedá buď jen nepatrně, a nebo vůbec. Podíváme-li se na baryony Lambda, uvidíme, že v události s nižší hybností jetů jsou baryony Lambda v jetech zanedbatelné, pro kvarky i gluony, avšak pro

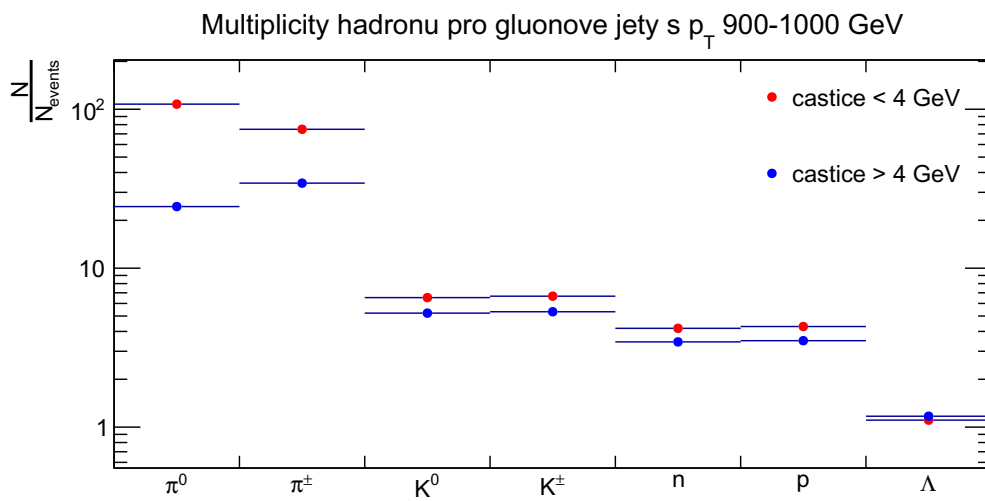


Obrázek 4.3: Porovnání multiplicit hadronů pro gluonové jety při 100-200 GeV

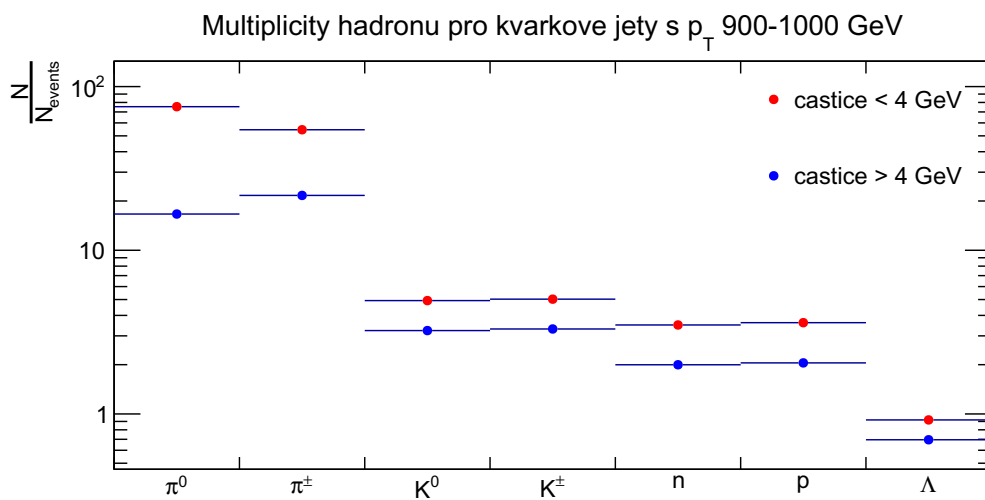


Obrázek 4.4: Porovnání multiplicit hadronů pro kvarkové jety při 100-200 GeV

vyšší příčné hybnosti jetů v události se počty částic v jetech buď výrazně přiblíží (kvarkové jety) nebo dorovnají (glounové jety) počty částic v pozadí.



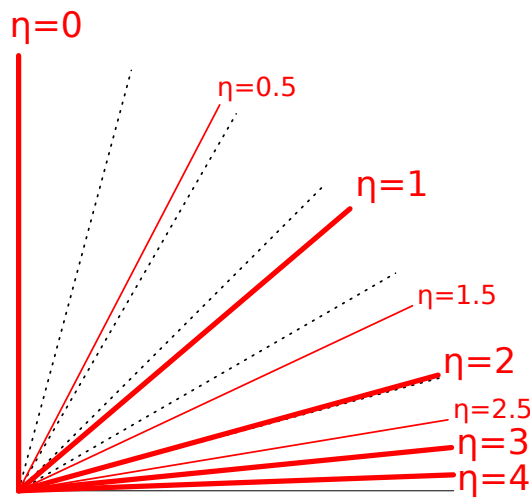
Obrázek 4.5: Porovnání multiplicit hadronů pro gluonové jety při 900-1000 GeV



Obrázek 4.6: Porovnání multiplicit hadronů pro kvarkové jety při 900-1000 GeV

## 4.2 Pseudorapidita

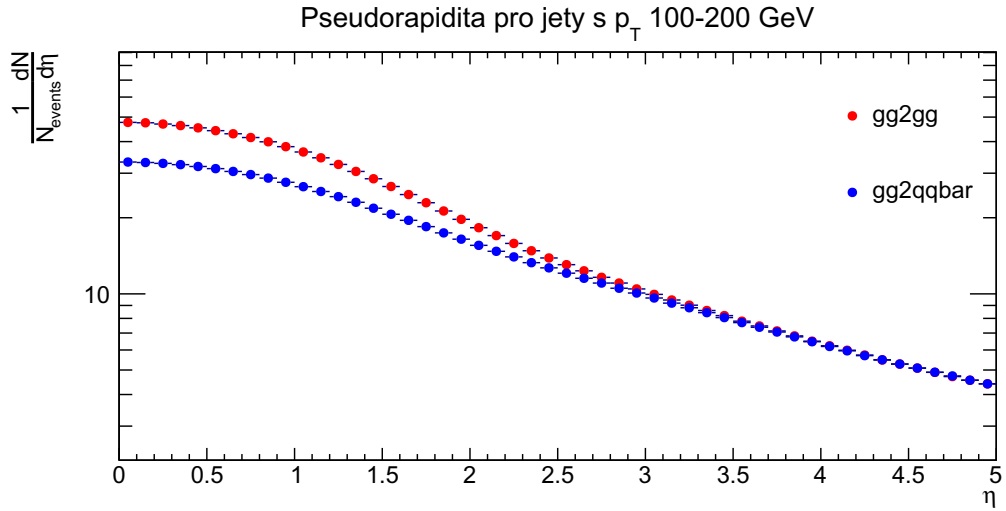
Pro pseudorapiditu  $\eta$  platí vztah  $\eta = -\ln \tan \frac{\theta}{2}$ , kde  $\theta$  je úhel, který svírá směr pohybu částice s osou srážky. Pseudorapidita je jiné vyjádření úhlu a jak je možné dopočítat ze vzorce, případně je to vidět z grafického vyjádření (obr 4.7), částice má nulovou pseudorapiditu letí-li směrem kolmo na osu srážejícího se svazku, nekonečnou pro částici letící ve směru svazku. Platí tedy, že částice s vysokou pseudorapiditou mohou uniknout z detektoru po ose srážejícího se svazku, aniž by byly detekovány. Proto nás bude zajímat jen pseudorapidita do  $\eta = 5$ , která koresponduje s akceptancí (pokrytím) detektorem ATLAS. Všechny histogramy zobrazující pseudorapiditu, jsou normovány na událost a tak, aby počet částic zobrazených na ose y odpovídal šířce binu o velikosti 1.



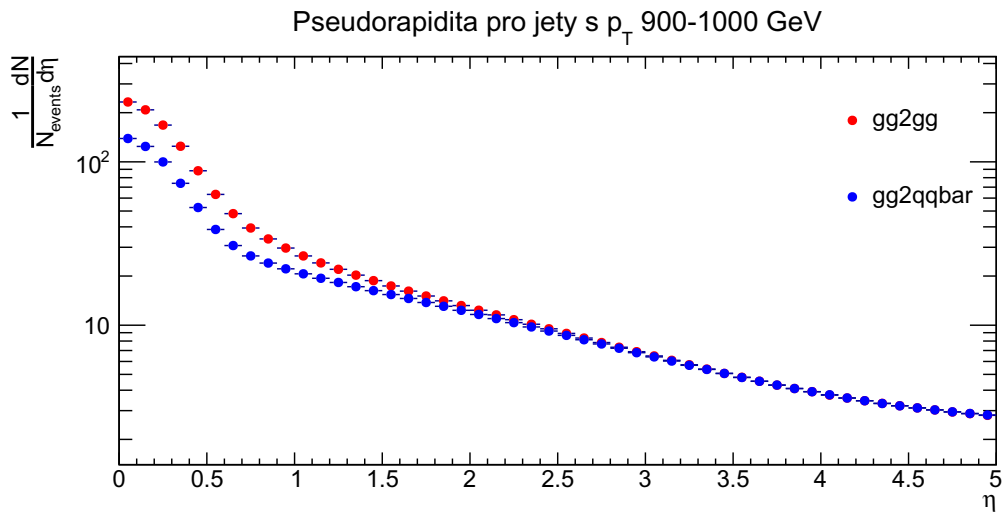
Obrázek 4.7: Grafické znázornění pseudorapidity [16]

Při zkoumání multiplicit jsme zjistili, že gluonové jety mají větší multiplicitu a to je patrné i zde (graf 4.8), gluonové jety mají více částic s nižší pseudorapiditou. Zvýšíme-li příčnou hybnost jetů v události (graf 4.9), zvýší se hlavně počty částí s pseudorapiditou do 0,8. Navíc čím nižší pseudorapidita, tím je nárůst výraznější.

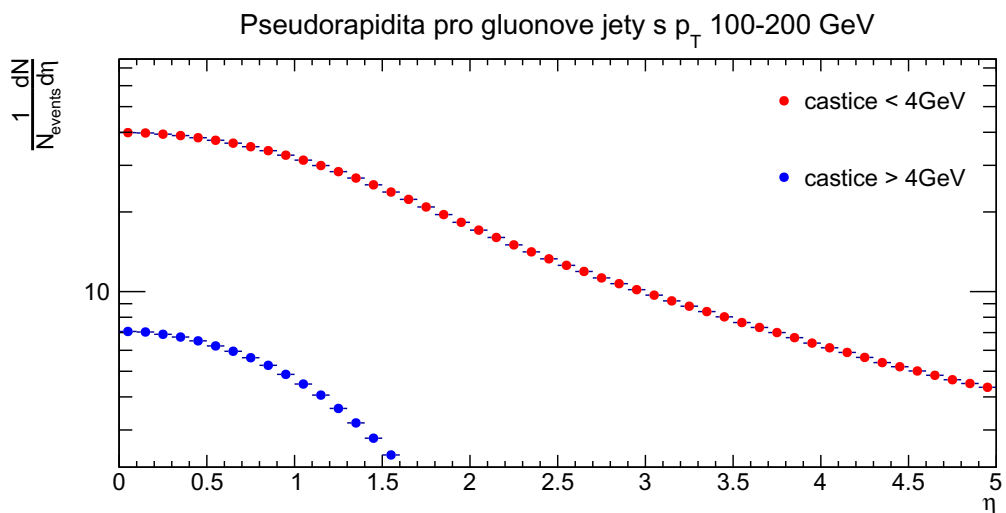
Zaměříme-li se jen na gluonové jety (graf 4.10) a díváme se jakou pseudorapiditu mají částice v jetu a mimo něj, zjistíme, že částice v jetu mají pseudorapiditu nízkou. Naprostá většina částic má pseudorapiditu do jedné. Zvýšíme-li příčnou hybnost jetů v události (graf 4.12), je jev ještě mnohem výraznější. Stejně pozorování, které jsme provedli u gluonových jetů, můžeme pozorovat i u jetů kvarkových na grafech 4.11 a grafu 4.13. Tato pozorování přirozeně reflektují fakt, že produkce jetů je nejčetnější v oblasti kolmé v osu svazku a její četnost klesá směrem do oblasti dopředné.



Obrázek 4.8: Pseudorapidita pro gluonové a kvarkové jety při 100-200 GeV

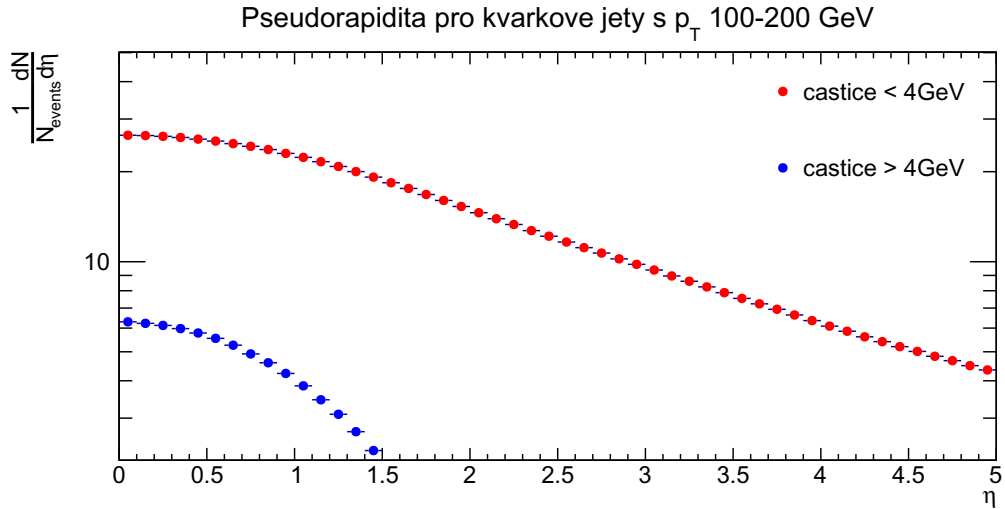


Obrázek 4.9: Pseudorapidita pro gluonové a kvarkové jety při 900-1000 GeV

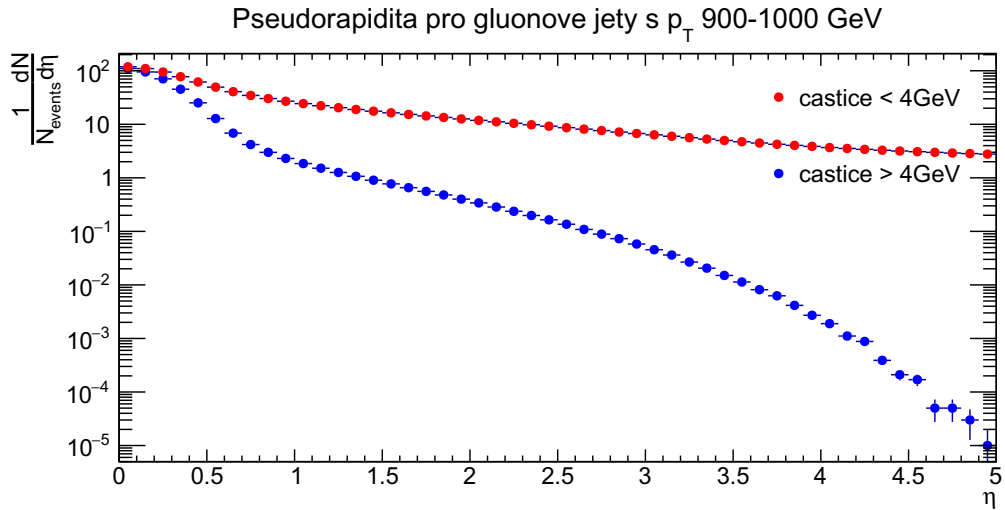


Obrázek 4.10: Pseudorapidita pro gluonové jety při 100-200 GeV

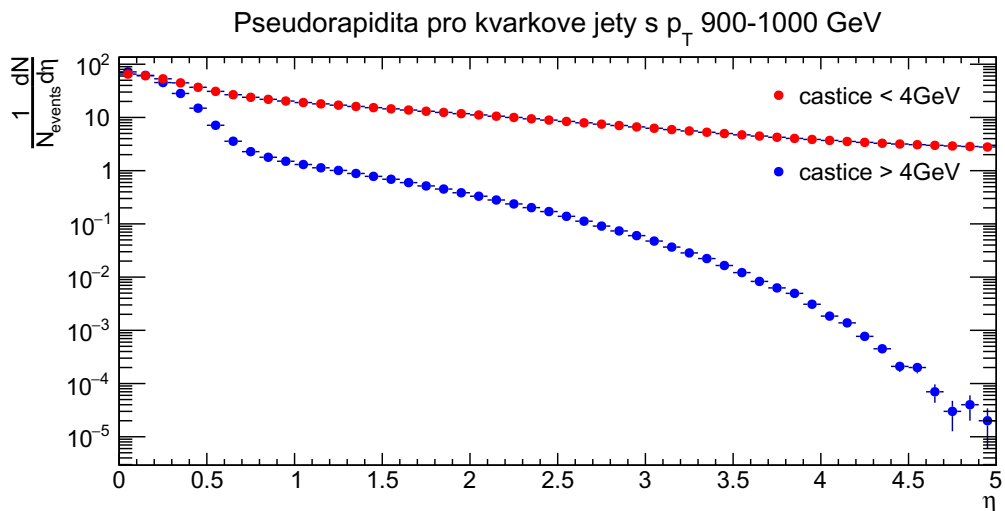




Obrázek 4.11: Pseudorapidita pro kvarkové jety při 100-200 GeV



Obrázek 4.12: Pseudorapidita pro gluonové jety při 900-1000 GeV

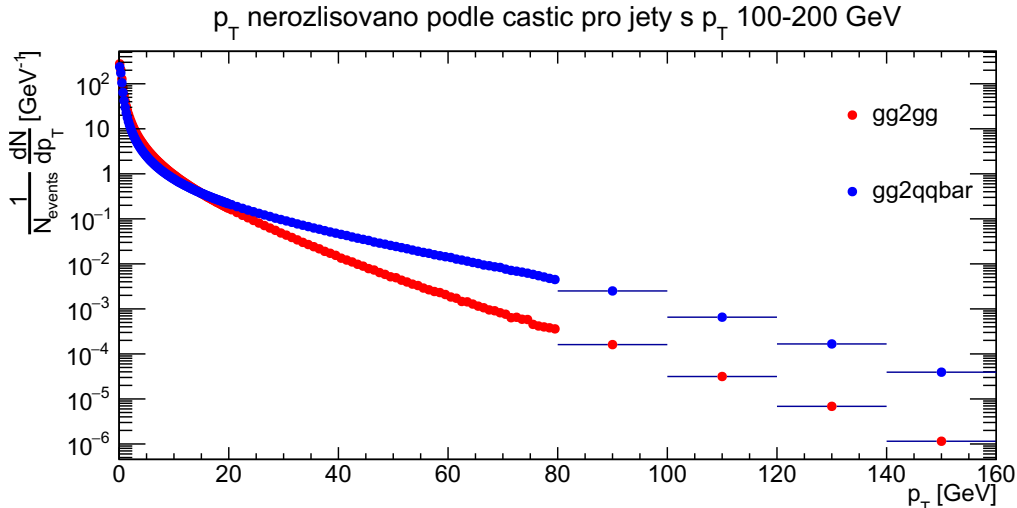


Obrázek 4.13: Pseudorapidita pro kvarkové jety při 900-1000 GeV

### 4.3 Příčné hybnosti

Příčná hybnost je projekce do kolmice k ose svazku. Je-li osa svazku orientovaná ve směru osy  $z$ , platí pro příčnou hybnost  $p_T = |\mathbf{p}| \sin \theta = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$ . Zkoumáme příčnou hybnost, protože na rozdíl od celkové hybnosti je invariantní vůči proměnným frakcím podélné hybnosti ( $p_L$ ), kterou nesou kvarky či gluony v protonu, které inicijují tvrdý proces<sup>1</sup>. Celková hybnost, která je  $p = \sqrt{p_L^2 + p_T^2}$ , pak přirozeně nezávislá na  $p_L$  není. Protože s vyšší příčnou hybností počet částic velmi rychle klesá, bylo potřebné biny pro částice s vysokou příčnou hybností rozšířit, jinak by docházelo k výraznému náhodnému šumu a křivka by velmi kolísala. Konkrétně bylo zvoleno binování od 0 GeV do 20 GeV po 0,2 GeV, poté dále do 80 po 1 GeV (tato změna velikosti binu není v grafech pouhým okem patrná) a nakonec od 80 GeV do 160 GeV po 20 GeV. Grafy jsou opět normovány na jednu událost a tak, aby počet částic zobrazených na ose  $y$  odpovídal šířce binu o velikosti 1.

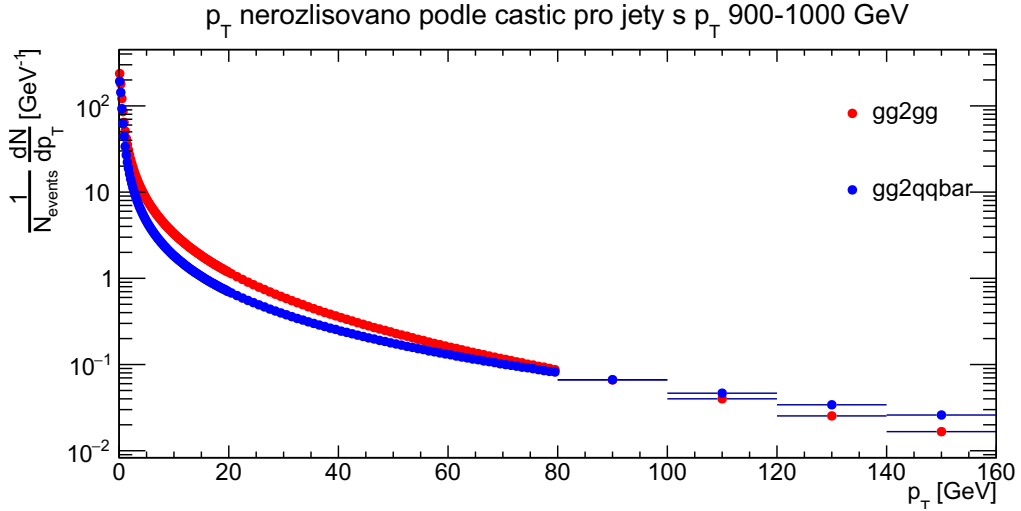
Podíváme-li se na první graf příčných hybností (4.14), zjistíme, že částice v gluonových jetech se oproti kvarkovým jetům, vyskytují v hojnějším počtu s malou příčnou hybností. Naopak kvarkové jety mají početnější zastoupení pro vyšší příčné hybnosti. Hranicí, za kterou se vyskytují hojněji částice z kvarkových než z gluonových jetů, je v tomto případě 15 GeV. Stejný jev můžeme pozorovat i při zvýšení příčné hybnosti jetů v události na 900 - 1000 GeV. Jen s tím rozdílem, že tentokrát se hranice posunula někam mezi 80 a 100 GeV. Toto jsme již pozorovali v sekci 4.1, kde bylo možné vidět, že při zvýšení příčné hybnosti jetů v události, pozorujeme nárůst počtu částic v jetech, ale pozadí se již tolik nemění. A to pozorujeme zde také, počet částic s malou hybností se příliš nemění, zatímco pro vyšší hybnosti se počet částic zvedá a to hned o několik řádů.



Obrázek 4.14: Příčná hybnost pro gluonové a kvarkové jety při 100-200 GeV

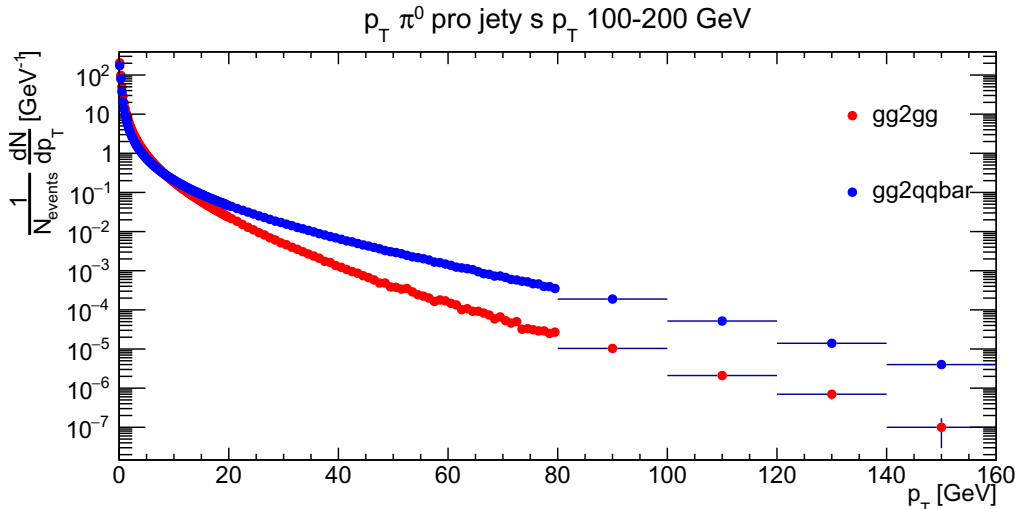
Nyní se podívejme, zda existují i nějaké rozdíly v závislosti na druhu částice. Podíváme-li se na nenabitě piony (graf 4.16), zjistíme, že do značné míry kopírují předchozí grafy, kde jsme nerozlišovali podle druhu částice. Není divu, vzhledem

<sup>1</sup>Tyto frakce hybnosti nejsou spočítatelné z prvních principů v rámci QCD a liší se událost od události.



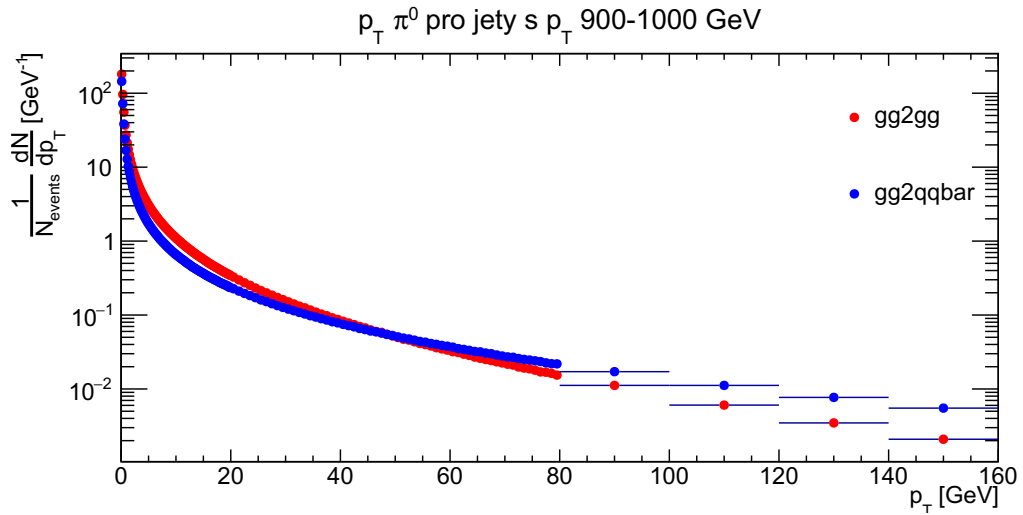
Obrázek 4.15: Příčná hybnost pro gluonové a kvarkové jety při 900-1000 GeV

k tomu, jak bylo vidět v sekci 4.1, piony tvoří podstatnou část částic. Pokud začneme porovnávat grafy pro nabitě a nenabitě piony pro události s příčnou hybností jetů 100-200 GeV, můžeme pozorovat malý rozdíl. Pro nabitě piony klesají počty částic s příčnou hybností rychleji než pro nenabitě piony. Začínají na stejných hodnotách, ale čím dále se posouváme po ose x, tím větší rozdíl můžeme pozorovat. Navíc tato změna je výraznější pro gluonové jety. To má za následek, že pomyslná hranice příčné hybnosti, od které je částic v kvarkovém jetu více než v gluonových, se posunula z 10 GeV (pro nabitě piony) na 15 GeV (pro nenabitě). Zvedneme-li příčnou hybnost jetů v události, můžeme pozorovat mírné zesílení popsaného jevu. Je nutné podotknout, že jev je velmi mírný a bylo by potřebné provést další analýzu a nejspíše i pro ještě větší příčné hybnosti jetů v události, pro jeho lepší dokumentaci.

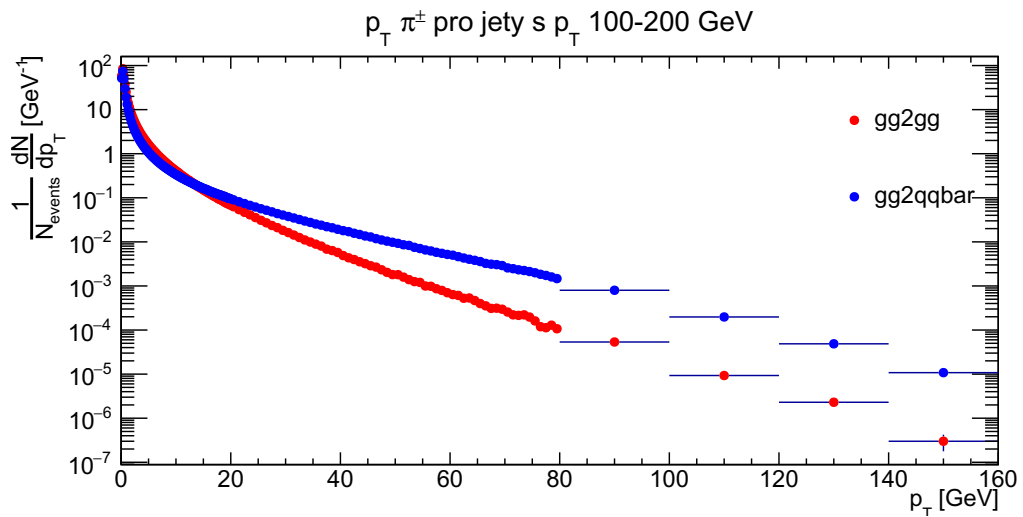


Obrázek 4.16: Příčná hybnost pro  $\pi^0$  při 100-200 GeV

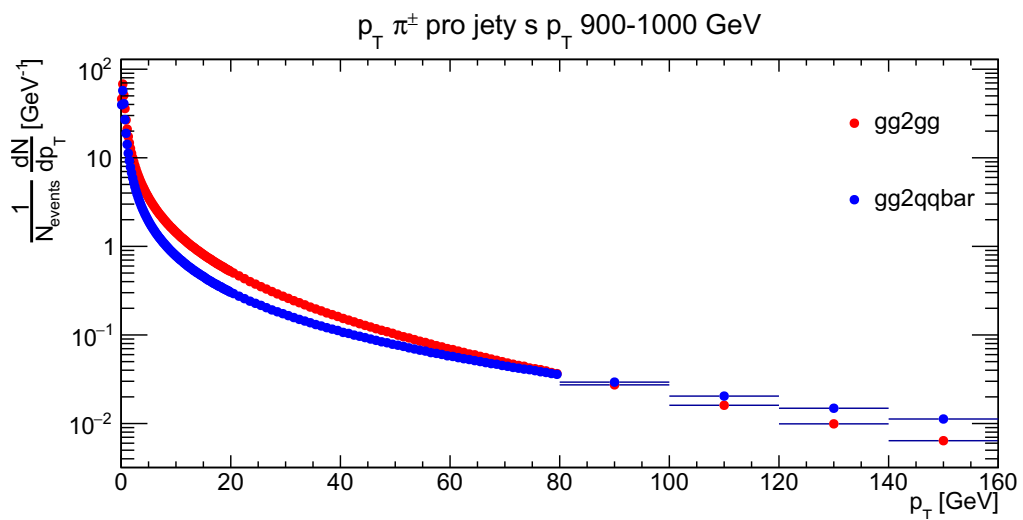
Zatímco u pionů jsme mohli pozorovat malé rozdíly pro nabitě a nenabitě částice, u kaonů nelze pozorovat rozdíly žádné, a to ani menší. Budeme-li porovnávat kaony s piony, můžeme pozorovat, že u kaonů nastává s rostoucí příčnou



Obrázek 4.17: Příčná hybnost pro  $\pi^0$  při 900-1000 GeV

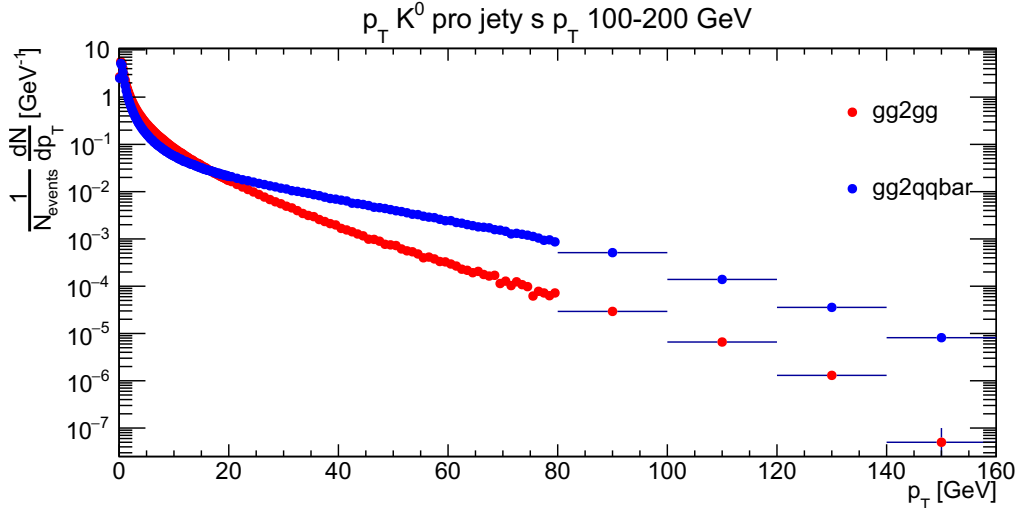


Obrázek 4.18: Příčná hybnost pro  $\pi^\pm$  při 100-200 GeV

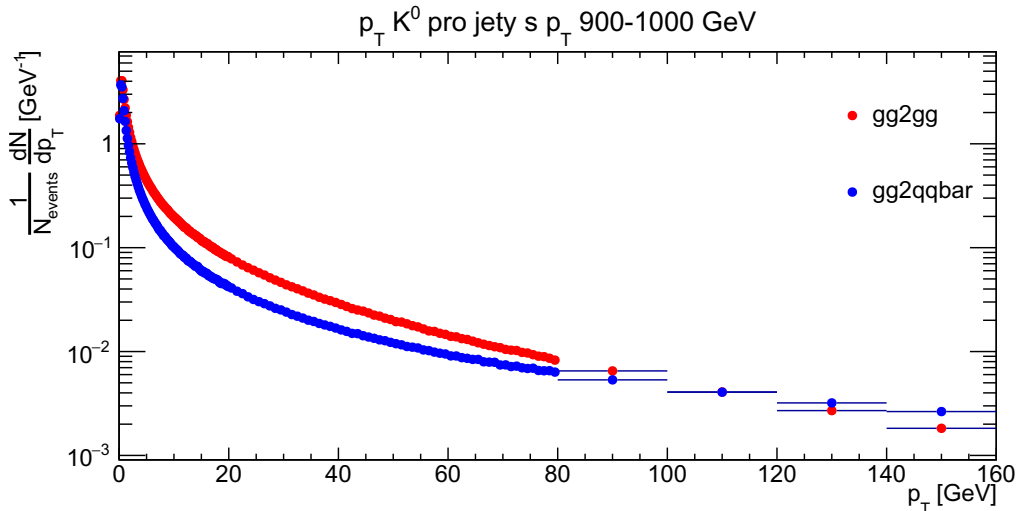


Obrázek 4.19: Příčná hybnost pro  $\pi^\pm$  při 900-1000 GeV

hybností větší propad počtu částic pro kvarkové jety. To poukazuje na snadnější generování částic s s-kvarkem v rámci gluonových jetů, než kvarkových jetů.

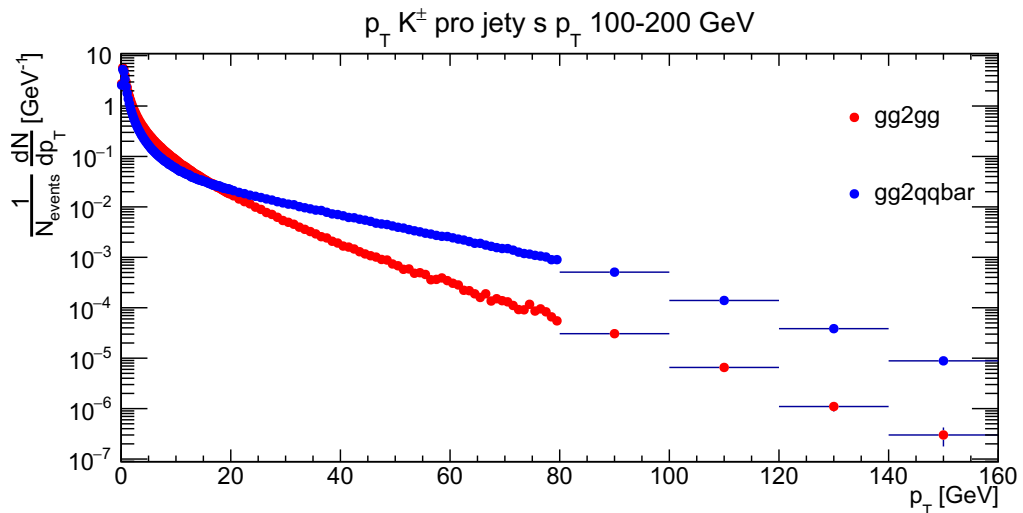


Obrázek 4.20: Příčná hybnost pro  $K^0$  při 100-200 GeV

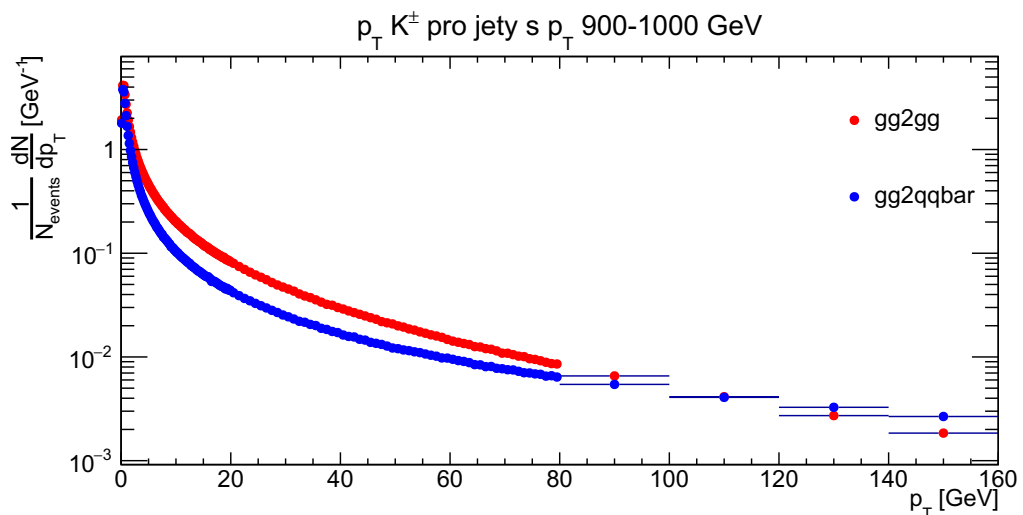


Obrázek 4.21: Příčná hybnost pro  $K^0$  při 900-1000 GeV

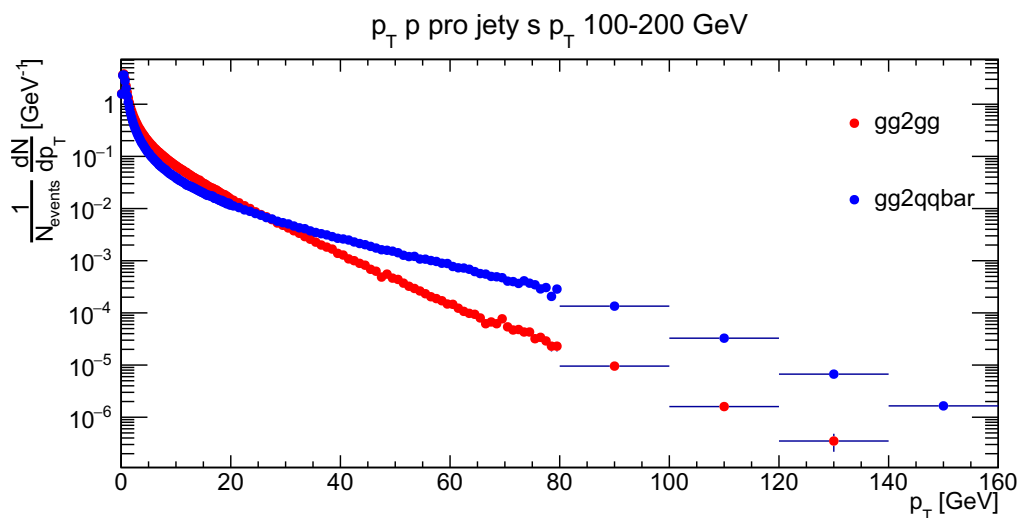
Podíváme-li se na poslední šestici grafů (4.24 - 4.29), tedy na příčné hybnosti protonů, neutronů a baryonů Lambda, zjistíme, že mezi protony a neutrony nepozorujeme opět žádný rozdíl. Ale oproti kaonům nebo pionům se mírně liší. Je možné pozorovat, že hranice příčné hybnosti, při které překonávají kvarkové jety jety gluonové, se posouvá oproti pionům k větším hodnotám příčné hybnosti. Můžeme pozorovat, že tato hranice se pro nukleony nachází na stejném místě, tedy nezávisí na tom, zdali je částice nabitá, či nikoliv. Tento jev je však velmi nevýrazný a může se jednat pouze o šum. Nezbyvá než tvrdit, že žádné, nebo alespoň ne statisticky významné rozdíly, nebyly v závislostech na typu částice pro příčné hybnosti pozorovány.



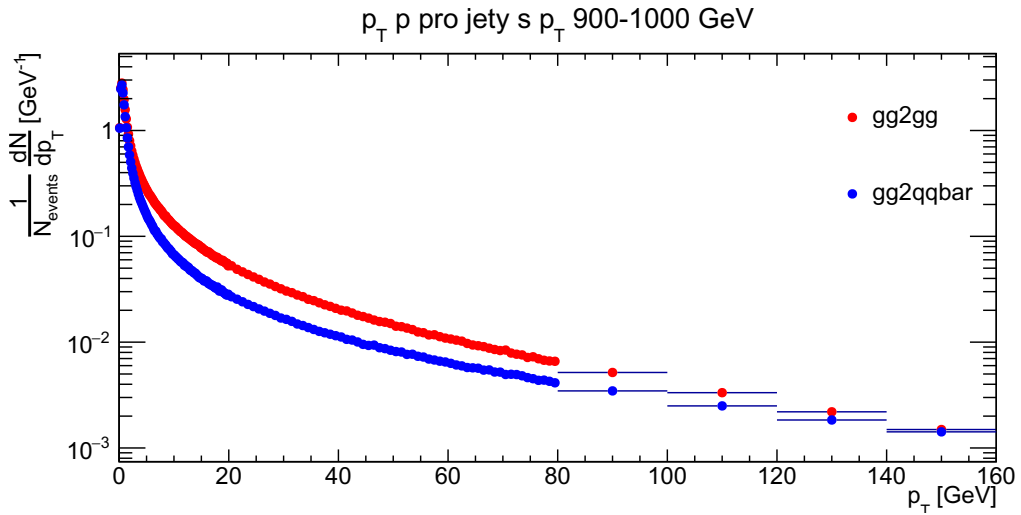
Obrázek 4.22: Příčná hybnost pro  $K^\pm$  při 100-200 GeV



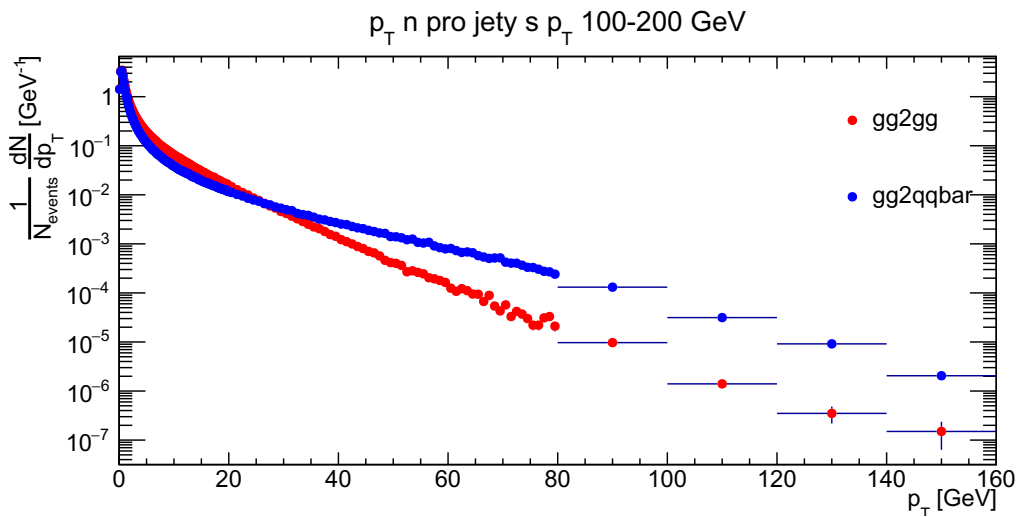
Obrázek 4.23: Příčná hybnost pro  $K^\pm$  při 900-1000 GeV



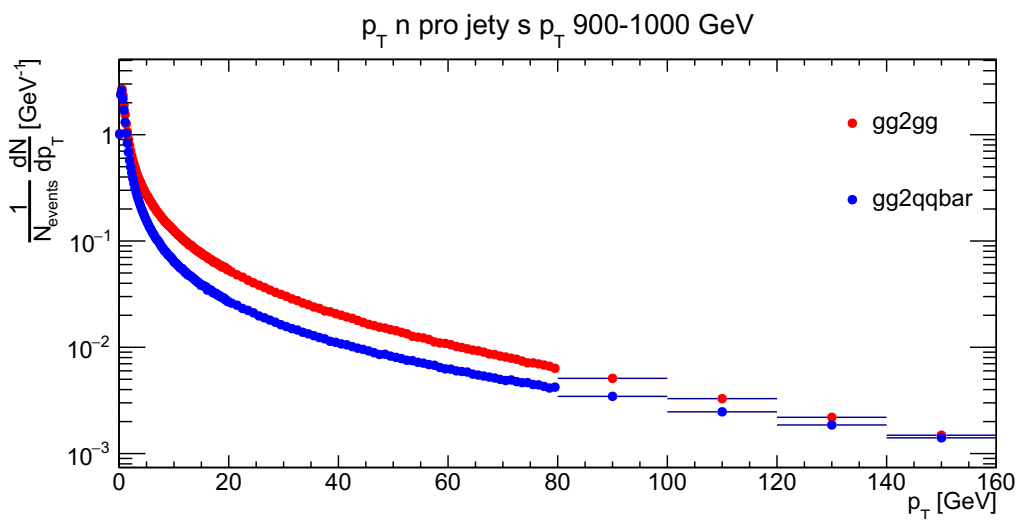
Obrázek 4.24: Příčná hybnost pro p při 100-200 GeV



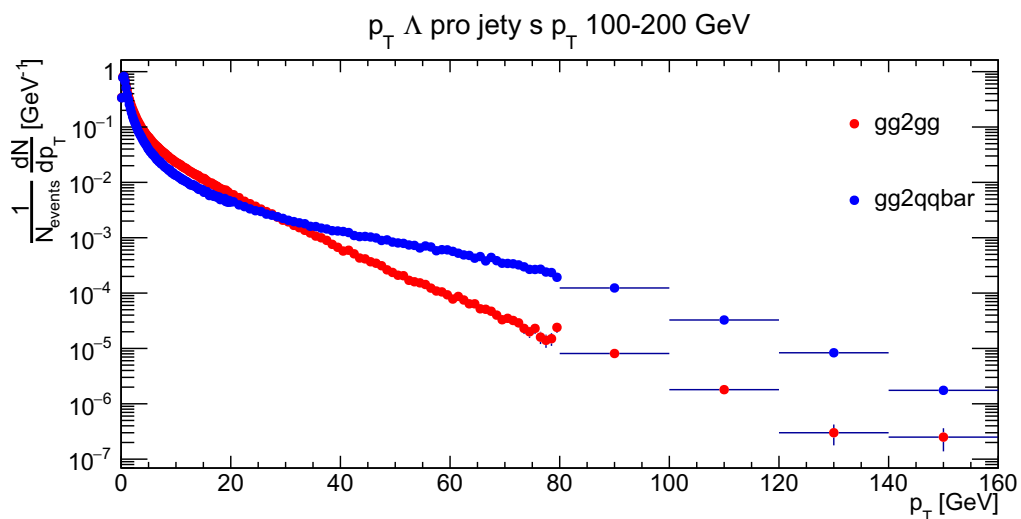
Obrázek 4.25: Příčná hybnost pro p při 900-1000 GeV



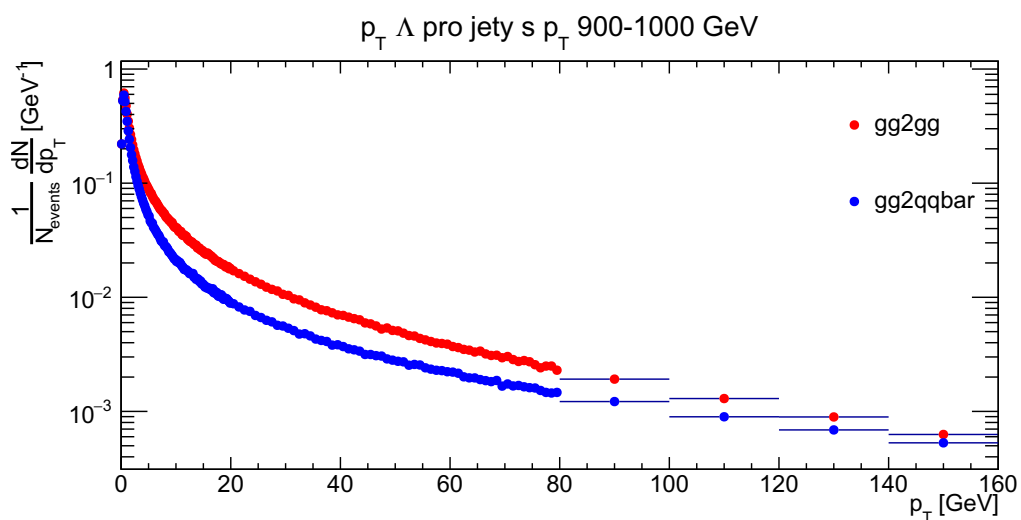
Obrázek 4.26: Příčná hybnost pro n při 100-200 GeV



Obrázek 4.27: Příčná hybnost pro n při 900-1000 GeV



Obrázek 4.28: Příčná hybnost pro  $\Lambda$  při 100-200 GeV



Obrázek 4.29: Příčná hybnost pro  $\Lambda$  při 900-1000 GeV



# Závěr

Po zkoumání popsaném v předchozí kapitole můžeme tvrdit, že pro zkoumání jetů jsou vhodnější události s vyšší hybností, jelikož při navyšování příčné hybnosti událostí dochází k větší tvorbě částic právě v jetech, zatímco množství částic v pozadí zůstává de facto neměnné. Navíc částice v jetech mají nižší pseudorapiditu, neboli se více odchyľují od osy svazku. Takové částice se pak mnohem lépe zkoumají, protože nemohou utéct podél svazku místem, kde by je detektor nemohl zachytit.

Dalším pozorováním je, že pozadí i jety jsou tvořeny převážně stejnými částicemi, a to nejvíce piony, následně kaony, protony, neutrony a baryony lambda. Dalším zajímavým závěrem je, že gluonové jety se od kvarkových liší. Gluonové jety mají větší multiplicitu. Tato zvýšená multiplicita se projevovala u všech zkoumaných částic. U kaonů, protonů a neutronů, existovaly rozdíly v závislosti na tom, zda jsou nabitě či nikoliv, a to ve formě větší multiplicity ve prospěch částic nabitých. Navíc u pionů byl pozorován jev opačný.

Poslední zkoumanou vlastností byly příčné hybnosti. Opět byly pozorovány rozdíly mezi kvarkovými a gluonovými jety. A to takové, že gluonové jety mají více částic s nižší hybností než 20 GeV. S dále rostoucí příčnou hybností klesají počty mnohem rychleji než u kvarkových jetů.

Při zkoumání rozdílů rozložení příčných hybností pro jednotlivé částice nebyly objeveny, až na některé spekulativní detaily rozdíly, které by nekopírovaly rozložení pro všechny částice dohromady. Existují-li zde už nějaké rozdíly, nejedná se o statisticky významný jev.

# Seznam použité literatury

- [1] Vnitřní detektor. URL <https://www.semanticscholar.org/paper/Alignment-of-the-ATLAS-Inner-Detector-Upgraded-for-Pena/644545987a31bad4ee6544f7374a8435c29bc48c>.
- [2] Schématická ukázka urychlovačů. URL <http://jakub.serych.cz/book/export/html/40>.
- [3] Standardní model částic. URL [https://en.wikipedia.org/wiki/Standard\\_Model#/media/File:Standard\\_Model\\_of\\_Elementary\\_Particles.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Standard_Model#/media/File:Standard_Model_of_Elementary_Particles.svg).
- [4] Atlas. URL <https://atlas.cern/discover/detector>.
- [5] Gyroradius. URL <https://en.wikipedia.org/wiki/Gyroradius>.
- [6] Historie standardního modelu. URL <http://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/~horejsi/popular/smodel2.pdf>.
- [7] Atlas. URL <https://home.cern/science/experiments/atlas>.
- [8] Vývoj jetu. URL [https://www-d0.fnal.gov/phys\\_id/jes/public/plots\\_v7.1/index.html](https://www-d0.fnal.gov/phys_id/jes/public/plots_v7.1/index.html).
- [9] Calorimeter. URL <https://atlas.cern/discover/detector/calorimeter>.
- [10] Řez kalorimetrem. URL [https://www.researchgate.net/figure/Cut-away-view-of-the-ATLAS-calorimeters-The-LAr-calorimeters-are-seen-inside-fig1\\_230918118](https://www.researchgate.net/figure/Cut-away-view-of-the-ATLAS-calorimeters-The-LAr-calorimeters-are-seen-inside-fig1_230918118).
- [11] Accelerators. URL <https://home.cern/science/accelerators>.
- [12] Experiments. URL <https://home.cern/science/experiments>.
- [13] Magnet system. URL <https://atlas.cern/discover/detector/magnet-system>.
- [14] Pythia manual. URL <http://home.thep.lu.se/~torbjorn/pythia82html/Welcome.html>.
- [15] Muon spectrometer. URL <https://atlas.cern/discover/detector/magnet-system>.
- [16] Grafické znázornění pseudorapidity. URL [https://en.wikipedia.org/wiki/Pseudorapidity#/media/File:Pseudorapidity\\_plot.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Pseudorapidity#/media/File:Pseudorapidity_plot.svg).
- [17] Pythia home page. URL <http://home.thep.lu.se/~torbjorn/Pythia.html>.
- [18] Heavy ions and quark-gluon plasma. URL <https://home.cern/science/physics/heavy-ions-and-quark-gluon-plasma>.

- [19] Vznik qgp při srážkách těžkých iontů. URL [https://ojs.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/lhc/vytrysky\\_LHC.htm](https://ojs.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/lhc/vytrysky_LHC.htm).
- [20] ATLAS COLLABORATION (2013). Measurement of the jet radius and transverse momentum dependence of inclusive jet suppression in lead-lead collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV with the ATLAS detector. *Phys. Lett.*, **B719**, 220–241. doi: 10.1016/j.physletb.2013.01.024.
- [21] ATLAS COLLABORATION (2014). Light-quark and gluon jet discrimination in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS detector. *Eur. Phys. J.*, **C74** (8), 3023. doi: 10.1140/epjc/s10052-014-3023-z.
- [22] FABIAN HUEGGING (2006). The ATLAS Pixel Detector. *IEEE Trans.Nucl.Sci.*, pages 1732–1736. doi: 10.1140/epjc/s10052-014-3023-z.
- [23] GALLICCHIO, J. a SCHWARTZ, M. D. (2011). Quark and Gluon Tagging at the LHC. *Phys. Rev. Lett.*, **107**, 172001. doi: 10.1103/PhysRevLett.107.172001.
- [24] GRANT GORFINE (2009). Alignment of the ATLAS Inner Detector Tracking System. *eConf C090726*.
- [25] GUANG-YOU QIN, XIN-NIAN WANG (2015). Jet quenching in high-energy heavy-ion collisions.
- [26] JEFF GREENSITE, KAZUE MATSUYAMA (2018). On the distinction between color confinement, and confinement. *Quark Confinement and the Hadron Spectrum XIII conference*.
- [27] SPOUSTA, M. a COLE, B. (2016). Interpreting single jet measurements in Pb + Pb collisions at the LHC. *Eur. Phys. J.*, **C76**(2), 50. doi: 10.1140/epjc/s10052-016-3896-0.
- [28] TORBJÖRN SJÖSTRAND, STEPHEN MRENNNA, PETER SKANDS (2007). A Brief Introduction to PYTHIA 8.1. *Fermilab Technical Publications*. URL <https://arxiv.org/pdf/0710.3820.pdf>.

# Seznam obrázků

1.1	Standardní model elementárních částic . . . . .	3
1.2	Grafické znázornění barevného náboje. Vlevo barvy označené R - červená, G - zelená, B - modrá, s pruhem označení antibarvy. Nahoře hadron (vlevo částice, vpravo antičástice). Dole tři možnosti jak barevně poskládat mezony. [2] . . . . .	5
1.3	Vznik kvark gluonového plasmatu při srážkách těžkých iontů. [19]	6
1.4	Vývoj jetu [8] . . . . .	7
2.1	Schématická ukázka urychlovačů [2] . . . . .	9
2.2	Detektor Atlas [4] . . . . .	10
2.3	Grafické znázornění vnitřního detektoru. IBL - Insertable B-Layer, Pixels - The Pixel Detector, SCT - Semi-Conductor Tracker, TRT - Transition Radiation Tracker [1] . . . . .	11
2.4	Grafické znázornění kalorimetru. [10] . . . . .	12
4.1	Porovnání multiplicít hadronů pro gluonové a kvarkové jety při 100-200 GeV . . . . .	16
4.2	Porovnání multiplicít hadronů pro gluonové a kvarkové jety při 900-1000 GeV . . . . .	16
4.3	Porovnání multiplicít hadronů pro gluonové jety při 100-200 GeV	17
4.4	Porovnání multiplicít hadronů pro kvarkové jety při 100-200 GeV	17
4.5	Porovnání multiplicít hadronů pro gluonové jety při 900-1000 GeV	18
4.6	Porovnání multiplicít hadronů pro kvarkové jety při 900-1000 GeV	18
4.7	Grafické znázornění pseudorapidit [16] . . . . .	19
4.8	Pseudorapidita pro gluonové a kvarkové jety při 100-200 GeV . . .	20
4.9	Pseudorapidita pro gluonové a kvarkové jety při 900-1000 GeV . .	20
4.10	Pseudorapidita pro gluonové jety při 100-200 GeV . . . . .	20
4.11	Pseudorapidita pro kvarkové jety při 100-200 GeV . . . . .	21
4.12	Pseudorapidita pro gluonové jety při 900-1000 GeV . . . . .	21
4.13	Pseudorapidita pro kvarkové jety při 900-1000 GeV . . . . .	21
4.14	Příčná hybnost pro gluonové a kvarkové jety při 100-200 GeV . . .	22
4.15	Příčná hybnost pro gluonové a kvarkové jety při 900-1000 GeV . .	23
4.16	Příčná hybnost pro $\pi^0$ při 100-200 GeV . . . . .	23
4.17	Příčná hybnost pro $\pi^0$ při 900-1000 GeV . . . . .	24
4.18	Příčná hybnost pro $\pi^\pm$ při 100-200 GeV . . . . .	24
4.19	Příčná hybnost pro $\pi^\pm$ při 900-1000 GeV . . . . .	24
4.20	Příčná hybnost pro $K^0$ při 100-200 GeV . . . . .	25
4.21	Příčná hybnost pro $K^0$ při 900-1000 GeV . . . . .	25
4.22	Příčná hybnost pro $K^\pm$ při 100-200 GeV . . . . .	26
4.23	Příčná hybnost pro $K^\pm$ při 900-1000 GeV . . . . .	26
4.24	Příčná hybnost pro p při 100-200 GeV . . . . .	26
4.25	Příčná hybnost pro p při 900-1000 GeV . . . . .	27
4.26	Příčná hybnost pro n při 100-200 GeV . . . . .	27
4.27	Příčná hybnost pro n při 900-1000 GeV . . . . .	27
4.28	Příčná hybnost pro $\Lambda$ při 100-200 GeV . . . . .	28

4.29 Příčná hybnost pro $\Lambda$ při 900-1000 GeV . . . . .	28
--	----