

Univerzita Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach

Prírodovedecká fakulta

ŠTÚDIUM VLASTNOSTÍ KVARKOVÝCH A GLUÓNOVÝCH JETOV V HADRÓNOVÝCH ZRÁŽKACH

ŠVK PRÁCA

Študijný odbor:	4.1.1. Fyzika
Školiace pracovisko:	Ústav fyzikálnych vied
Vedúci záverečnej práce:	RNDr. Marek Bombara, PhD.
Konzultant:	RNDr. Martin Vaľa, PhD.

Košice 2016

Lucia Anna Husová

Pod'akovanie

Na tomto mieste sa chcem pod'akovať vedúcemu mojej práce RNDr. Marekovi Bombarovi, PhD. za odborné rady a osobný prístup. Taktiež sa chcem pod'akovať konzultantovi RNDr. Martinovi Vaľovi, PhD. za technickú a softvérovú pomoc. Taktiež sa chcem pod'akovať priateľovi Martinovi a rodičom za osobnú podporu.

Abstrakt

Jednou z vlastností, ktorou sa líšia kvarkové a gluónové jety je zvýšená produkcia baryónov v gluónových jetoch. Cieľom tejto vedeckej práce bolo overiť, či je zvýšená produkcia baryónov v gluónových jetoch nameraná experimentom OPAL implementovaná v Monte Carlo generátore PYTHIA. Vo vygenerovaných dátach sme skúmali produkciu baryónov a mezónov a ich pomery k celkovému počtu finálnych nabitých hadrónov, ako aj produkciu častíc Λ a K_S^0 . Z výsledkov vyplýva, že daný výsledok je implementovaný v generátore PYTHIA. V druhej časti práce boli porovnávané vlastnosti kvarkových a gluónových jetov metódou dvojčasticových korelácií.

Abstract

One of the property, which can separate quark from gluon jets, is increased production of baryons in gluon jets. The purpose of this scientific work was to confirm, if the increased production of baryons in gluon jets, which was measured by the OPAL experiment, is implemented in the Monte Carlo generator PYTHIA. The production of baryons and mesons and their ratios to final charged hadrons, as well as the production of Λ and K_S^0 was studied in the generated data. The results show that this process is implemented in PYTHIA. In the second part of the thesis, the properties of quark and gluon jets were analysed via two-particle correlation method.

Obsah

Zoznam skratiek a značiek	6
Úvod	7
1 Kvantová chromodynamika	8
1.1 Farebný náboj	8
1.2 Asymptotická sloboda	9
1.3 Jety	10
1.3.1 Lundský strunový model	11
1.3.2 Kvarkové a gluónové jety	12
2 Výsledky experimentu OPAL	14
2.1 Analýza založená na energii	14
2.2 Analýza Y-ových prípadov	15
2.3 Výsledky	15
3 Experiment ALICE	17
4 Ciele práce	19
5 Metóda merania	20
5.1 ROOT	20
5.2 PYTHIA	20
5.2.1 Fyzikálne modely	20
5.3 Nastavenia generátora PYTHIA použité pri analýze	21
5.4 Hľadanie jetov	22
5.5 Metóda dvojčasticových korelácií	23

6	Výsledky	24
6.1	Porovnanie produkcie baryónov a mezónov v kvarkových a gluónových jetoch v generátore PYTHIA	24
6.2	Porovnanie produkcie nabitých baryónov a mezónov v kvarkových a gluónových jetoch v generátore PYTHIA8	26
6.3	Porovnanie produkcie Λ a K^0 v kvarkových a gluónových jetoch v generátore PYTHIA8	28
6.4	Porovnanie kvarkových a gluónových jetov pomocou dvojčasticových korelácií	30
7	Diskusia	36
	Záver	37

Zoznam skratiek a značiek

LHC - Large Hadron Collider

CERN - Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire

ŠM - Štandardný model

QGP - Kvarkovo-gluónová plazma

ALICE - A Large Ion Collider Experiment

SLAC - Stanford Linear Accelerator Center

QCD - Kvantová chromodynamika

QED - Kvantová elektrodynamika

LHCb - Large Hadron Collider beauty experiment

GeV - gigaelektrónvolt

LEP - Large Electron-Positron Collider

OPAL - Omni-Purpose Apparatus at LEP

c - rýchlosť svetla vo vákuu

m^3 - meter kubický

TeV - teraelektrónvolt

p_T - priečna hybnosť; $p_T = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$

φ - azimutálny uhol

η - pseudorapidita; $\eta = -\ln \tan \frac{\theta}{2}$

α_S - konštanta silnej interakcie

Úvod

Ani v súčasnej dobe nevieme vysvetliť množstvo fundamentálnych otázok, preto si fyzika vysokých energií stále udržuje primát jednej z najaktívnejších oblastí fyziky. Na tento účel bol postavený najväčší urýchľovač častíc LHC v CERNe, ktorý nie je zameraný len na štúdium novej fyziky, ale aj na potvrdenie ŠM. Na LHC sa okrem protónovo-protónových zrážok sa skúmajú aj zrážky jadier olova, pri ktorých sa vytvára QGP, o ktorej sa predpokladá, že tvorila Vesmír tesne po Veľkom tresku. Jej vplyv na prechod partónov s rôznym farebným nábojom nebol doteraz podrobnejšie preskúmaný.

Vo fyzike vysokých energií hrajú dôležitú úlohu aj takzvané generátory zrážok. Sú nenahraditeľné pri štúdiu účinnosti detektorov v experimentoch vo fyzike vysokých energií. Najpoužívanejším Monte Carlo generátorom je PYTHIA, ktorej najnovšia verzia by mala obsahovať aj aktuálne výsledky z LHC. PYTHIA je používaná všetkými štyrmi veľkými experimentami na LHC.

V tejto práci chceme pomocou dát vygenerovaných generátorom PYTHIA načrtnúť metódu, ako by sa dali rozlíšiť partóny na základe náboja. Taktiež chceme navrhnúť spôsob, ktorým by bolo možné merať vplyv QGP na prechádzajúce partóny v podmienkach experimentu ALICE.

Kapitola 1

Kvantová chromodynamika

Po objave vnútornej štruktúry protónov v 60-tych rokoch minulého storočia v laboratóriu SLAC bolo potrebné vytvoriť teoretický model popisujúci správanie sa novoobjavených častíc - partónov, ktoré boli neskôr priradené k teoreticky predpovedaným kvarkom a gluónom. Na pochopenie interakcie medzi partónmi vznikla kvantová chromodynamika (QCD), ktorá bola sformulovaná podobne ako staršia kvantová elektrodynamika (QED). V QED je zdrojom vzájomného pôsobenia elektrický náboj. Jeho analógiou v QCD je farebný náboj ako zdroj silnej interakcie, ktorý môže nadobúdať šesť stavov (modrý, červený, zelený, antimodrý, antičervený, antizelený) ¹.

1.1 Farebný náboj

Farba, ako nové kvantové číslo, bola zavedená kvôli Pauliho vylučovaciemu princípu, ktorý hovorí, že fermióny (častice s polčíselným spinom) v jednom kvantovo-mechanickom systéme nemôžu mať všetky kvantové čísla rovnaké. Vedelo sa o existencii častíc, ktoré sa skladajú z kvarkov s rovnakými kvantovými číslami (napr. Δ^{++} (uuu) alebo Ω^- (sss)). Ponúkalo sa niekoľko vysvetlení:

- Neplatí Pauliho vylučovací princíp.
- Kvarky nie sú fermióny, ale bozóny s celočíselným spinom.
- Existuje ďalšie kvantové číslo.

Ukázalo sa, že zavedením nového kvantového čísla, farby, sa vlnová funkcia kvantovo-mechanického systému stáva opäť antisymetrickou a tým pádom zostáva platný Pauliho

¹označenia farebného náboja nesúvisia s farbami viditeľnej časti elektromagnetického spektra

vylučovací princíp [1]:

$$\Psi_{TOTAL} = \Psi_{SPACE} * \Psi_{SPIN} * \Psi_{FLAVOUR} * \Psi_{COLOUR} \quad (1.1)$$

Pri zohľadnení farebného náboja vo výpočtoch pre účinné prierezy zrážok, sa vypočítané hodnoty zhodujú s experimentálne nameranými.

Farebný náboj však nenesú len samotné kvarky, ale aj nosiče silnej interakcie - gluóny, ktoré sú dvojfarebné (sú nosičom farby a antifarby). Preto môžu interagovať ako s kvarkami, tak aj so sebou navzájom. Jedným z dôsledkov tejto vlastnosti je, že farebné častice nemôžu existovať ako voľné častice.

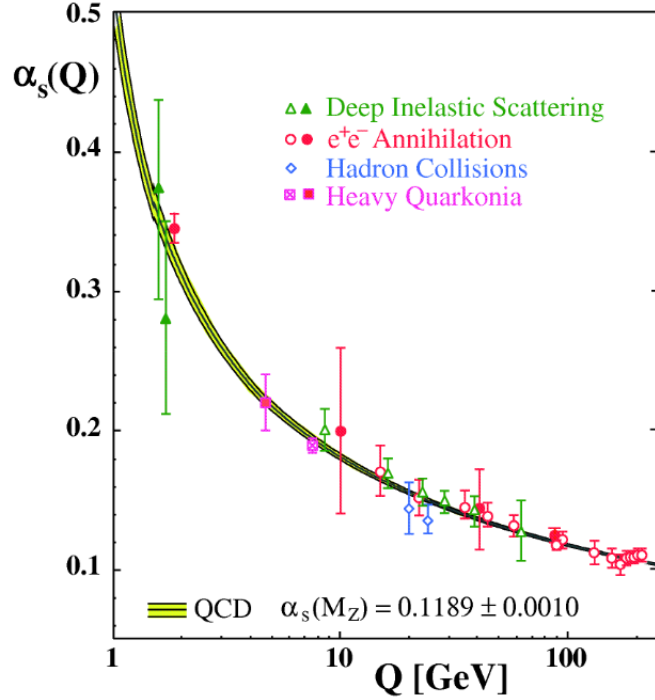
Z experimentov sa zistilo, že v prírode existujú iba špeciálne multiplety kvarkov tvoriacich hadróny. Najjednoduchším antisymetrickým multipletom je singlet, ktorý je navonok bezfarebný. Všetky doteraz pozorované voľné častice sú navonok bezfarebné. Sú to:

- mezóny - kombinácia farby a antifarby ($q\bar{q}$)
- baryóny - kombinácia troch rôznych farieb (qqq) a antibaryóny - kombinácia troch rôznych antifarieb ($\bar{q}\bar{q}\bar{q}$)
- exotické stavy - tetrakvarky ($q\bar{q}q\bar{q}$), pozorované v apríli 2014 [16] a pentakvarky ($qqqq\bar{q}$), pozorované v júli 2015 na experimente LHCb [2]

1.2 Asymptotická sloboda

Ďalšia vlastnosť QCD, ktorá je dôsledkom samointerakcie medzi gluónmi, je asymptotická sloboda. Veľkosť náboja v silnej, ale aj elektromagnetickej interakcie závisí od vzdialenosti, z ktorej sa na ňu pozeráme. Pri štúdiu elektromagnetickej interakcie na veľmi malých vzdialenostiach nemožno zanedbávať kvantovo-mechanické efekty, ako je napr. polarizácia vákua. V okolí elektrónu sa vytvoria virtuálne páry elektrónov a pozitronov a kvôli ich orientácii vznikne v okolí pôvodného elektrónu oblak kladného náboja. Z tohto dôvodu pri väčších vzdialenostiach nameriame tzv. "renormalizovaný" elektrický náboj, ktorý má menšiu hodnotu ako pôvodný čistý náboj.

Podobný proces nastáva aj pri silnej interakcii. V okolí farebne nabitého kvarku sa vytvárajú páry kvark-antikvark a gluóny. Na rozdiel od elektromagnetickej interakcie, kde fotóny na seba navzájom nepôsobia, gluóny na seba pri silnej interakcii pôsobia. To vedie k tomu, že sila silnej interakcie sa so zväčšujúcou vzdialenosťou zväčšuje



Obr. 1.1: Závislosť konštanty silnej interakcie α_s od energie jednotlivých procesov Q [3]

(asymptotická sloboda). Na malých vzdialenostiach môžeme povedať, že silná interakcia asymptoticky zaniká, aj keď je stále väčšia ako elektromagnetická, a z kvarkov a gluónov sa z pohľadu silnej interakcie stávajú voľné častice.

Táto vlastnosť sa tiež prejavuje pri vysokoenergetických nepružných zrážkach. Čím majú zrážajúce sa častice vyššiu hybnosť, tým je silná interakcia pôsobiaca medzi nimi slabšia. (Obr. 1.1)

1.3 Jety

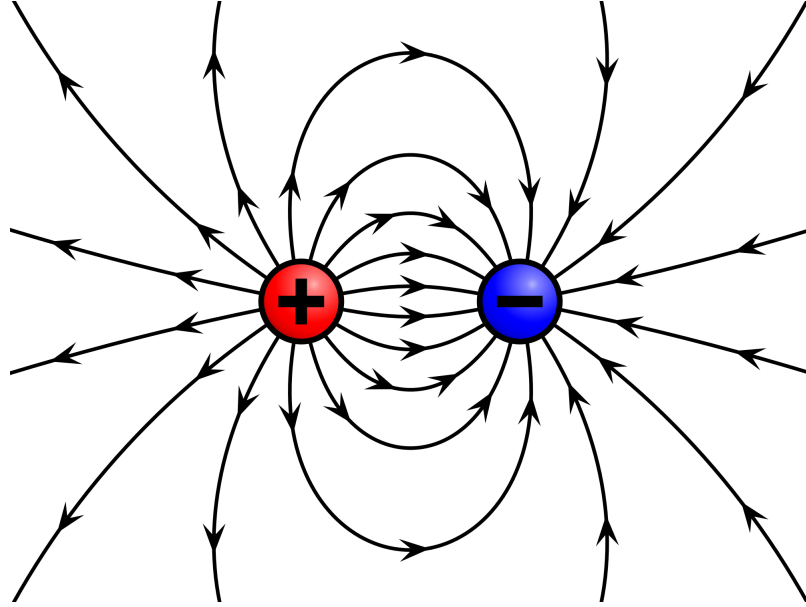
Kvôli zvyšujúcej sa sile silnej interakcie so zväčšujúcou sa vzdialenosťou sú kvarky a gluóny uväznené vnútri hadrónov, a teda nemôžeme pozorovať vlastnosti kvarkov a gluónov priamo. Pri udelení dostatočnej energie partónu v hadróne sa táto energia premení na spršku hadrónov (tzv. jet) v jednom smere obsahujúcu hadrón obsahujúci pôvodný partón. V experimentoch je jet definovaný ako skupina energetických hadrónov pohybujúcich sa v jednom smere, ktoré sú ohraničené kužeľom so stredom určeným smerom pohybu originálneho partónu (tzv. jet axis) a s polomerom R :

$$R = \sqrt{\Delta\phi^2 + \Delta\eta^2} < 1 \quad [4] \quad (1.2)$$

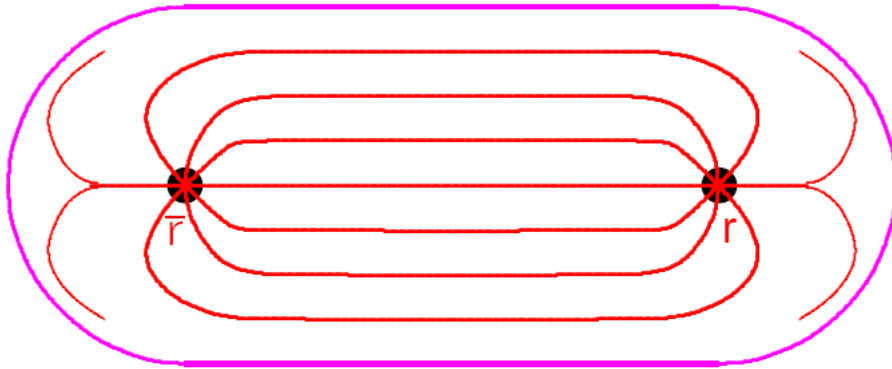
1.3.1 Lundsý strunový model

Pre potenciál viazaného stavu kvarku a antikvarku platí:

$$V(r) \approx -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s}{r} + \kappa r \approx -\frac{0.13}{r} + r \quad [5] \quad (1.3)$$



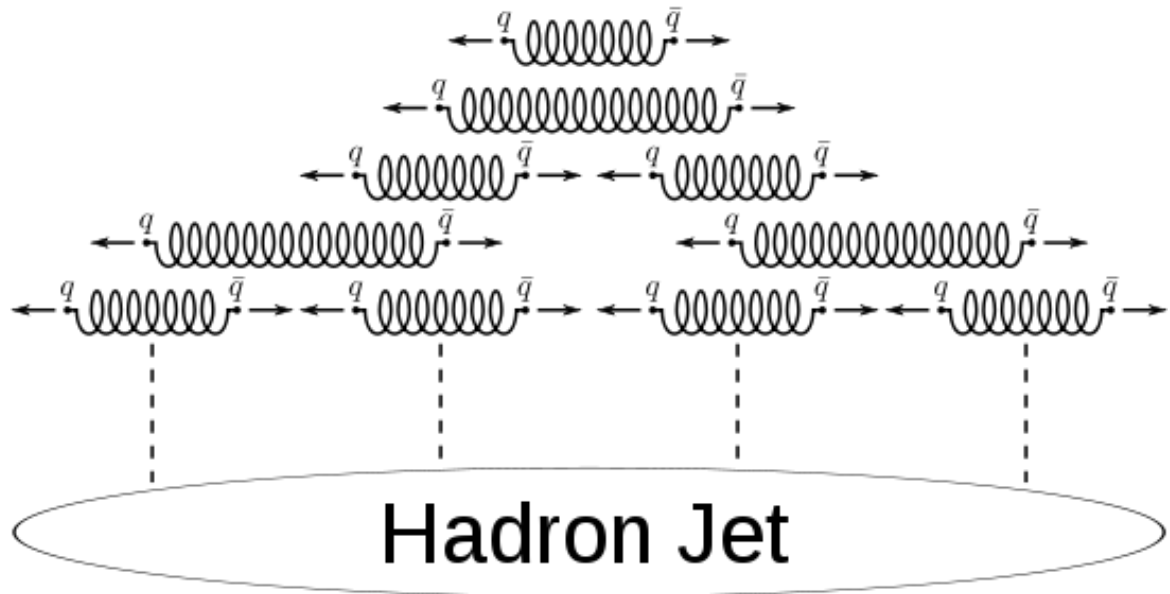
Obr. 1.2: Siločiarý elektrického poľa sa od seba so zväčšujúcou sa vzdialenosťou vzdávajú. [6]



Obr. 1.3: Siločiarý chromodynamického poľa sa k sebe so zväčšujúcou sa vzdialenosťou približujú. [7]

Na veľmi malých vzdialenostiach ($r \rightarrow 0$) prevláda potenciál Coulombovského poľa (Obr. 1.2). Pri vzájomnom vzdáľovaní sa kvarkov začne prevládať lineárna časť potenciálu a na rozdiel od elektromagnetického poľa sa kvôli samointerakcii gluónov budú siločiarý k sebe približovať a vytvoria tvar podobný trubici (Obr. 1.3).

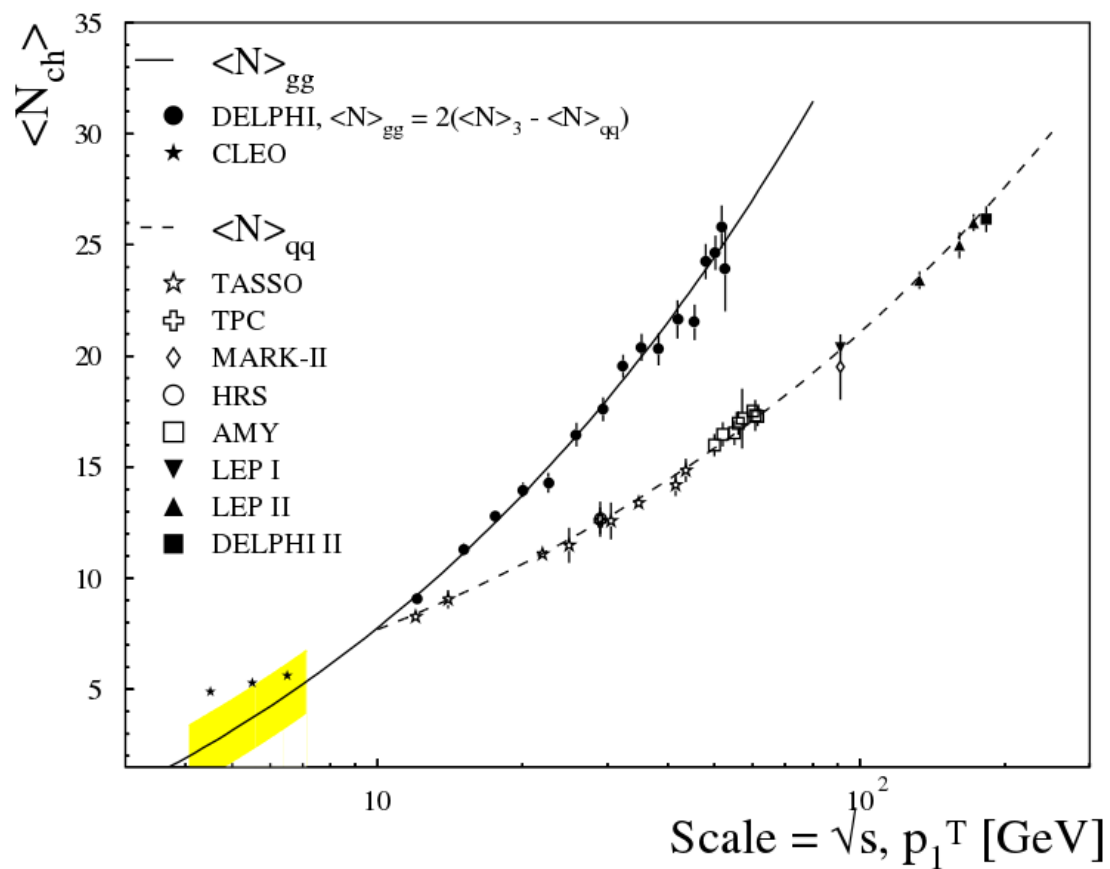
Práca vykonaná na oddelenie kvarkov sa mení na energiu poľa. Ak je vzdialenosť medzi týmito dvoma kvarkami dostatočujúca, z energie poľa sa vytvorí nový pár častíc kvark-antikvark (Obr. 1.4).



Obr. 1.4: Tvorba jetu pripomína trhanie struny. [8]

1.3.2 Kvarkové a gluónové jety

Výsledky experimentov ukazujú, že vlastnosti jetov sa líšia podľa toho, z akého partónu jet vznikol. Kvarkové a gluónové jety sa líšia v multiplicitate [14], šírke jetu a v produkcii finálnych mezónov a baryónov [9]. Jety, ktoré vznikli z gluónov, majú vo všeobecnosti väčšiu multiplicitu (Obr. 1.5) a sú širšie. Ako je podrobnejšie uvedené v nasledujúcej kapitole, v gluónových jetoch sa vytvára väčšie množstvo baryónov ako v kvarkových, pričom produkcia mezónov je približne rovnaká.



Obr. 1.5: Porovnanie priemernej multiplicity nabitých hadrónov v kvarkových a gluónových jetoch v rôznych experimentoch v závislosti od energie [14].

Kapitola 2

Výsledky experimentu OPAL

Na experimente OPAL na urýchľovači LEP boli pozorované rozdiely medzi produkciou baryónov a mezónov v gluónových a kvarkových jetoch, ktoré vznikli pri zrážkach elektrónu a pozitronu pri energii 90 GeV. Ako reprezentanti mezónov a baryónov boli zvolené K_S^0 a Λ . Sledované boli relatívne zastúpenia K_S^0 a Λ ku všetkým nabitým časticiam v jete, t.j. boli porovnávané veličiny: $R^{K_S^0} = n_{K_S^0}/n_{ch}$ a $R^\Lambda = n_\Lambda/n_{ch}$ pre kvarkové a gluónové jety.

Tieto veličiny boli porovnávané pre dve rôzne metódy: analýzu založenú na energii jetov a analýzu Y-ových prípadov. Pre prvú spomínanú analýzu bola použitá štatistika 2.8 milióna prípadov a pre druhú 4.2 miliónov prípadov [9]. V oboch analýzach boli reprezentačné častice rekonštruované z ich rozpadových kanálov: $K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ a $\Lambda \rightarrow \pi^-p$ s minimálnou hybnosťou väčšou ako 0.150 GeV/c pre K_S^0 a 0.520 GeV/c pre Λ . Pozadie určené pomocou fitu bolo odčítané.

2.1 Analýza založená na energii

Boli vybrané 3 vzorky trojjetových prípadov s rôznou priemernou topológiu. Najviac prípadov bolo získaných pomocou k_T algoritmu [13] s parametrom $y_{cut} = 0.0005$. Pre druhý výber bolo nastavené okno s y medzi hodnotami 0.008 a 0.016. Ako trojjetový prípad bol potom vybratý taký, ktorý mal hodnotu y_{cut} vrámci tohto okna. Tretia vzorka bola vyberaná na základe metódy "jet cone finder" s parametrami $R=0.7$ a $\varepsilon = 7$ GeV, kde ε je minimálna energia jetu. Parametre boli zvolené na základe simulácií Monte Carlo.

V každom jete sa museli nachádzať minimálne dve nabité dráhy, ktoré mali energiu viac ako 5 GeV a ležali v oblasti $|\cos\theta| < 0.9$. Súčet uhlov medzi všetkými jetmi mal

byť väčší ako 358° a uhol medzi menej energetickými jetmi musel byť väčší ako 30° [9]. Na ďalšiu analýzu bolo podľa týchto kritérií vybratých 500 000 trojjetových prípadov. Kvarkové a gluónové jety boli odlíšené na základe Monte Carlo simulácií.

2.2 Analýza Y-ových prípadov

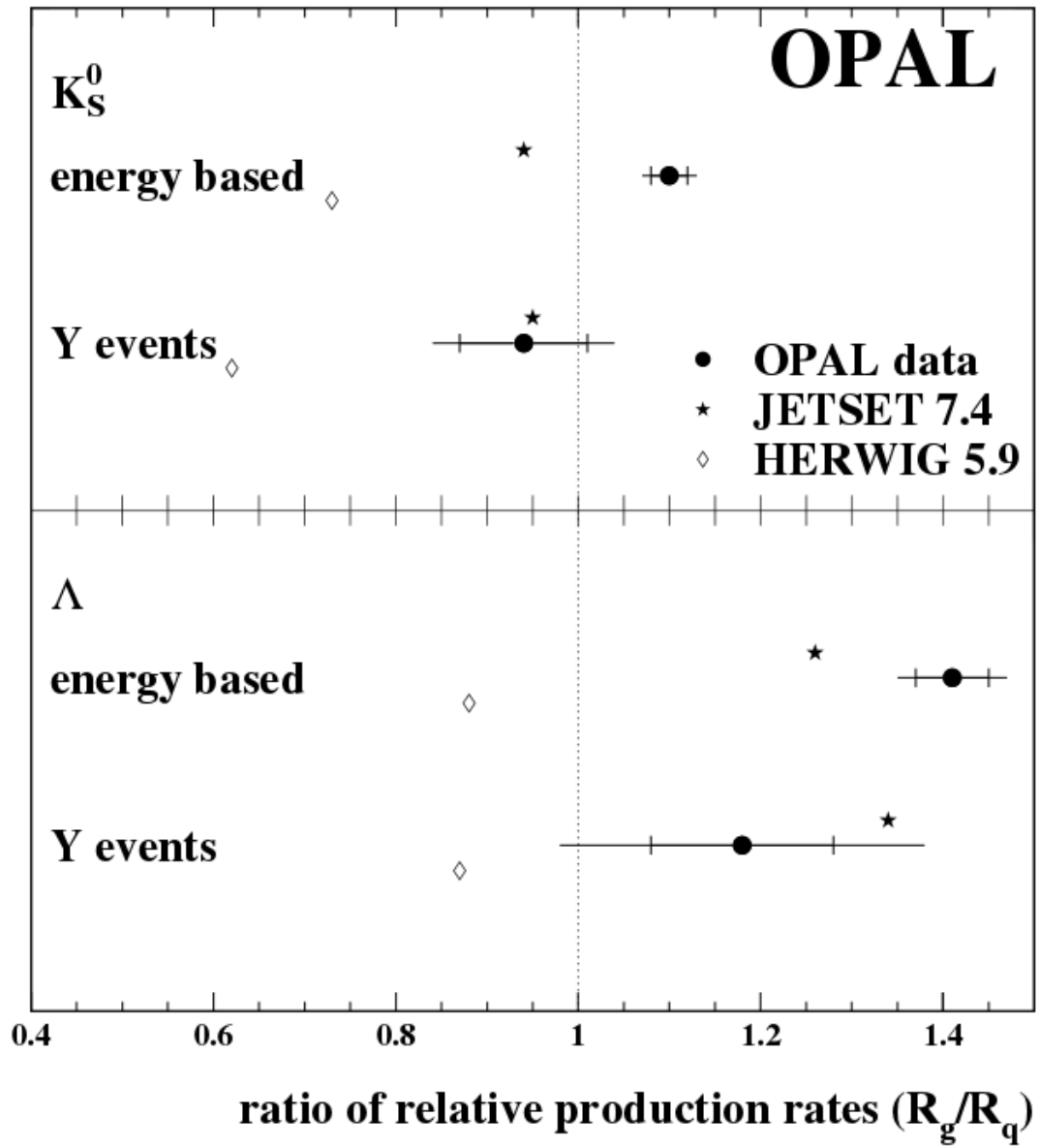
Pre túto analýzu bol taktiež definovaný "cone jet finder" aplikovaný na všetky častice s parametrom $R = 30^\circ$ a minimálnou energiou jetu $\varepsilon = 5 \times E_{vis}/\sqrt{s}$ GeV, kde \sqrt{s} je energia zrážky v centrálnej sústave a E_{vis} je súčet energií častíc.

Každý jet v takto vybraných prípadoch musel obsahovať minimálne dve častice v oblasti $|\cos\theta| < 0.9$ a súčet uhlov medzi jetmi mal byť väčší ako 358° . Pri symetrických prípadoch bolo vyžadované, aby bol uhol medzi jetom s najvyššou energiou a ostatnými jetmi v intervale $150^\circ \pm 10^\circ$.

Podľa radiačného spektra gluónov je s vysokou pravdepodobnosťou jet s najvyššou energiou kvarkový. Potom, ak je jeden s jetov s nižšou energiou identifikovaný ako kvarkový, druhý musí byť gluónový. V tejto analýze bola predstavená aj nová metóda identifikovania kvarkových jetov, ktoré podľa nej majú veľký podiel energie jetu v blízkosti jeho osi. V kvarkových jetoch je väčšia časť energie sústredená v blízkosti osi jetu ako v gluónových a teda kvarkové jety sú teda užšie ako gluónové.

2.3 Výsledky

Štúdie kvarkových a gluónových jetov v symetrických prípadoch ukazujú, že gluónové jety sú širšie. Z analýzy založenej na energii pre relatívne počty K_S^0 a Λ vyplynulo, že $R_g^{K_S^0}/R_q^{K_S^0} = 1.10 \pm 0.04 \pm 0.04$ a $R_g^\Lambda/R_q^\Lambda = 1.41 \pm 0.04 \pm 0.04$, kde prvá chyba je štatistická a druhá systematická. V analýze "Y-prípadov" sa zistilo, že $R_g^{K_S^0}/R_q^{K_S^0} = 0.94 \pm 0.07 \pm 0.07$ a $R_g^\Lambda/R_q^\Lambda = 1.18 \pm 0.10 \pm 0.17$ [9]. Výsledky sú zobrazené na Obr. 2.6.



Obr. 2.6: Podiel relatívnej produkcie K_S^0 a Λ v kvarkových a gluónových jetoch pre obe analýzy ("energy based" a "Y events"). [9]

Kapitola 3

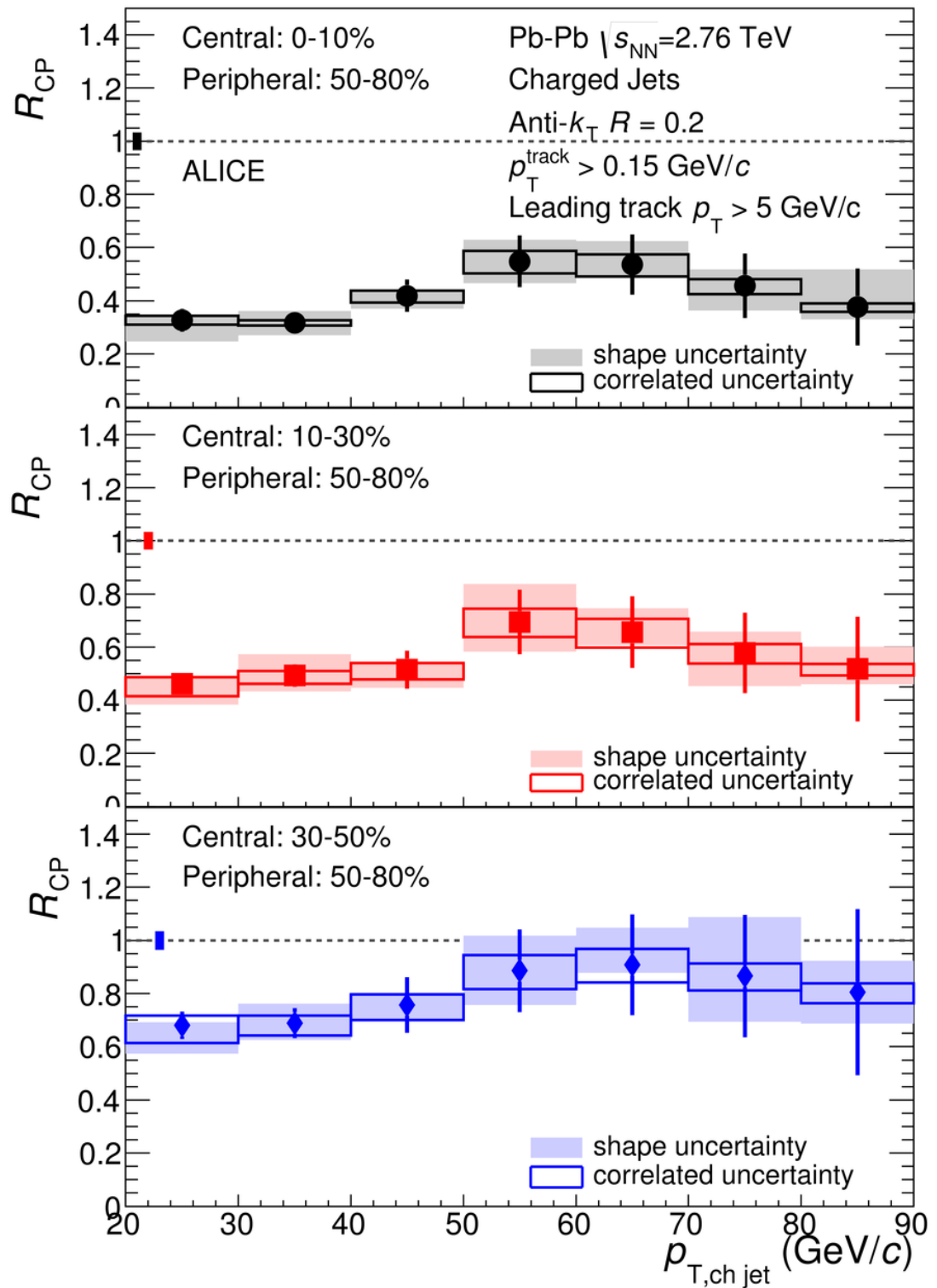
Experiment ALICE

ALICE (z anglického A Large Ion Collider Experiment – experiment na veľkom iónovom zrážači) je jedným z experimentov na LHC v CERNe. Zameriava sa najmä na výskum hmoty vznikajúcej v zrážkach ultrarelativistických ťažkých iónov, v ktorých vzniká partónová hmota. Tvorí ju kvarky a gluóny, ktoré nie sú viazané v hadrónoch, ale môžu sa voľne pohybovať v rámci systému. Táto hmota sa svojimi vlastnosťami podobá na teoreticky predpovedanú QGP, ktorou bol tvorený vesmír tesne po Veľkom Tresku. V podmienkach LHC to zodpovedá približne 1 miliardtine sekundy veku Vesmíru.

Detektor ALICE umožňuje detekciu častíc pri zrážkach protón - protón, ale predovšetkým umožňuje štúdium zrážok olovo - olovo pri extrémnych podmienkach (vysoká teplota, tlak a energia). Jeho rozmery dosahujú $16 \times 16 \times 26 \text{ m}^3$ s váhou približne 10,000 ton [15].

Jednou z výskumných oblastí experimentu ALICE je aj štúdium jetov a vplyv kvarkovo-gluónovej plazmy na vlastnosti jetov, ktoré ňou prešli (Obr. 3.7).

Na experimente doteraz neboli merané a porovnávané vlastnosti kvarkových a gluónových jetov. Je to spôsobené najmä vysokým pozadím, keďže v rámci jednej zrážky je zrekonštruovaných aj niekoľko 1000 hadrónov.



Obr. 3.7: Závislosť jadrového modifikačného koeficientu R_{CP} od hybnosti jetu. [17]

Kapitola 4

Ciele práce

- Osvojiť si prácu s analyzačným balíkom ROOT a jeho funkciami.
- Oboznámiť sa s Monte Carlo generátorom PYTHIA.
- Zistiť, či sú výsledky experimentu OPAL implementované v generátore PYTHIA.
- Študovať kvarkové a gluónové jety pomocou metódy dvojčasticových korelácií.

Kapitola 5

Metóda merania

5.1 ROOT

ROOT je softvérový balík napísaný v objektovo orientovanom programovacom jazyku C++. Užívateľovi poskytuje veľký počet funkcionalít spojených so spracovávaním množstva dát, napr. histogramy, funkcie pre štatistickú analýzu a vizualizáciu, bohatý matematický aparát. Užívateľ má taktiež možnosť vytvorenia vlastných tried a knižníc vhodných na jednotlivé analýzy. ROOT je možno prepojiť s už existujúcimi programovacími jazykmi, ako sú Python, R a Mathematica [12].

5.2 PYTHIA

PYTHIA je Monte Carlo generátor vysokoenergetických zrážok elementárnych častíc široko použiteľný vo fyzike vysokých energií [11]. Súčasná verzia PYTHIA8 je napísaná v jazyku C++, pričom staršie verzie (PYTHIA6.x) boli napísané v jazyku Fortran 77. Jej terajšia verzia je výsledkom viac ako 35-ročného vývoja. PYTHIA je sama o sebe použiteľná na fyzikálny výskum a je prepojitelná aj s inými programami ako sú AlpGen, MadGraph, ROOT a iné. Jej aktuálna verzia by mala obsahovať aj najnovšie poznatky a experimentálne výsledky fyziky vysokých energií.

5.2.1 Fyzikálne modely

PYTHIA obsahuje viacero fyzikálnych modelov od vývoja zrážky až po finálne stavy obsahujúce veľké množstvo častíc. Niektoré modely boli založené na fyzikálnych teóriách, ostatné využívajú poznatky z nameraných dát a experimentov. Zrážky sú generované

akoby prebiehali vo vákuu, vplyvy detektorov nie sú automaticky brané do úvahy. Detektorové simulácie však môžu byť napísané priamo užívateľom [10].

Momentálne je možné generovať hadrónovo-hadrónové a leptónovo-leptónové zrážky, pričom protónovo-jadrové a jadrovo-jadrové zrážky nie sú vôbec implementované.

Kvantovo-chromodynamické procesy obsiahnuté v generátore zahrňujú ako "hard"-procesy tak aj "soft"procesy. Mezi "hard"procesy patria protónovo-protónové zrážky na partónovej úrovni, zatiaľ čo pod "soft"procesmi rozumieme protónovo-protónové zrážky na hadrónovej úrovni s pružnými, difrakčnými a nedifrakčnými topológiami [10]. Jedinečnou črtou generátora PYTHIA je možnosť zapnutia elektromagnetického Coulombovského pôsobenia pri klasických zrážkach. Difrakčné procesy typu $pp \rightarrow pph$, kde h je hadrón, nie sú doteraz implementované.

Hadronizácia ¹ je založená na Lundskom strunovom fragmentačnom frameworku [4], pričom PYTHIA8 umožňuje aj komplikované viacspojové strunové konfigurácie.

5.3 Nastavenia generátora PYTHIA použité pri analýze

V tejto práci bol generátor PYTHIA použitý ako externá knižnica prostredia ROOT. Keďže sme chceli generovať dáta, ktoré možno reálne namerať na LHC (napr. na experimente ALICE), generátor sme nastavili na protónovo-protónové zrážky pri energii 13 TeV.

```
pythia8->Initialize(2212 /* p */, 2212 /* p */, 13000. /* TeV */);
```

Na analýzu bolo potrebné generovať čisto kvarkové a čisto gluónové jety. Preto sme využili zapnutie subprocessov ako argumenty nasledujúcich príkazov ROOT-u:

```
pythia8->ReadString("HardQCD:gg2gg = on");
pythia8->ReadString("HardQCD:gg2qqbar = on");,
```

ktoré predstavujú zrážky:

$$g + g \rightarrow g + g \tag{5.1}$$

$$g + g \rightarrow q + \bar{q} \tag{5.2}$$

Všetky ostatné subprocessy boli vypnuté. Tiež sme požadovali, aby najnižšia energia partónu, z ktorej sa vytvoril jet, bola 10 GeV:

```
pythia8->ReadString("PhaseSpace:pTHatMin = 10.")
```

¹proces, pri ktorom sa z finálnych farebných partónov tvoria bezfarebné hadróny [10]

Na analýzu vykonanú v tejto práci bola vygenerovaná štatistika 10^8 prípadov pre kvarkové aj pre gluónové jety, ktorá bola generovaná a analyzovaná na počítačovom klastri.

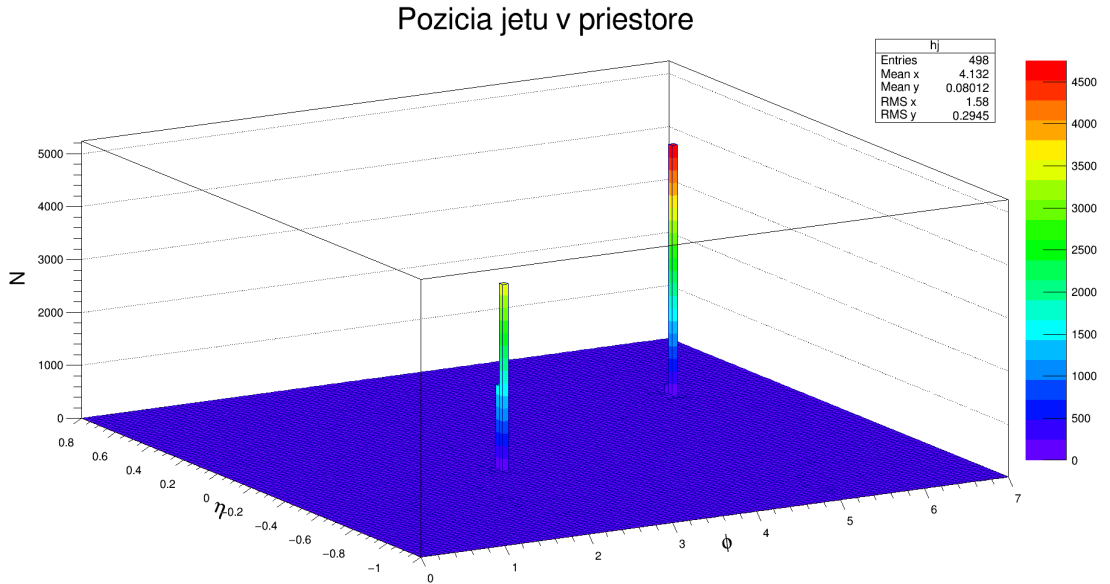
5.4 Hľadanie jetov

Na nájdenie jetu vo vygenerovaných dátach sme využili to, že do výpisu častíc v zrážke PYTHIA zahrňuje všetky častice, teda aj tie, ktoré sa rozpadávajú a nie sú finálne. To nám umožnilo medzi týmito časticami nájsť pôvodné partóny, z ktorých vznikol jet. Za finálne hadróny sme považovali baryóny a mezóny, ktoré sa už ďalej nerozpadávali s výnimkou π^0 , Λ , K^0 . Hadróny, ktoré sme považovali za súčasť jetu museli byť finálne a zároveň spĺňať podmienku:

$$R = \sqrt{(\varphi_p - \varphi_h)^2 + (\eta_p - \eta_h)^2} < 1 \quad (5.3)$$

Teda vzdialenosť hadrónu od jetovej osi určenej súradnicami φ_p a η_p pôvodného partónu musí byť menšia ako 1, aby sme ho mohli považovať za súčasť jetu.

Príklad dvoch jetov zo zrážky $g + g \rightarrow q + \bar{q}$ je na obrázku 5.8. Energia jetu bola v tomto prípade nastavená na 1 TeV.



Obr. 5.8: Poloha dvoch jetov v jednej zrážke

5.5 Metóda dvojčasticových korelácií

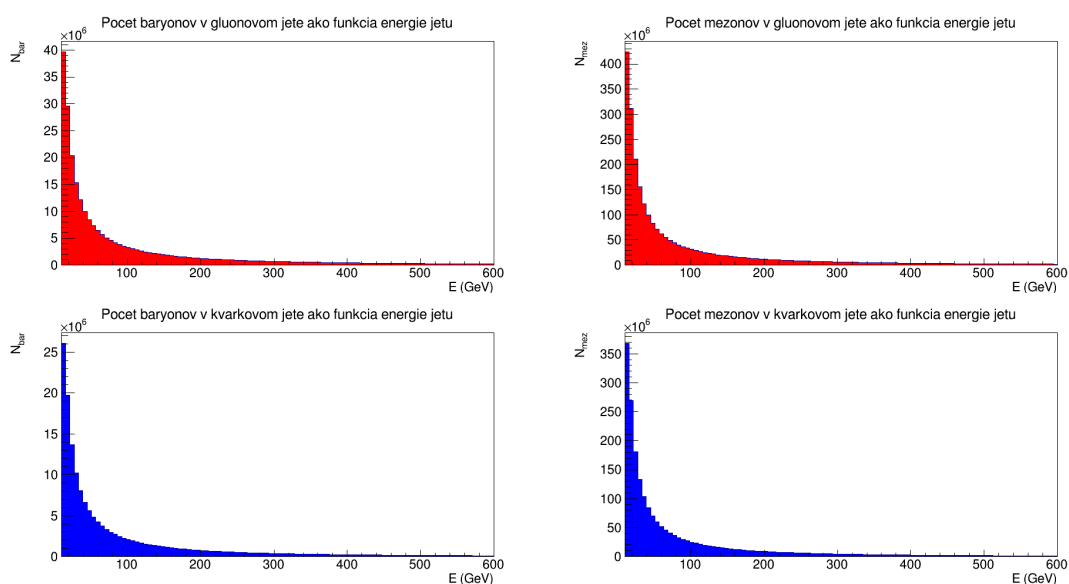
Na štúdium nízko energetických jetov v zrážkach ťažkých iónov sa využíva metóda dvojčasticových korelácií. Spočíva v zvolení intervalu priečnej hybnosti, v ktorom sa hľadá tzv. "trigger" častica, ktorá má vysokú priečnu hybnosť, o ktorej sa predpokladá, že je to hadrón obsahujúci pôvodný partón. Tiež je potrebné zvoliť interval nižších hybností pre "associated" častice. Následne sa robia rozdiely v azimutálnom uhle φ a pseudorapidite η pre rôzne intervaly priečnej hybnosti trigger a associated častíc. V histograme $\Delta\varphi$ vzniknú dva píky, jeden v okolí 0 tzv. "near side" pík a druhý v okolí π tzv. "away side" pík. Následne sa skúmajú výťažky jednotlivých jetov, teda integrály pod píkmami reprezentujúcimi jety.

Kapitola 6

Výsledky

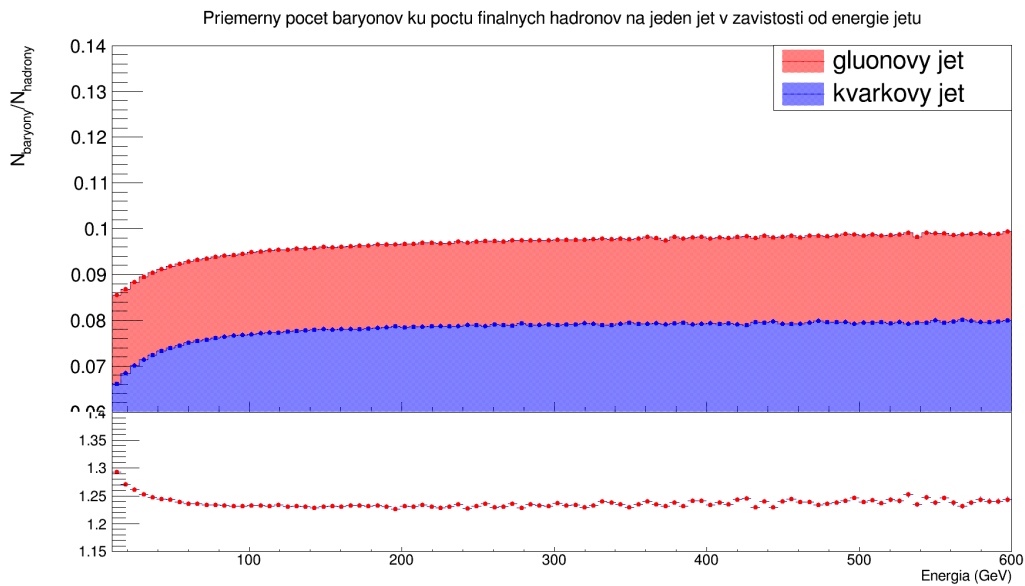
6.1 Porovnanie produkcie baryónov a mezónov v kvarkových a gluónových jetoch v generátore PYTHIA

Na zistenie relatívneho zastúpenia baryónov a mezónov vo finálnych hadrónoch sme využili histogramy závislosti celkových počtov baryónov a mezónov v jete od energie jetu (Obr. 6.9), ktoré sme následne delili histogramom s celkovým počtom finálnych hadrónov v závislosti od energie jetu.

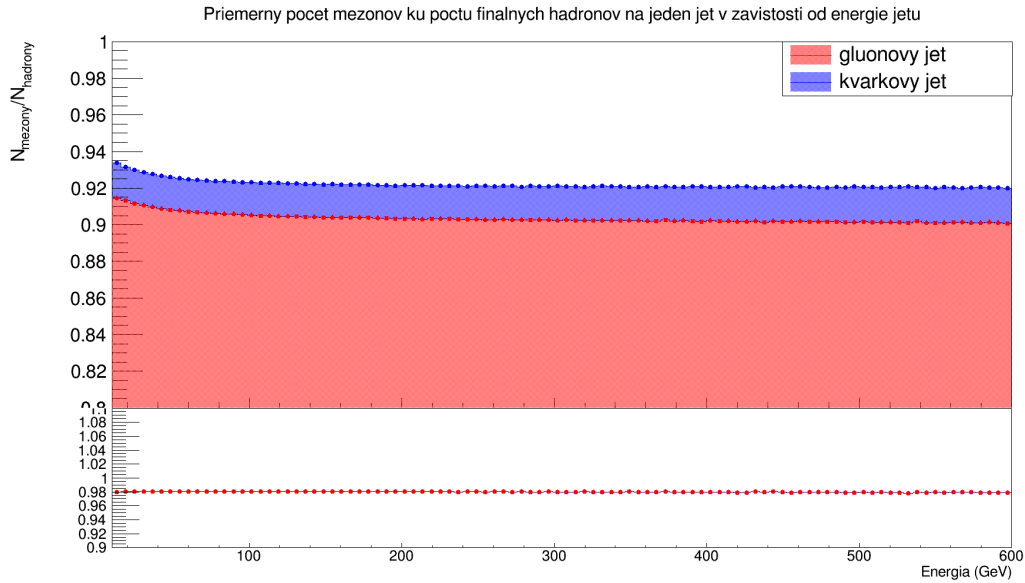


Obr. 6.9: Celkové počty mezónov a baryónov v jetoch v závislosti od energie jetu pre kvarkové a gluónové jety.

Prvými porovnávanými veličinami sú pomery počtov finálnych baryónov a mezónov ku všetkým finálnym hadrónom (Obr. 6.10 a Obr. 6.11). Výška jedného binu predstavuje priemernú hodnotu pomeru počtu finálnych baryónov resp. mezónov ku počtu všetkých finálnych hadrónov pre danú energiu jetu. Z histogramov jasne vyplýva, že relatívny počet baryónov ku všetkým finálnym hadrónom na jeden jet je v gluónovom jete približne o 25 percent väčší ako v kvarkovom jete, zatiaľ čo relatívny počet mezónov sa líši minimálne.



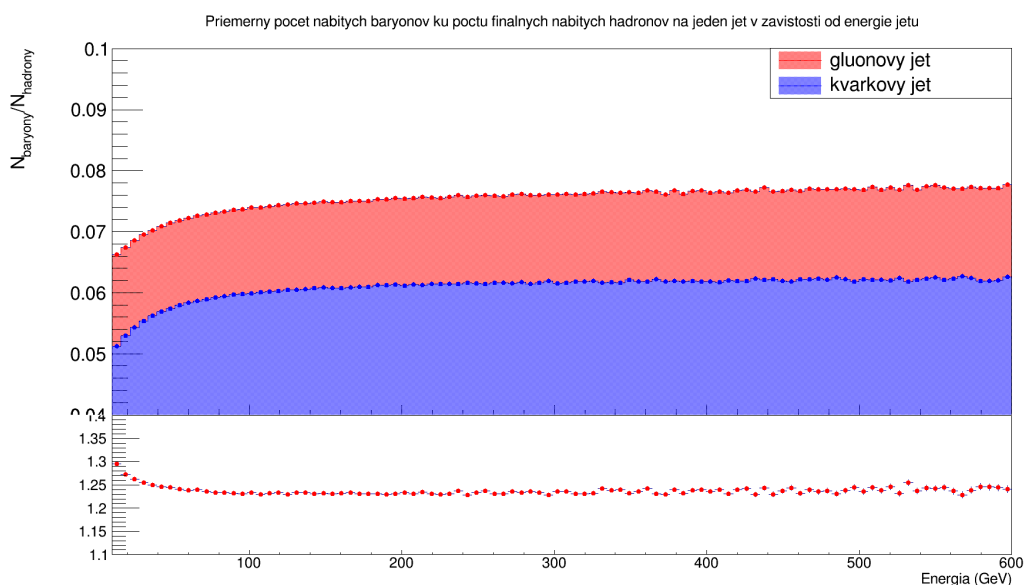
Obr. 6.10: Hore: Podiel priemerného počtu finálnych baryónov k priemernému počtu finálnych hadrónov v závislosti od energie jetu pre kvarkové a gluónové jety. Dole: Podiel hodnôt pre gluónový a kvarkový jet.



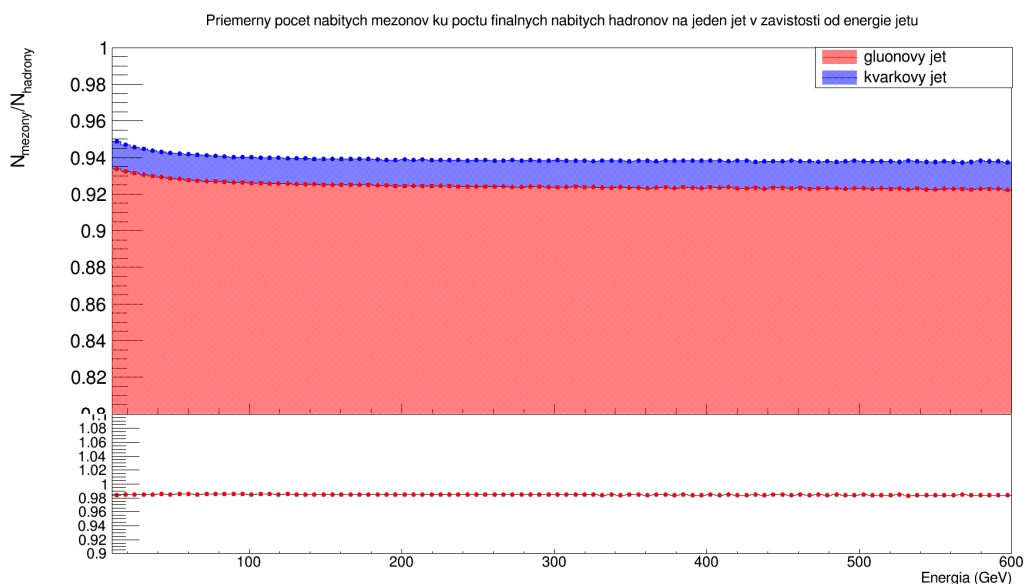
Obr. 6.11: Hore: Podiel priemerného počtu finálnych mezonov k priemernému počtu finálnych hadronov v závislosti od energie jetu pre kvarkové a gluónové jety. Dole: Podiel hodnôt pre gluónový a kvarkový jet.

6.2 Porovnanie produkcie nabitých baryónov a mezonov v kvarkových a gluónových jetoch v generátore PYTHIA8

V experimentoch medzi identifikované a zrekonštruované častice patria predovšetkým tie s nenulovým nábojom. Aby naše výsledky boli porovnateľné s experimentálnymi dátami, podobné pomery sme urobili aj pre nabité hadróny. Relatívne počty nabitých mezonov a baryónov ku nabitým hadrónom na jeden jet sú zobrazené na histogramoch na Obr. 6.12 a Obr. 6.13. Aj pri týchto pomeroch vidno podobné správanie ako pre nenabité hadróny.



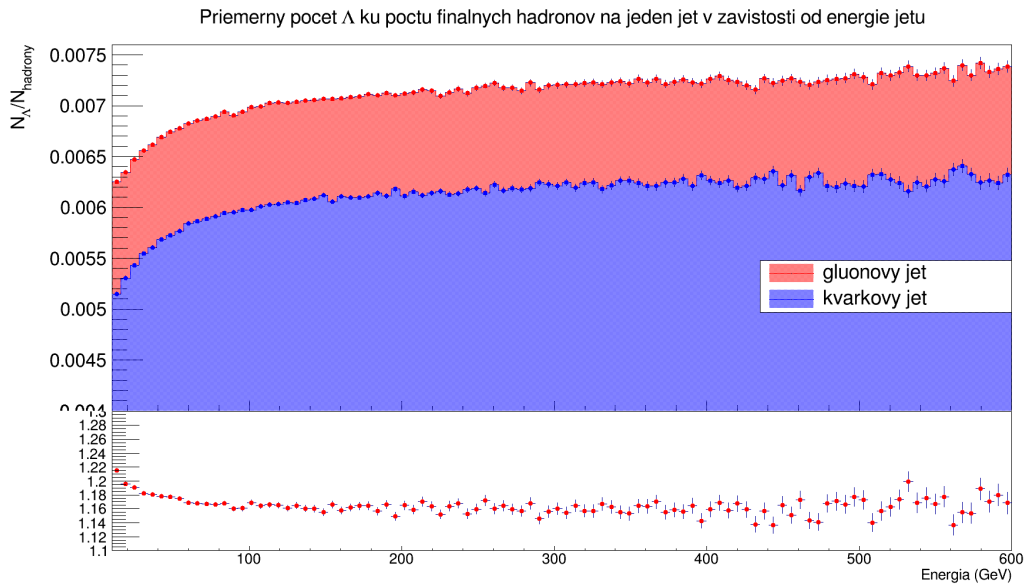
Obr. 6.12: Hore: Podiel priemerného počtu finálnych nabitých baryónov k priemernému počtu finálnych nabitých hadrónov v závislosti od energie jetu pre kvarkové a gluónové jety. Dole: Podiel hodnôt pre gluónový a kvarkový jet.



Obr. 6.13: Hore: Podiel priemerného počtu finálnych nabitých mezonov k priemernému počtu finálnych nabitých hadrónov v závislosti od energie jetu pre kvarkové a gluónové jety. Dole: Podiel hodnôt pre gluónový a kvarkový jet.

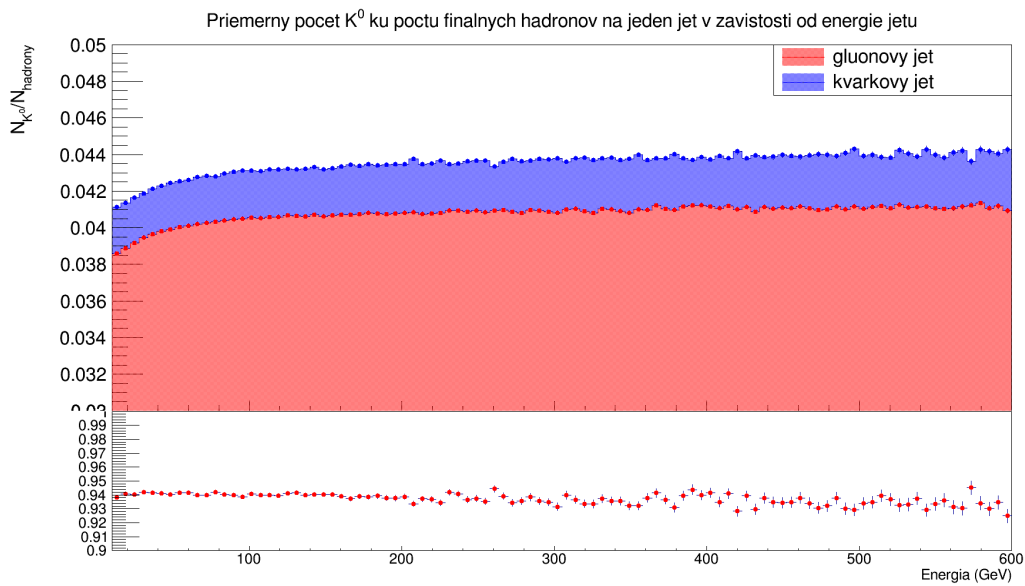
6.3 Porovnanie produkcie Λ a K^0 v kvarkových a gluónových jetoch v generátore PYTHIA8

Ako referenčné častice sme vybrali Λ a K^0 , pretože sú dobre rekonštruovateľné v dátach nameraných na experimente ALICE a taktiež boli vybrané aj v skorších experimentoch. Pomery ich počtov ku všetkým finálnym hadrónom na jeden jet sú zobrazené na Obr. 6.14 a Obr. 6.15. Oba histogramy vykazujú rovnakú tendenciu ako histogramy pre mezóny a baryóny.

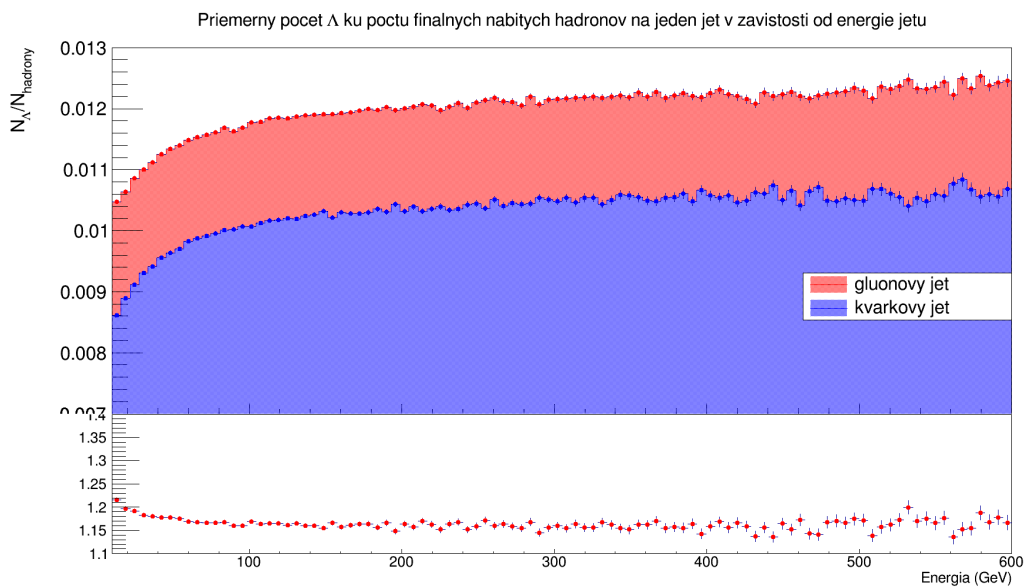


Obr. 6.14: Hore: Podiel priemerného počtu Λ k priemernému počtu finálnych hadronov v závislosti od energie jetu pre kvarkové a gluónové jety. Dole: Podiel hodnôt pre gluónový a kvarkový jet.

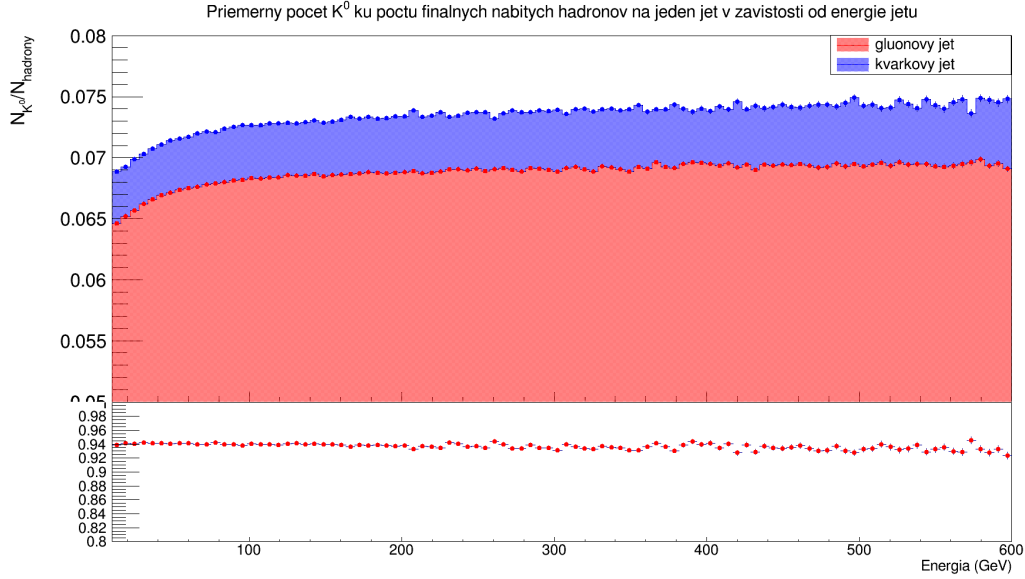
Aby sme videli, či výsledky experimentov sú naozaj implementované v generátore, urobili sme pomery počtu Λ a K^0 ku nabitým finálnym hadrónom na jeden jet, ktoré sú na Obr. 6.17 a Obr. 6.16. Pomer $R_g^{\Lambda}/R_q^{\Lambda}$ je rovný približne 1,18, čo zodpovedá doteraz nameraným výsledkom. Pri vyšších energiách jetu, hodnota tohto pomeru mierne fluktuuje, čo môže byť spôsobené nízkou produkciou Λ a tiež aj nižším počtom jetov s touto energiou. Pomer $R_g^{K^0}/R_q^{K^0}$ má hodnotu okolo 0,94. Tieto hodnoty zodpovedajú hodnotám nameraných na experimentoch (metóda "Y-events").



Obr. 6.15: Hore: Podiel priemerného počtu K^0 k priemernému počtu finalných hadronov v závislosti od energie jetu pre kvarkové a gluónové jety. Dole: Podiel hodnôt pre gluónový a kvarkový jet.



Obr. 6.16: Hore: Podiel priemerného počtu Λ k priemernému počtu počtu finalných nabitých hadronov v závislosti od energie jetu pre kvarkové a gluónové jety. Dole: Podiel hodnôt pre gluónový a kvarkový jet.

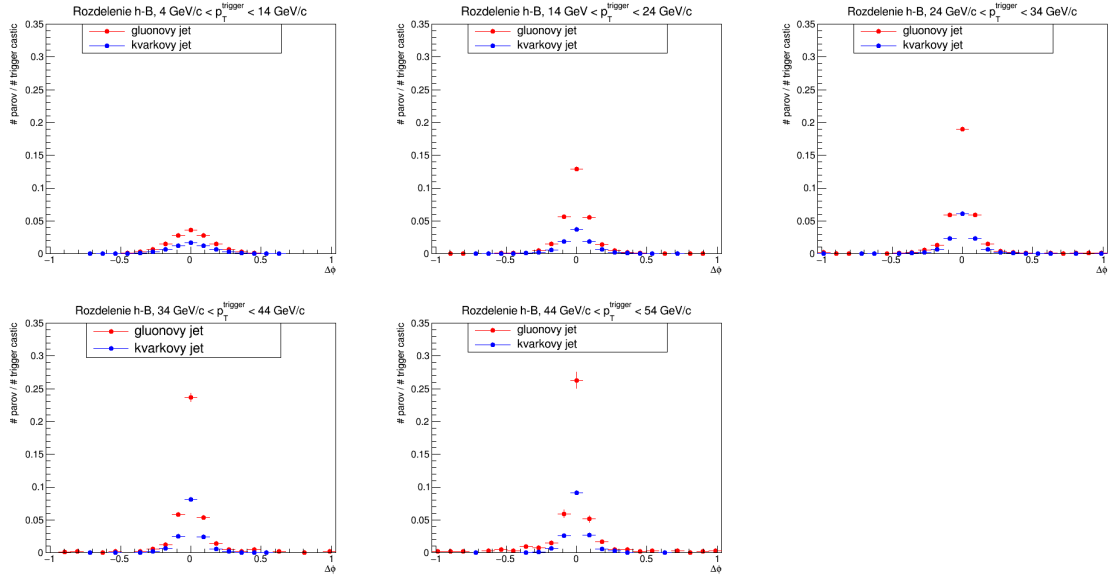


Obr. 6.17: Hore: Podiel priemerného počtu K^0 k priemernému počtu finálnych nabitých hadrónov v závislosti od energie jetu pre kvarkové a gluónové jety. Dole: Podiel hodnôt pre gluónový a kvarkový jet.

6.4 Porovnanie kvarkových a gluónových jetov pomocou dvojčasticových korelácií

V našej práci sme skúmali rozdelenie $\Delta\varphi$ (rozdiely azimutálneho uhla) pre rôzne kombinácie trigger a associated častíc. Trigger častice sme volili z intervalu 4 GeV/c až 54 GeV/c a associated častice z intervalu 2 GeV/c až $p_T^{trigger}$. Z 3D histogramov, do ktorých sme plnili $\Delta\varphi, \Delta\eta, p_T^{trigger}$, sme postupne spravili projekcie na os $\Delta\varphi$ pre jednotlivé intervaly $p_t^{trigger}$: 4-14 GeV/c, 14-24 GeV/c, 24-34 GeV/c, 34-44 GeV/c a 44-54 GeV/c. Projekcie boli vytvorené pre interval $|\Delta\eta| < 1$, o ktorom predpokladáme, že sa doň vojde celý jet-pík. Z týchto rozdelení sme odčítali pozadie, ktoré sme definovali ako konštantnú funkciu s hodnotou prislúchajúcou $\Delta\varphi$ binu so stredom v -0,7 pre "near side" a v 2.4 pre "away side" pík. Príklad výsledného rozdelenia je zobrazený na obrázku 6.18.

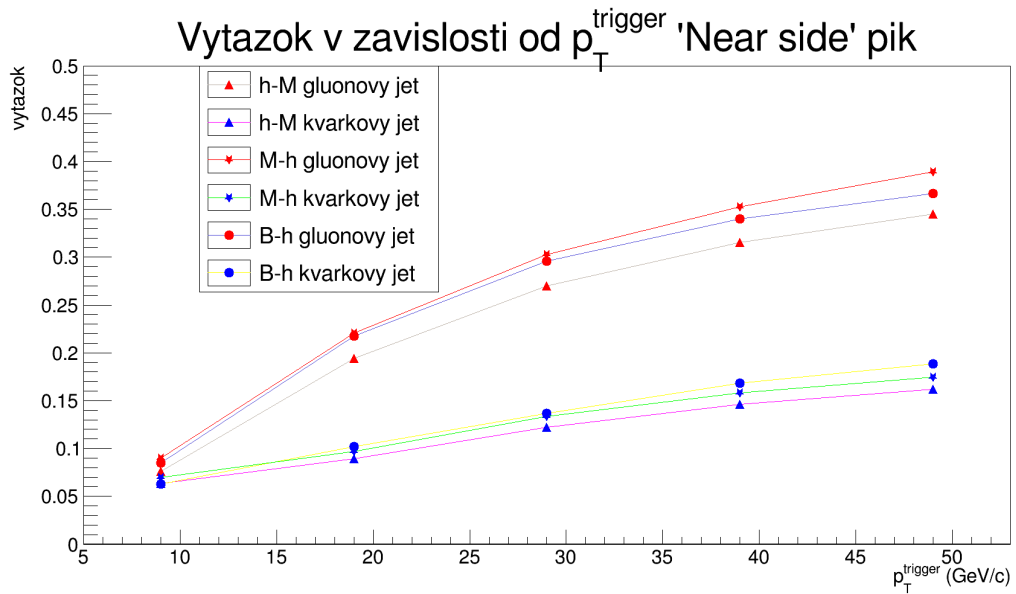
Z histogramu už na prvý pohľad vidno, že gluónové jety majú vyšší pík, a teda aj väčšiu multiplicitu v jete, ale cieľom našej práce bolo skúmať tkzv. výťažky, teda priemerný počet associated častíc na jednu trigger časticu na jeden jet. Výťažky sme vypočítali ako integrál pod píkom v hraniciach $\Delta\varphi \in (-0.5, 0.5)$ a $\Delta\varphi \in (2.64, 3.64)$. Výťažky sme zobrazili ako funkciu $p_T^{trigger}$ do grafov na obrázkoch 6.19 až 6.24. Z týchto grafov je zrejmé, že výťažok jetu rastie so zvyšujúcou sa energiou jetu a tak-



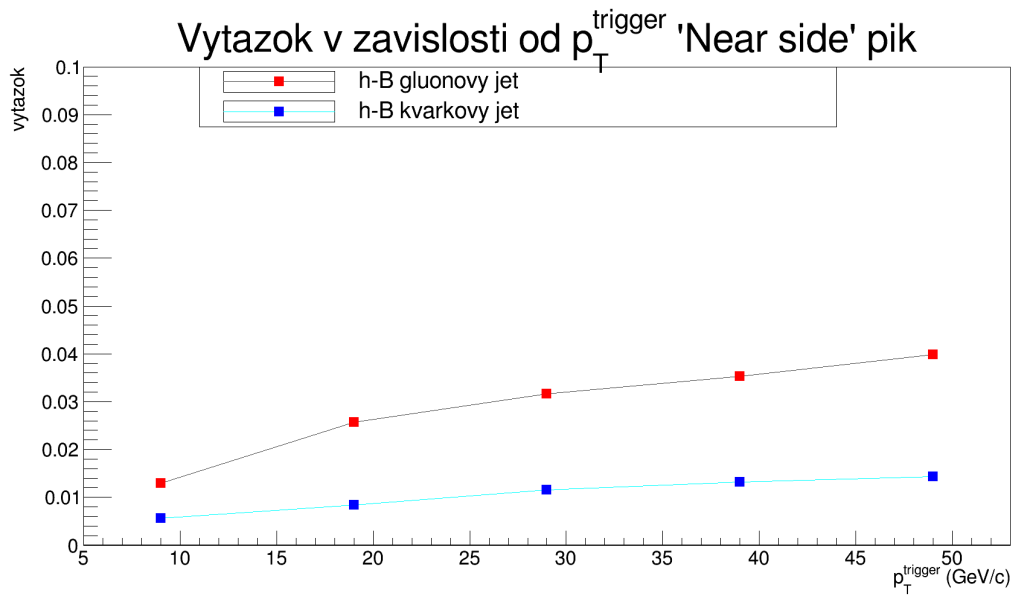
Obr. 6.18: Rozdelenia $\Delta\varphi$ pre kombináciu, kde sme za trigger časticu zvolili nabitý hadrón a za associated časticu baryón, pre jednotlivé intervaly $p_T^{trigger}$ pre "near side" pík.

tiež je vyšší pre gluónove jety. Výťažky závisia aj od zvolenia kombinácie trigger a associated častíc. To vidno na grafoch 6.20 a 6.23, kde je hodnota výťažku kombinácie, v ktorej je nabitý hadrón volený ako trigger častica a nabitý baryón ako associated častica, oveľa nižšia ako výťažky ostatných kombinácií. Z tohto dôvodu bola táto kombinácia zobrazaná na samostatnom grafe, kvôli lepšej čitateľnosti. Hodnoty výťažkov kombinácii s Λ a K_S^0 sú nižšie ako výťažky pre ostatné kombinácie, čo je pravdepodobne spôsobené nízkou produkciou týchto konkrétnych častíc.

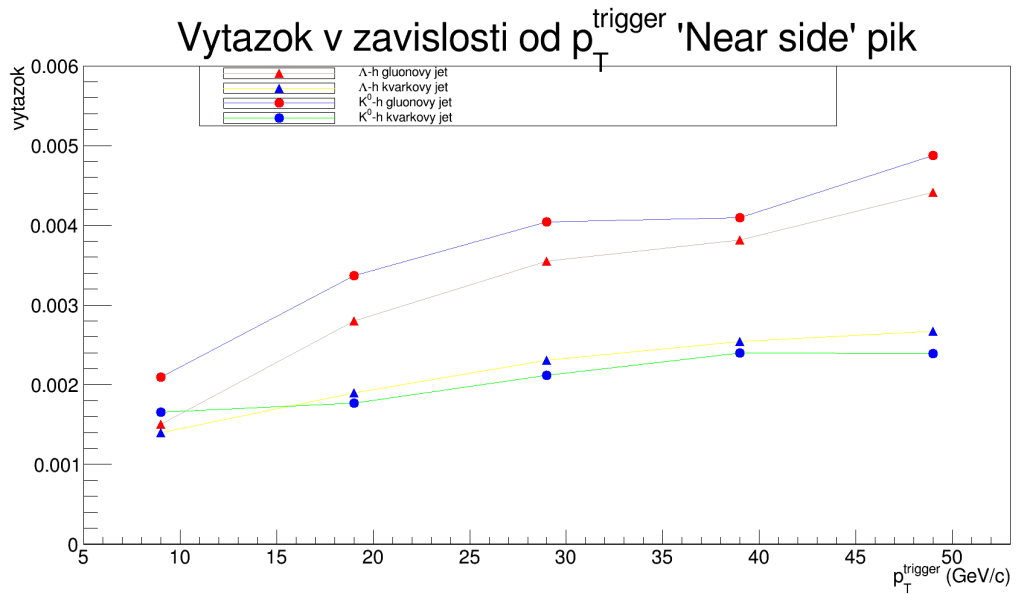
V našej analýze bola zavedená aj premenná z , ktorá je rovná podielu priechnej hybnosti trigger častice a celkovej priechnej hybnosti jetu. Z tejto premennej je viditeľné, koľko energie z jetu odnáša trigger častica. Na obrázku 6.25 je zobrazené rozdelenie premennej z pre jednotlivé intervaly $p_T^{trigger}$. Je z nich zrejmé, že pri vyšších hybnostiach trigger častice, odnáša táto častica veľkú časť hybnosti jetu v kvarkových jetoch.



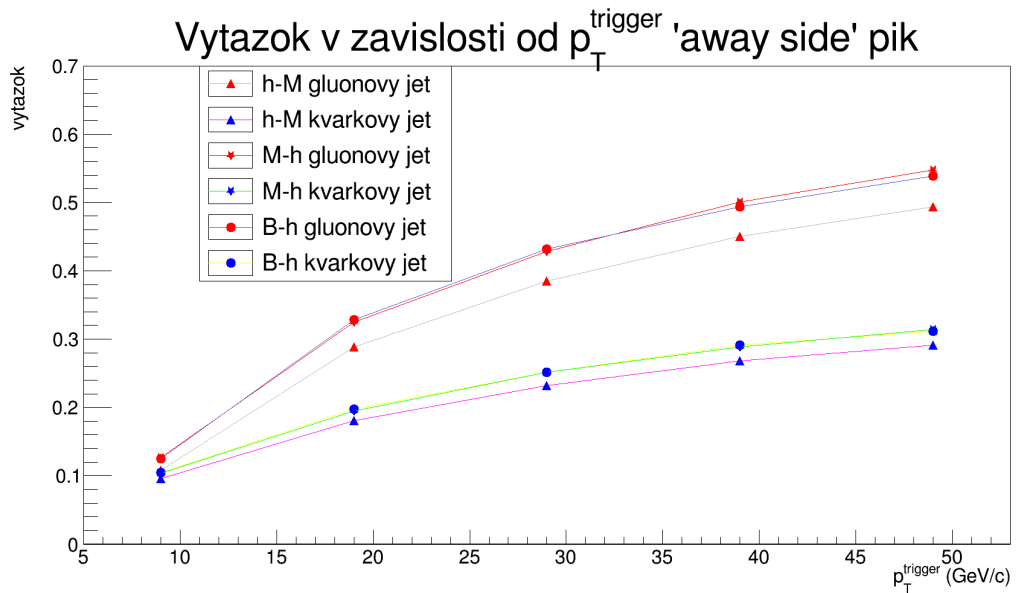
Obr. 6.19: Graf závislosti výťažku jet-like-píku od $p_T^{trigger}$.



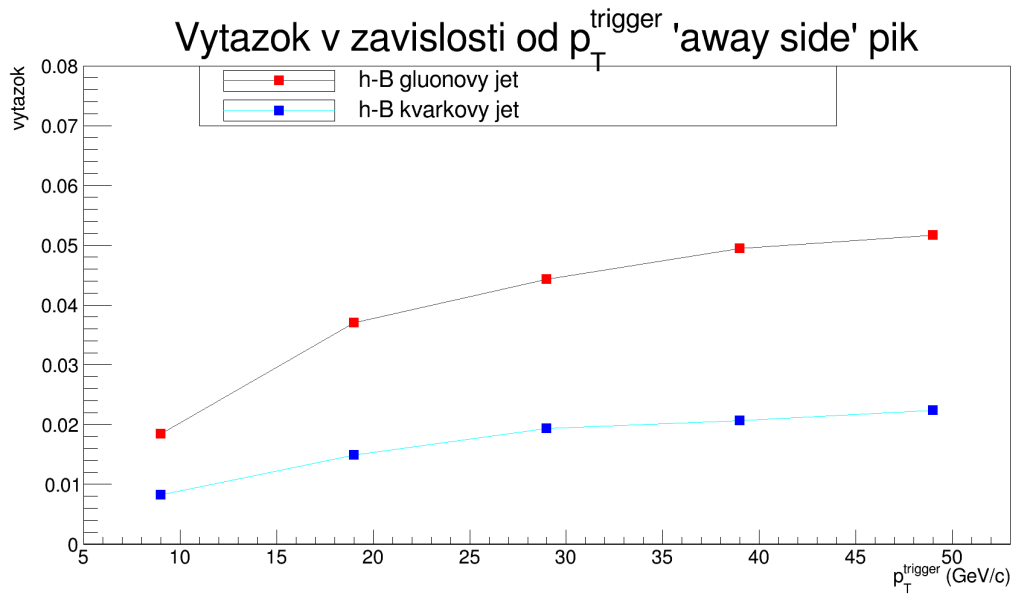
Obr. 6.20: Graf závislosti výťažku jet-like-píku od $p_T^{trigger}$.



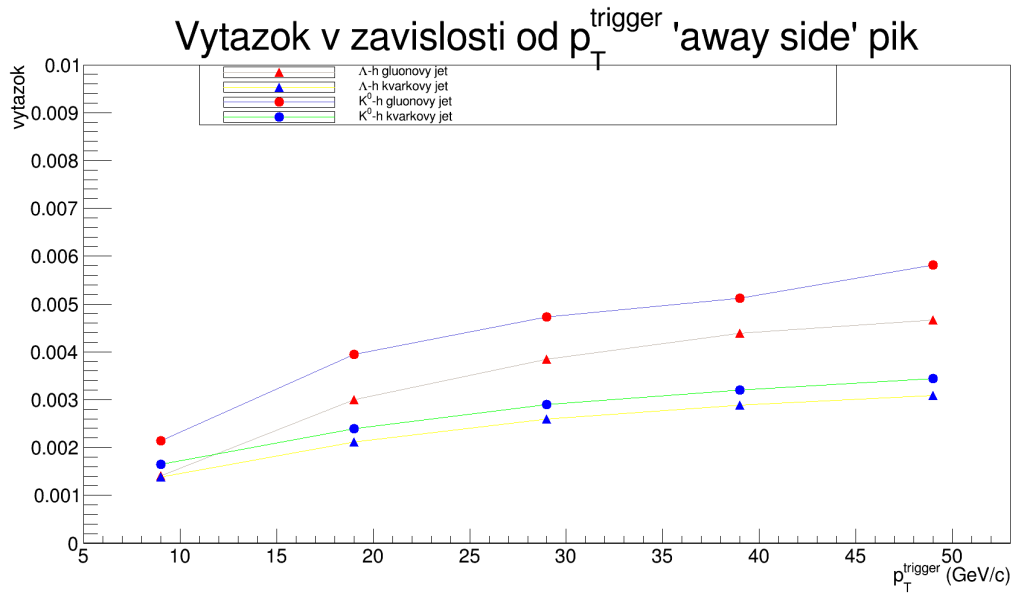
Obr. 6.21: Graf závislosti výťažku jet-like-píku od p_T^{trigger} .



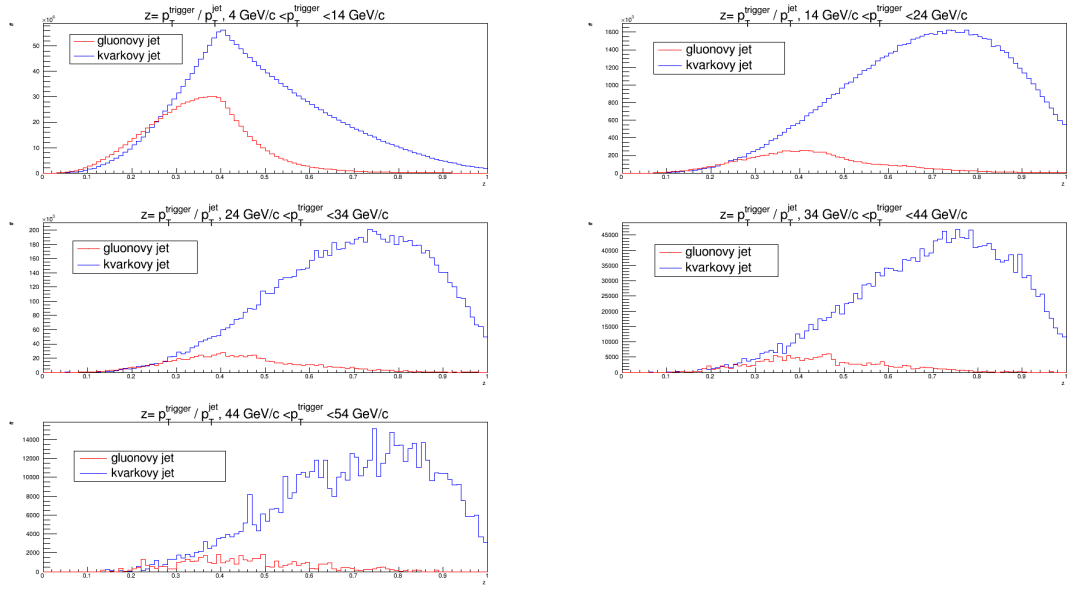
Obr. 6.22: Graf závislosti výťažku jet-like-píku od p_t^{trigger} .



Obr. 6.23: Graf závislosti výťažku jet-like-píku od $p_T^{trigger}$.



Obr. 6.24: Graf závislosti výťažku jet-like-píku od $p_T^{trigger}$.



Obr. 6.25: Rozdelenie premennej z pre jednotlivé intervaly $p_T^{trigger}$

Kapitola 7

Diskusia

Z vyššie zobrazených histogramov vyplýva, že výsledky experimentu OPAL, t.j. zvýšenie produkcie baryónov v gluónových jetoch oproti produkcii v kvarkových, sú implementované v generátore PYTHIA. Chyby merania v jednotlivých histogramoch sú len štatistické.

V experimente nevieme, ktoré baryóny alebo mezóny naozaj pochádzajú z gluónových resp. kvarkových jetov. Keďže vieme, že v gluónových jetoch sa produkuje viac baryónov, uhlové korelácie s baryónmi by mali viac odzrkadľovať vlastnosti gluónových jetov. Na kvantitatívny odhad tejto hypotézy by bolo potrebné najprv odhadnúť produkciu gluónových a kvarkových jetov pri energiách na LHC a túto informáciu kvantitatívne prepojiť s dvojčasticovými koreláciami. Korelácie s podivnými časticami Λ a K_S^0 sú obzvlášť vhodné pre toto štúdium, keďže sú experimentálne identifikovateľné aj pre vysoké p_T . Týmto spôsobom by sme mohli zistiť, či rozdiely medzi gluónovými a kvarkovými jetmi sú merateľné (aspoň štatisticky) v experimente ALICE.

Záver

Hlavným cieľom tejto vedeckej práce bolo zistiť, či sú výsledky experimentu OPAL, teda zvýšená produkcia baryónov v gluónových jetoch, implementované v štandardne používanom Monte Carlo Generátore PYTHIA. Z našich výsledkov vyplýva, že generácia zrážok v generátore PYTHIA využíva tento fenomén.

V budúcnosti by sa tento poznatok dal využiť pri štúdiu produkcie Λ a K^0 v zrážkach ťažkých iónov na experimente ALICE v CERNe. Alebo pri použití metódy dvojčasticových korelácii, v ktorej by sa mohli kvarkové a gluónové jety odseparovať na štatistickej báze s pomocou uhlových korelácii Λ a K^0 [18] .

Zoznam použitej literatúry

- [1] COUGHLAN, G, J DODD a Ben GRIPAIOS. *The ideas of particle physics: an introduction for scientists*. 3rd ed. /. Cambridge: Cambridge University Press, c2006, 254 p. ISBN 978-052-1677-752.
- [2] <http://press.web.cern.ch/press-releases/2015/07/cerns-lhcb-experiment-reports-observation-exotic-pentaquark-particles>
- [3] BETHKE, S. Experimental tests of asymptotic freedom. *Progress in Particle and Nuclear Physics*. 2007, extbf58(2): 351-386. DOI: 10.1016/j.pnnp.2006.06.001. ISSN 01466410. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0146641006000615>
- [4] http://www.physics.mcgill.ca/jet12/Jet_xiao.pdf
- [5] <http://home.thep.lu.se/torbjorn/talks/durham09.pdf>
- [6] <http://physics.stackexchange.com/questions/155327/zero-net-force-on-grass-seeds-is-this-a-uniform-field>
- [7] http://hepg.sdu.edu.cn/THPPC/reports/seminar2009/0316_lund_string_model.pdf
- [8] https://en.wikipedia.org/wiki/Color_confinement
- [9] ACKERSTAFF ET AL., K. Production of K_S^0 and Λ in quark and gluon jets from Z^0 decay. *The European Physical Journal C*. 1999, 8(2): 241-254. ISSN 1434-6044. <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s100529901058>
- [10] SJÖSTRAND, Torbjörn, Stefan ASK, Jesper R. CHRISTIANSEN, et al. An introduction to PYTHIA 8.2. *Computer Physics Communications*. 2015, extbf191, 159-177. ISSN 00104655. <http://arxiv.org/pdf/1410.3012v1.pdf>
- [11] <http://home.thep.lu.se/torbjorn/pdfdoc/worksheet8200.pdf>
- [12] <https://root.cern.ch/about-root>

- [13] ABAZOV, V. M., B. ABBOTT, et al. Subjet multiplicity of gluon and quark jets reconstructed with the k_{\perp} algorithm in $p\bar{p}$ collisions *Physical Review D*. 2002, extbf65(5). ISSN 0556-2821. <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.65.052008>
- [14] ABREU, P., W. ADAM, T. ADYE, et al. The scale dependence of the hadron multiplicity in quark and gluon jets and a precise determination of C_A/C_F *Physics Letters B*. 1999, extbf449(3-4). ISSN 03702693. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0370269399001124>
- [15] <http://home.cern/about/experiments/alice>
- [16] AAIJ, R., B. ADEVA, M. ADINOLFI, et al. *Physical Review Letters*. 2014, extbf112(22). ISSN 0031-9007. <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.112.222002>
- [17] ABELEV, B., J. ADAM, D. ADAMOVIĆ, et al. Measurement of charged jet suppression in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76\text{TeV}$. *Journal of High Energy Physics*. 2014, extbf2014(3). ISSN 1029-8479. [http://link.springer.com/10.1007/JHEP03\(2014\)013](http://link.springer.com/10.1007/JHEP03(2014)013)
- [18] BOMBARA M.(for the STAR Collaboration): Is there a strange baryon/meson dependence in correlations in STAR?, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 35(2008)044065(6pp)