



**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ
FAKULTA**
Univerzita Karlova

BAKALÁRSKA PRÁCA

Gabriela Martinovicová

Hľadanie leptokvarkov na experimente ATLAS

Ústav časticové a jaderné fyziky

Vedúci bakalárskej práce: Mgr. Vojtěch Pleskot, Ph.D.

Štúdijný program: Fyzika

Štúdijný obor: Obecná fyzika

Praha 2019

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval(a) 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 14.5.2019

Podpis autora

Predovšetkým by som sa chcela poďakovať svojemu vedúcemu Mgr. Vojtěchovi Pleskotovi, Ph.D za hodiny strávené pri konzultovaní tejto práce a objasňovaní tém, s ktorými som sa doposiaľ počas svojho štúdia nestretla, za jeho ochotu, všetku jeho pomoc, rady a cenné informácie, ktoré mi poskytoval a taktiež za aktívny prístup pri riešení problémov, ktoré sa v priebehu práce objavili.

Ďakujem aj svojej rodine za neustálu podporu pri mojom štúdiu.

Názov práce: Hľadanie leptokvarkov na experimente ATLAS

Autor: Gabriela Martinovicová

Katedra: Ústav časticové a jaderné fyziky

Vedúci bakalárskej práce: Mgr. Vojtěch Pleskot, Ph.D., Ústav časticové a jaderné fyziky

Abstrakt: Experiment ATLAS zaznamenáva dáta o zrážkach protónov urýchľovaných vo Veľkom hadrónovom urýchľovači (LHC). LHC je hlavnou časťou komplexu urýchľovačov v Európskej organizácii pre jadrový výskum (CERN). V zaznamenaných dátach je možné pomocou dátovej analýzy hľadať nové doposiaľ neobjavené častice. Príkladom takýchto častíc sú aj leptokvarky. Táto bakalárska práca je založená na dátach nabitých v rokoch 2015-2016 o ťažiskovej energii 13 TeV a celkovej luminozite $36,1 \text{ fb}^{-1}$. V týchto dátach nebol pozorovaný žiadny náznak existencie leptokvarkov, ktoré pochádzajú z párovej produkcie s rozpadovým kanálom, kde sa jeden leptokvark rozpadá na mión a kvark a druhý na neutríno a kvark, a tak sa táto práca zameriava na stanovenie limity na účinný prierez produkcie týchto častíc.

Kľúčové slová: CERN, ATLAS, LHC, nová fyzika, leptokvark

Title: Search for leptoquarks with the ATLAS experiment

Author: Gabriela Martinovicová

Department: Institute of Particle and Nuclear Physics

Supervisor: Mgr. Vojtěch Pleskot, Ph.D., Institute of Particle and Nuclear Physics

Abstract: The ATLAS experiment records data from the collisions of protons accelerated in the Large Hadron Accelerator (LHC). The LHC is a major part of the Accelerator Complex in the European Organization for Nuclear Research (CERN). In the recorded data it is possible to find new undiscovered particles by means of data analysis. Example of such particles are leptoquarks. This bachelor thesis is based on data collected in 2015-2016 at 13 TeV centre-of-mass energy and with a total luminosity of 36.1 fb^{-1} . In these data, there was no indication of the existence of leptoquarks, which originate from the paired production with the decay channel, where one leptoquark decays into muon and quark and the other one into neutrino and quark, and so this thesis aims to set a limit on the production cross-section for these particles.

Keywords: CERN, ATLAS, LHC, new physics, leptoquark

Obsah

| | |
|--|-----------|
| Úvod | 2 |
| 1 Experiment ATLAS | 3 |
| 1.1 CERN a Veľký hadrónový urýchlovač | 3 |
| 1.2 Detektor ATLAS | 3 |
| 1.2.1 Koordinačný systém | 3 |
| 1.2.2 Vnútorňý detektor | 4 |
| 1.2.3 Systém kalorimetrov | 5 |
| 1.2.4 Miónový spektrometer | 6 |
| 1.2.5 Trigger a systém pre získavanie dát | 6 |
| 1.3 Objektová rekonštrukcia na ATLAS-e | 7 |
| 1.3.1 Rekonštrukcia miónov | 7 |
| 1.3.2 Rekonštrukcia a kalibrácia jetov | 7 |
| 1.3.3 Rekonštrukcia MET | 8 |
| 2 Dátové a Monte Carlo vzorky | 9 |
| 2.1 Dáta | 9 |
| 2.2 Monte Carlo simulácia | 9 |
| 3 Testovanie štatistických hypotéz | 10 |
| 3.1 Funkcia hustoty pravdepodobnosti a funkcia vierohodnosti | 10 |
| 3.2 Test pomeru vierohodností (testovanie hypotéz) | 11 |
| 3.3 Pomer profilových vierohodnosti | 13 |
| 4 Analýza dát | 15 |
| 4.1 HistFitter | 15 |
| 4.2 Signálna a kontrolné oblasti | 17 |
| 4.2.1 Selekcja objektov a udalostí | 17 |
| 4.2.2 Oblasti citlivé na signál | 17 |
| 4.2.3 Kontrolné oblasti | 18 |
| 4.3 Výsledky analýzy | 18 |
| Závěr | 33 |
| Zoznam použitej literatúry | 34 |
| Zoznam obrázkov | 37 |

Úvod

Lektokvarky sú hypotetické častice, ktorých existenciou by bolo možné vysvetliť podobnosti medzi leptonmi a kvarkami v SM, a taktiež by sa mohli potvrdiť viaceré teórie novej fyziky, resp. fyziky za štandardným modelom (SM), ako napríklad veľká teória zjednotenia.

V prípade ich existencie, sú lektokvarky bozóny s farebným nábojom s frakčným elektrickým nábojom a majú nenulové baryónové a leptónové číslo. Lektokvarky môžu vznikať v proton-proton zrážkach jednotlivo alebo v pároch. V tejto práci sa venujeme hľadaniu lektokvarkov z párovej produkcie v pp zrážkach s $\sqrt{s} = 13$ TeV na experimente ATLAS na Velkom hadrónovom urýchľovači a používaný model referenčného signálu je minimal Buchmüller–Rückl–Wyler model [1].

V rozpade lektokvarkov pochádzajúcich z párovej produkcie môžeme pozorovať buď pár nabitých leptónov a jety alebo jeden nabitý leptón, neutríno a jety, resp. dva neutrína a jety. V tejto práci hľadáme lektokvarky, ktorých konečný stav patrí len do jedného z kanálov, ktoré zodpovedajú danému rozpadu a to $\mu\nu jj$ kanál, ktorý musí obsahovať jeden mión, chýbajúcu priečnu energiu a aspoň dva jety. Keďže sa budeme zaoberať len miónovým kanálom, hľadáme lektokvarky druhej generácie, ktorá sa v uvažovanom referenčnom modeli viaže na fermióny druhej generácie zo štandardného modelu.

Analýza dát z experimentu ATLAS, ktoré boli použité v analýze pre publikáciu o hľadaní lektokvarkoch [2], je vykonaná pomocou programu HistFitter, ktorý pre analýzu využíva pomer profilových vierohodností. Celá analýza je vykonaná pre rôzne hmotnosti LQ. Pozadie pre našu analýzu tvorí predovšetkým produkcia W +jety a $t\bar{t}$.

1. Experiment ATLAS

1.1 CERN a Veľký hadrónový urýchľovač

Európska organizácia pre jadrový výskum (fr. Organisation européenne pour la recherche nucléaire, CERN) je európske výskumné centrum, ktoré riadi najväčšie laboratórium pre časticovú fyziku na svete.

Jadrom komplexu urýchľovačov v CERN-e je Veľký hadrónový urýchľovač, známy pod skratkou LHC (z angl. Large Hadron Collider). V tomto urýchľovači, umiestnenom v kruhovom tuneli dlhom takmer 27 km, sa primárne urýchľujú zväzky /angl. beams/ protónov, ktoré sú tvorené takzvanými balíkmi /angl. bunches/. Jeden zväzok protónov pozostáva z 2808 balíkov a každý balík obsahuje na začiatku $1,2 \times 10^{11}$ protónov [3].

Zväzky protónov sú urýchľované v dvoch oddelených zväzkových trubiciach. V týchto trubiciach sú fokusované vďaka silnému magnetickému poľu o veľkosti 8,3 T. Toto magnetické pole je dosiahnuté pomocou 9593 supravodivých magnetov. Ťažisková energia pri zrážke protónov, počas druhého behu (Run 2), ktorý prebiehal v rokoch 2015-2018, dosahovala $\sqrt{s} = 13$ TeV. Pri tejto energii obehol zväzok obvod urýchľovača 11 245-krát za sekundu. Okrem zväzkov protónov sú na LHC urýchľované aj ťažké ióny, ktorých dizajnovaná energia je 2,8 TeV na nukleón.

Z dôvodu vysokej luminozity, ktorej vrchol v roku 2016 dosahoval približne $1,4 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ [4] môže v rámci jednej udalosti /angl. bunch crossing/ nastať viacero pp interakcií, čo sa nazýva pile-up.

Na LHC pracujú simultánne štyri detektory, rozmiestnené po jeho obvode - ATLAS, CMS, ALICE a LHCb. V týchto miestach nastáva prienik zväzkových trubíc, čo umožňuje zrážky urýchľovaných častíc. Za jednu sekundu nastanú na LHC len v detektore ATLAS až dve miliardy zrážok proton-proton.

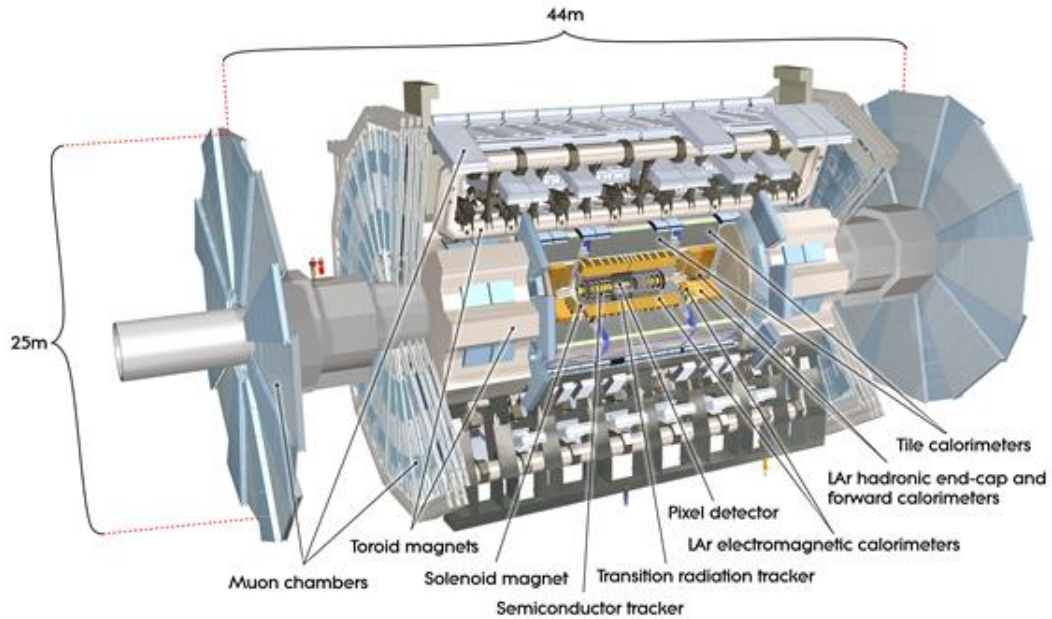
1.2 Detektor ATLAS

Detektor ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus) je jedným z dvoch všeúčelových detektorov na LHC. ATLAS je najväčší detektor na urýchľovači, aký bol zatiaľ postavený. Je navrhnutý tak, aby mohol skúmať fyziku na čo najširšej škále, od hľadania Higgsovho bozónu cez novú fyziku za Štandardným modelom (SM) po častice, ktoré by mohli tvoriť temnú hmotu.

Nakoľko častice, ktoré pochádzajú zo zrážok protónov, interagujú s prostredím rôznymi spôsobmi, sa detektor ATLAS skladá z niekoľkých častí, ako je možné vidieť na obrázku 1.1. Podľa náboja častice a toho, ktorou vrstvou bola zastavená, resp. ktorými vrstvami prešla je možné určiť o akú časticu sa jedná.

1.2.1 Koordinačný systém

Koordinačný systém detektoru ATLAS je pravotočivý kartézsky systém. Za počiatok koordinačného systému sa berie interakčný bod. Os z je súbežná so zväzkovými trubicami. Rovina $x - y$ je kolmá k osi zväzku a označuje sa ako priečna rovina. Hybnosť častíc meraná v tejto rovine sa nazýva priečna hybnosť



Obrázek 1.1: Detektor ATLAS [5]

p_T . Os x smeruje z interakčného bodu do centra LHC a os y smeruje z interakčného bodu smerom k zemskému povrchu.

Priečna rovina je udávaná často vo sférických súradniciach r, ϕ . Azimutový uhol ϕ je meraný voči pozitívnej x -ovej osi v priechnej rovine. Radiálny rozmer, r , udáva vzdialenosť od zväzku. Polárny uhol θ je definovaný ako uhol od pozitívnej osi z . Polárny uhol je často udávaný vo forme pseudorapidity, ktorá je definovaná ako $\eta = -\ln \tan(\theta/2)$. Vzdialenosť ΔR je definovaná v rovine $\eta - \phi$ ako $\Delta R = \sqrt{\Delta\eta^2 + \Delta\phi^2}$.

1.2.2 Vnútorý detektor

Vnútorý detektor (ID) je 6,2 m dlhý dráhový detektor v cylindrickom tvare s rádiusom 1,15 m. ID je symetrický pozdĺž azimutového uhla a pokrýva oblasť $|\eta| < 2,5$. Tento detektor je umiestnený najbližšie k interakčnému bodu (miestu zrážky). Nachádza sa v solenoidálne magnetickom poli, ktoré spôsobuje odklon nabitej častice a z jej dráhy je možné určiť elektrický náboj a vypočítať hybnosť. Kvôli tomu, že neutrálne častice neionizujú prostredie, ktorým prechádzajú nie je možné ich v tomto detektore zaznamenať.

Jeho hlavnými komponentami sú kremíkový pixelový detektor /angl. Pixel Detector, skr. PD/, polovodičový stripový detektor /angl. Semiconductor Tracker, skr. SCT/ a detektor prechodového žiarenia /angl. Transition Radiation Tracker, skr. TRT/. Každý z týchto komponentov je tvorený dvomi časťami a to časťou, ktorá je rovnobežná so zväzkom častíc, nazývaná barel a časťou kolmou na zväzkové trubice, nazývanou koncové uzávery /angl. end-caps/. Barelovú časť tvoria koncentrické cylindre a end-caps tvoria primárne disky.

PD je umiestnený v centre ATLAS-u. Poskytuje presné merania aj v čo najmenšej vzdialenosti od vertexu (miesta zrážky). Umožňuje detegovanie častíc

s krátkou životnosťou ako napr. B-hadróny. Pozostáva z 80 miliónov pixelov o veľkosti $50 \times 40 \mu m^2$ [5]. Je tvorený tromi koncentrickými cylindrami v barelovej časti a tromi diskami kolnými na zväzkové trubice na každej strane.

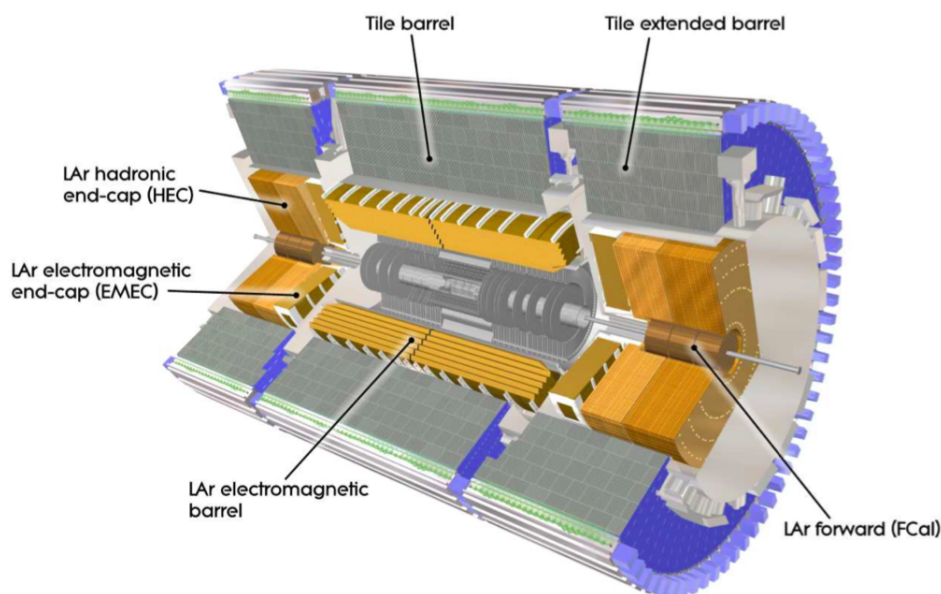
SCT poskytuje ďalšie informácie o dráhe častíc a taktiež prispieva k určeniu hybnosti a pozície vertexu. Detekčná oblasť je tvorená štyrmi cylindrickými barelovými vrstevami a 18 diskovými vrstvami. Každý zo 4088 silikónových detektorov, ktoré sú umiestnené na všetkých vrstvách SCT obsahuje 780 výstupových prúžkov /angl. strips/ po oboch stranách. Vyše 6 miliónov výstupných kanálov zabezpečuje vysokú presnosť určenia pozície nabitých častíc.

TRT je navrchnejšia časť vnútorného detektoru. Slúži k určeniu typu častíc, ktoré preleteli detektorom, ako napr. elektrón či pión. TRT je tvorený tzv. slamkami /angl. straws/ a obsahuje 350 000 výstupných kanálov [5].

1.2.3 Systém kalorimetrov

Ďalšou súčasťou detektoru ATLAS je systém kalorimetrov. Kalorimetre slúžia k určeniu energie, ktorú častica počas svojej cesty zanechala v detektore v podobe spŕšky. Vo väčšine prípadov je kalorimeter konštruovaný tak, že častice sa v ňom zastavia úplne alebo ich absorbuje natolko, že vránci detektoru odovzdajú celú svoju energiu. Kalorimetre sú schopné zastaviť väčšinu častíc, až na mióny a neutrína.

Na obrázku 1.2 je zobrazený systém kalorimetrov detektoru ATLAS. Tento systém je tvorený dvomi kalorimetrami a to Liquid Argon Calorimeter (LAr) a Tile Calorimeter (TileCal). Dokopy pokrývajú oblasť $|\eta| < 4,9$ a sú symetrické pozdĺž azimutového uhla.



Obrázek 1.2: Rez systémom kalorimetrov detektoru ATLAS [6]

LAr je umiestnený okolo vnútorného detektoru. Ako aktívny materiál používa tekutý argón a olovo alebo meď ako absorbátor. Tento kalorimeter pozostáva

z elektromagnetického barelu a z end-caps, ktoré sa delia na predný kalorimeter (FCal), elektromagnetické (EMEC) a hadrónové (HEC) endcaps. Ako aktívny materiál používa tekutý argón a olovo (barel, EMAC) alebo meď (HEC, FCal) ako absorbátor. Elektromagnetické kalorimetre sa využívajú na meranie energie častíc, ktoré elektromagneticky interagujú, ako napríklad elektróny či fotóny. Jety podstatnú časť svojej energie zanechajú taktiež v hadrónových kalorimetroch.

Okolo elektromagnetického kalorimetru je umiestnený hadrónový kalorimeter TileCal. Spoločne s elektromagnetickým kalorimetrom poskytuje TileCal vysoko presné merania hadrónov, jetov s $|\eta| < 1,6$ a chýbajúcej pričnej energie (MET). Je tvorený fixovaným centrálnym barelom a predĺženým barelom po oboch stranách detektoru. Každý barrel obsahuje 64 modulov. Tieto moduly sú v radiálnom smere rozdelené na tri vrstvy, ktoré sa ďalej delia do takzvaných ciel /angl. cells/.

TileCal používa železné dosky ako absorbátory a plastické scintilačné dlaždice ako aktívny materiál [7]. Scintilačné dlaždice sú umiestnené v rovine kolmej k zväzkom častíc. Výstup zo scintilačných dlaždíc (scintilačné žiarenia) prejde cez posunovače vlnovej dĺžky do fotonásobičov, ktoré konvertujú svetelný signál na elektrický výboj.

1.2.4 Miónový spektrometer

V kalorimetroch sme schopní detekovať všetky doposiaľ známe častice okrem miónov a neutrín. Práve na detekciu miónov, resp. na určenie ich hybnosti, slúži miónový spektrometer (MS). Nakoľko mióny sú približne 200-krát ťažšie ako elektróny, ich brzdné žiarenie sa neprejaví v skorších fázach preletu detektorom.

Miónový spektrometer je vonkajšia časť detektoru ATLAS. Je tvorený 4 000 samostatnými miónovými komorami a nachádza sa v toroidálnom magnetickom poli. Toto magnetické pole je v oblasti $|\eta| < 1,4$ generované veľkým barelovým toroidom a v oblasti $1,6 < |\eta| < 2,7$ dvomi end-cap magnetmi.

1.2.5 Trigger a systém pre získavanie dát

Dizajnovaná zrážková frekvencia pre LHC predstavuje 40 MHz. Pre detektor ATLAS by to predstavovalo 60 miliónov megabytov dátového objemu za sekundu [5]. Avšak množstvo vzniknutých udalostí je pre ďalšie spracovanie nezaujímavých a tu nastupuje triggrovací systém. Tento systém vyberie udalosti s danými charakteristikami, ktoré by mohli viesť k novým objavom.

Triggrovací systém vyberie z pôvodného počtu udalostí približne 1000 udalostí za sekundu. Tento systém pozostáva z dvoch fáz. V prvej fáze, nazývanej Level 1 (L1), ktorou je hardvérový trigger, sa zredukuje zrážková frekvencia /angl. event rate/ z pôvodných 40 MHz na 100 kHz [8]. Rozhodnutie o ponechaní udalosti sa vykoná menej ako dve a pol sekundy po jej vzniku. Udalosti, ktoré prešli triedením v L1, pokračujú do druhej fázy vo forme geometrických oblastí v η a ϕ , tzv. oblasti záujmu (RoI). Druhou fázou je serverový trigger nazývaný vysoko levelový trigger /angl. high level trigger, skr. HLT/. HLT pracuje na farme s približne 40000 CPU jadrami a osud udalosti rozhodne v priebehu 300 ms. HLT následne po vytriedení udalostí, vykoná objektovú rekonštrukciu v RoI.

1.3 Objektová rekonštrukcia na ATLAS-e

1.3.1 Rekonštrukcia miónov

Miónová rekonštrukcia prebieha z počiatku nezávisle v ID a MS [9]. Následne sa získané informácie z ID a MS skombinujú a vytvoria dráhy miónov, ktoré sa používajú k fyzikálnej analýze. Mióny sa delia na štyri druhy, v závislosti na tom, ktorý zo subdetektorov bol k ich rekonštrukcii použitý. Najväčší podiel miónov spadá do kategórie kombinovaných miónov (približne 96% [10]). Tieto mióny sú najčastejšie rekonštruované postupujúc zvonku-dnu, to znamená, že najprv sú mióny zrekonštruované v MS a následne pridelené k ID dráhe. Zvyšné druhy miónov zodpovedajú dráham zaznamenaným v ID so signatúrou v MS alebo v kalorimetroch.

Za zdroj systematických neistôt sa berú neistoty vonkajších príspevkov a rozlíšenia ID a MS dráh príslušiacich miónom.

1.3.2 Rekonštrukcia a kalibrácia jetov

Na ATLAS-e sú jety rekonštruované pomocou *anti* – k_t jet algoritmu [11], ktorý využíva energiu, ktorú jety odovzdali v elektromagnetických a hadrónových spŕškach v kalorimetroch. Vstupné dáta pre tento algoritmus predstavujú topologické clustery (topo-clustery) [12].

Topo-clustery odovzdanej energie sú tvorené celami kalorimetru a sú navrhnuté tak, aby sledovali vývoj spŕšok. Výhodou pri tvorbe clusterou je jemná segmentácia kalorimetrov ATLAS-u. Algoritmus si pri tvorbe topo-clusterov vyberie prvotnú celu, ktorej energia (signál) je podstatne vyššia v porovnaní so šumom. Následne k nej pridáva ďalšie cely, v prípade, že pomer ich signálu a šumu (S/N) je nad určitým prahom. Energia kalorimetrických ciel je meraná v elektromagnetickej mierke. Topo-cluster nesie energiu rovnú súčtu energií všetkých zahrnutých kalorimetrických ciel, je nehmotný a rekonštruovaný smer je určený z váženého priemeru pseudorapidít a azimutových uhlov ciel. Pre rekonštrukciu jetou sa používajú len tie topo-clustery, ktoré majú pozitívnu energiu.

Po rekonštrukcii jetov sa pomocou kalibrácie jetovej energetickej mierky (JES) obnoví energetická mierka zrekonštruovaných jetov na mierku tzv. truth jetov, zrekonštruovaných na časticovej úrovni. [13]. Jety, ktoré sa označujú ako truth jety, sú rekonštruované pomocou *anti* – k_t algoritmu s $R = 0,4$, kde sa ako vstupné dáta používajú stabilné častice konečného stavu z Monte Carlo (MC) generátoru. JES kalibrácia pozostáva z korekcie počiatku, pile-up korekcie, úplnej korekcie detektorovej odozvy založenej na MC simulácii, globálnej sekvenčnej korekcie a zvyškovej in situ kalibrácie [14].

Rekonštruovaný smer jetu vychádza z centra detektora ATLAS a preto je potrebná korekcia počiatku tak, aby jet vychádzal z vertexu, ktorý sa nemusí zhodovať s centrom ATLAS-u. Počas Run 2 sa vplyvom zvýšenej fokusácie zvýšil pile-up a preto je v ďalšom kroku JES kalibrácie odovzdaná energia pochádzajúca z pile-up interakcií odstránená z jetu. Následne sú aplikované kalibračné faktory závislé na energii a pseudorapidite, ktoré upravujú jetovú energiu v EM mierke do jetovej energetickej mierky. Tieto faktory sú získané pomocou udalostí zo MC simulácie. Nakoľko je teda kalibrácia jetov závislá na MC je potrebná dodatočná korekcia rozdielov medzi dátami a MC. Na túto korekciu sa využíva rovnováha priecnej

hybnosti jetu a dobre zmeraných referenčných objektov. Pre kalibráciu jetov s p_T do 1 TeV sa používajú Z+jet a γ +jet udalosti a pre kalibráciu jetov s vyššou p_T sa využíva systém spätného rázu zložený z dobre kalibrovaných jetov s nižším p_T . Pomocou dijet udalostí (dijet balance technique) sa kalibrujú jety s vyšším η , teda jety z nižšej $|\eta|$ -oblasti sa využívajú ku kalibrácii jetov s vyšším $|\eta|$.

1.3.3 Rekonštrukcia MET

Chýbajúca priečna hybnosť E_T^{miss} je definovaná ako nerovnováha hybnosti udalostí v priečnej rovine, kde platí zákon zachovania hybnosti. Veľkosť chýbajúcej priečnej hybnosti sa označuje ako chýbajúca priečna energia (MET). Prítomnosť E_T^{miss} v udalostiach môže byť spôsobená prítomnosťou neutrín alebo nových častíc za SM.

Pre rekonštrukciu E_T^{miss} sa používajú plne zrekonštruované elektróny, mióny, fotóny a jety - tzv. tvrdé objekty /angl. hard objects/ [15] a zrekonštruované dráhy nabitých častíc (mäkké objekty, angl. soft objects), ktoré neboli pridelené žiadnemu z tvrdých objektov.

2. Dátové a Monte Carlo vzorky

2.1 Dáta

Dáta použité pri analýze pochádzajú z obdobia zberu dát Run 2 na LHC, presnejšie z rokov 2015 a 2016. V tomto období dosahovala ťažisková energia protón-protón zrážok hodnotu $\sqrt{s} = 13$ TeV. Dáta zodpovedajú luminozite o hodnote $36,1 \text{ fb}^{-1}$.

Kvalitu dát označíme za dobrú, nakoľko sa počas obdobia zberu dát pre našu analýzu nevyskytli žiadne technické problémy ani na urýchľovači, ani na detektore, ktoré by ju mohli ovplyvniť.

2.2 Monte Carlo simulácia

Vzorky simulovaných udalostí leptokvarov s párovou produkciou s hmotnosťami medzi 200 GeV a 1000 GeV s krokom 50 GeV boli generované s MADGRAPH 2.4.3 [16, 17] a PYTHIA 8.212 [18]. Udalosti obsahujúce W bozón a di-bozón boli simulované pomocou SHERPA 2.2 MC [19]. Pre simuláciu produkcie $t\bar{t}$ a single-top kvarku sa používali POWHEG-BOX [20, 21, 22, 23] a PYTHIA 6.428 [24]. Odozva detektora na udalosti vo vzorkách pozadia SM bola vyhodnotená pomocou simulácie detektora GEANT4 [25, 26]. V MC pre signál nebola odozva kalorimetru simulovaná pomocou GEANT4 pre vysokú výpočetnú náročnosť tohoto programu. Namiesto toho bola použitá parametrizácia tejto odozvy zadefinovaná v rýchlej simulácii [27]. Nakoľko simulovaný detektor nie je dokonale presná kópia detektoru ATLAS, je potrebné na počet udalostí v MC aplikovať korekciu škálovacieho faktoru SF pre každé aplikované selekčné kritérium. Všetky simulované procesy popisujú tvrdé zrážky partonov na next-to-leading order (NLO) úrovni.

3. Testovanie štatistických hypotéz

V tejto kapitole sa budeme venovať niektorým štatistickým nástrojom, ktoré sú potrebné k analýze dát vo fyzike vysokých energií (HEP).

3.1 Funkcia hustoty pravdepodobnosti a funkcia vierohodnosti

Majme experiment, ktorého výsledkom je premenná X . Priestor elementárnych javov /angl. sample space/ zodpovedá množine všetkých možných hodnôt, ktoré môže X nadobudnúť. Opakovaním experimentu veľa krát získame rôzne výsledky a teda aj rôzne hodnoty X a sme schopní získať pravdepodobnosť pozorovania veličiny X v intervale $[x, x + dx]$, čo je dané **funkciou hustoty pravdepodobnosti** (pdf) $f(X)$ [28]. Často sa uvažuje o parametrickej rodine pdfs $f(X|\alpha)$, čo sa označuje ako pravdepodobnostný model alebo len model. Parametre modelu poväčšine reprezentujú parametre fyzikálnej teórie alebo experimentálne neurčitosti a označujú sa písmenami gréckej abecedy, napr. μ, θ, α, ν . Z celej množiny parametrov nás zvyčajne zaujíma iba zopár - parametre záujmu /angl. parameters of interest, POI/. Ostatné parametre sú uvádzané ako tzv. rušivé parametre /angl. nuisance parameters, NP/, nakoľko s nimi musíme počítať aj keď nás priamo nezaujímajú.

Povedzme, že $f(X)$ popisuje hustotu pravdepodobnosti pozorovania veličiny X pre jednu udalosť. Niekedy potrebujeme popísať hustotu pravdepodobnosti pre dátaset s veľkým počtom udalostí a udalosti berieme ako nezávisle ťahané z toho istého základného rozdelenia. Hustotou pravdepodobnosti potom bude súčin hustôt pre každú udalosť [29]. V situáciách, ktoré sú blízke tomu čím sa zaoberáme v danej bakalárskej práci, sú našimi pozorovateľnými počty udalostí v intervaloch možných hodnôt veličiny X . Jeden experiment potom pozostáva z opakovaného merania veličiny X a výsledkom daného experimentu potom sú počty udalostí, ktoré spadli do jednotlivých intervalov. Rozdelenie pravdepodobnosti týchto počtov je dané súčinom Poissonových rozdelení. Každé toto rozdelenie zodpovedá jednému intervalu hodnôt pre veličinu X . Veličina X teraz udáva počty udalostí v jednotlivých intervaloch.

Funkcia vierohodnosti /angl. likelihood function/ $L(\alpha)$ je numericky ekvivalentná ku $f(X|\alpha)$ s fixným X . Zatiaľ čo pdf sa vzťahuje na f ako funkciu X s pevným α , $L(\alpha)$ sa vzťahuje na f ako funkciu α s pevným X a model označuje úplnú štruktúru $f(X|\alpha)$. Teda môžeme povedať, že funkcia vierohodnosti je pravdepodobnosť, podľa predpokladu teórie, pozorovať údaje, ktoré boli skutočne získané.

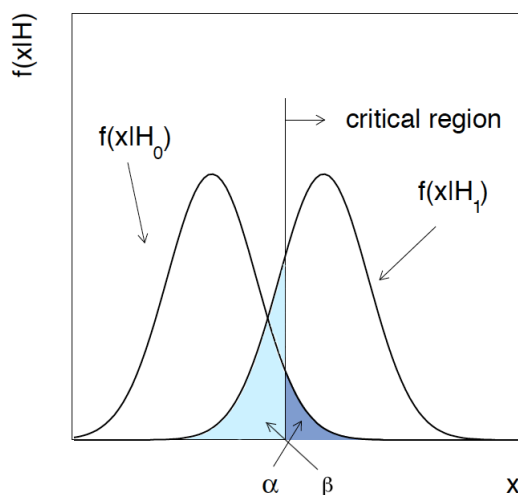
Pre zjednodušenie výpočtov je bežné pracovať s negatívnym prirodzeným logaritmom funkcie vierohodnosti $-\ln L(\alpha)$.

3.2 Test pomeru vierohodností (testovanie hypotéz)

Cielom štatistického testu je urobiť vyhlásenie o tom, ako dobre sú pozorované dáta v súlade s danými predpokladanými pravdepodobnosťami, t.j. hypotézou. Predpokladaná hypotéza sa tradične nazýva **nulovou hypotézou** H_0 [30], ktorá môže byť špecifikovaná napríklad hustotou pravdepodobnosti $f(x)$ náhodnej premennej x .

Pre určenie platnosti H_0 sa často používa porovnanie s **alternatívnou hypotézou** H_1 . Na zistenie miery zhody medzi pozorovanými dátami a danou hypotézou sa využíva funkcia nameraných premenných nazývaná testovacia štatistika $t(x)$ (angl. test statistic), ktorá mapuje dáta na jedno reálne číslo. Vyhlásenie o kompatibilite medzi údajmi a rôznymi hypotézami sa často formuluje v zmysle rozhodnutia o prijatí alebo odmietnutí danej nulovej hypotézy H_0 .

Prijat' alebo odmietnuť hypotézu môžeme pomocou definovania **kritickej oblasti** pre t . Ak je hodnota t pozorovaná v kritickej oblasti, nulová hypotéza sa odmieta a prijíma sa alternatívna hypotéza, teda H_0 a H_1 sa navzájom vylučujú. Kritická oblasť (ilustrované na obr. 3.1) sa vyberá tak, aby pravdepodobnosť pozorovania dát v tejto oblasti bola čo najvyššia, za predpokladu pravdivosti alternatívnej hypotézy, pričom pravdepodobnosť α za predpokladu H_0 je fixná a nazveme ju hladina významnosti testu /angl. significance level of test/.



Obrázek 3.1: Funkcia hustoty pravdepodobnosti $f(x|H_0)$ a $f(x|H_1)$ za predpokladu H_0 a H_1 a ilustrácia kritickej oblasti (prebraté z [30] a upravené)

Pravdepodobnosť, že bude nulová hypotéza zamietnutá aj keď je pravdivá sa označuje α a nazýva sa angl. size of the test (alebo chyba typu-I). Naopak ak prijmeme nulovú hypotézu, keď je pravdivá alternatívna hypotéza (chyba typu-II), táto pravdepodobnosť sa označuje β a $1 - \beta$ sa nazýva sila testu /angl. power of test/.

Hľadáme test, ktorý bude mať vysokú pravdepodobnosť zamietnutia nulovej hypotézy ak je nepravdivá, čo je práve to, čo nazývame sila testu. Ukazuje sa, že v prípade dvoch jednoduchých hypotéz (pravdepodobnostné modely bez

akýchkoľvek parametrov) existuje jednoduché riešenie, ktoré je dané *Neyman – Pearsonovou* lemmou, ktorá hovorí, že pre test danej hladiny významnosti hypotézy H_1 sa získa maximálna sila vzhľadom k H_0 , definovaním kritickej oblasti w tak, že pre $x \in w$ **pomer vierohodnosti** /angl. likelihood ratio/, t.j. pomer pdfs $f(x|H_0)$ a $f(x|H_1)$

$$y(x) = \frac{f(x|H_0)}{f(x|H_1)}, \quad (3.1)$$

je väčší ako alebo rovný danej konštante a je menej ako táto konštanta všade mimo kritickú oblasť.

Objavovanie novej fyziky spočíva typicky v tom, že sa hľadá signál aditívny na pozadí. Objav je formulovaný v zmysle testovania hypotéz, kde hypotéza iba-pozadie je nulová hypotéza a hypotéza signál-plus-pozadie je alternatívna hypotéza. Tvrdenie o objave je tvrdením, že údaje sú nekompatibilné s hypotézou iba-pozadie. Uvažujme prípad, kedy počítame udalosti v signálnej oblasti n_{SR} pričom očakávame ν_B udalosti od pozadia a ν_S udalostí od predpokladaného signálu. Je celkom zrejmé, že dôkaz pre signál sa objavuje ako nadbytok udalostí a rozumný spôsob ako kvantifikovať kompatibilitu pozorovaných údajov a nulovej hypotézy je vypočítať pravdepodobnosť, že iba pozadie by malo produkovať aspoň toto množstvo udalostí, túto pravdepodobnosť nazveme **p -hodnota** /angl. p-value/. Čiže, p -hodnota udáva pravdepodobnosť, že sme získali údaje s určitou vlastnosťou za predpokladu nulovej hypotézy. Ak je p -hodnota menšia ako daná konštanta (zvyčajne je touto konštantou hladina významnosti testu α) potom môžeme odmietnuť nulovú hypotézu.

Za odmietnutím hypotézy iba-pozadie stojí objav novej fyziky, avšak napriek tomu môžeme testovať rôzne modely a hľadať či nie sú kompatibilné s dátami. Ak vynesieme test s veľkosťou α pre pozitívne hodnoty parametrov, potom tie čo nie sú odmietnuté tvoria **oblasť spoľahlivosti** /angl. confidence region/ pre parametre s **úrovňou spoľahlivosti** /angl. confidence level/ $CL = 1 - \alpha$. Zväčša sa používa veľkosť testu $\alpha = 0,05$ a teda oblasť dôvery má úroveň dôvery 95%.

Aj keď p -hodnoty nie sú totožné s úrovňou spoľahlivosti, niekedy sa v analýze, kde nulová hypotéza korešponduje s hypotézou iba-pozadie a alternatívna hypotéza s hypotézou signál-plus-pozadie, používa značenie $CL_b = 1 - p_0$ a $CL_{s+b} = p_1$, kde p_0 označuje p -hodnotu pre H_0 a p_1 pre H_1 .

Dôležitým príkladom je, keď parameter μ je úmerný účinnému prierezu produkcie signálu a jeho existencia ešte nie je stanovená. Tu sa často požaduje stanoviť hornú limitu pre tento parameter. Testujeme premenu hypotézu s rôznymi hodnotami μ (inverzný test hypotézy) a pre každú hodnotu μ určíme príslušnú p -hodnotu. V prípade, že požadujeme veľkosť testu $\alpha = 5\%$, každú hypotézu s p -hodnotou pod 5% môžeme zamietnuť s $CL = 95\%$. Najvyššia hodnota μ , ktorú neodmietame, sa nazýva **horná hranica** μ /angl. upper limit/.

Fluktuácia smerom nadol v počte udalostí pochádzajúcich od pozadia môže niekedy viesť k limite na signálový proces, ktorý nie je fyzikálne možný a vtedy sa ako alternatíva používa namiesto p_0 pomer $CL_s = CL_{s+b}/CL_b = p_1/(1 - p_0)$. Vďaka tomuto sa vyhneme zamietnutiu hypotézy v prípade, že máme malú alebo žiadnu senzitivitu na rozlíšenie hypotéz H_0 a H_1 .

3.3 Pomer profilových vierohodnosti

V predchádzajúcej kapitole sme brali očakávané množstvo udalostí od pozadia, resp. signálu, b resp. s ako známu hodnotu bez neurčitosti. V skutočnosti to však neplatí vždy a je treba zaviesť rušivé parametre, popisujúce experimentálne a teoretické neurčitosti daného modelu.

Je viacero možností ako rozšíriť test pomeru vierohodnosti pre prípad existencie rušivých parametrov, avšak my si popíšeme len jeden a to **profilovú vierohodnosť**. Predpokladajme, že vierohodnosť závisí na parametre záujmu μ a na rušivých parametroch $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_N)$. Profilová vierohodnosť je potom definovaná ako

$$L_p(\mu) = L(\mu, \hat{\theta}(\mu)), \quad (3.2)$$

kde $\hat{\theta}(\mu)$ je hodnota, ktorá maximalizuje $L(\mu, \theta)$ pre konkrétnu hodnotu μ a nazýva sa profilovaná hodnota rušivého parametru θ . Profilová vierohodnosť tým pádom závisí len na μ [30].

Pri teste pomeru vierohodnosti sme uviedli, že tento test môžeme použiť v prípade pravdepodobnostného modelu bez akýchkoľvek parametrov. Čo však v prípade, že náš model obsahuje viacero parametrov? Alternatívou pre testovanie hypotetických hodnôt μ je test založený na pomere profilových vierohodností (PLL),

$$\lambda(\mu) = \frac{L_p(\mu)}{L(\hat{\mu}, \hat{\theta})}, \quad (3.3)$$

kde $L_p(\mu)$ je profilová vierohodnosť definovaná vzťahom (3.2) a $\hat{\mu}$, $\hat{\theta}$ sú hodnoty parametrov, ktoré maximalizujú funkciu vierohodnosti L .

Vyššie hodnoty $\lambda(\mu)$ indikujú väčšiu kompatibilitu dát s hypotetickou hodnotou μ , pričom $\lambda(\mu) \in \{0; 1\}$. $\lambda(\mu)$ môžeme použiť na konštrukciu štatistiky na testovanie rôznych hodnôt μ . Často sa za relevantné berú len kladné hodnoty μ a preto sa pri testovaní nulovej hypotézy $\mu = 0$ sústreďujeme na $\hat{\mu} > 0$. Ak by sme našli $\hat{\mu} < 0$, znamenalo by to, že nepozorujeme ani len tolko udalostí, koľko by sme očakávali od pozadia a táto nekompatibilita dát s hypotézou $\mu = 0$ nestojí za objavom novej fyziky. Teda v prípade, že testujeme hypotézu iba-pozadie majme testovaciu štatistiku pre objav

$$q_0 = \begin{cases} -2 \ln \lambda(0) & \hat{\mu} \geq 0, \\ 0 & \hat{\mu} < 0, \end{cases} \quad (3.4)$$

kde $\lambda(0)$ je PLL pre $\mu=0$ a vyššie hodnoty q_0 korešpondujú s väčšou nekompatibilitou medzi dátami a hypotézou.

V prípade, že chceme získať hornú limitu parameteru μ zavádzame testovaciu štatistiku pre zavrnutie

$$q_\mu = \begin{cases} -2 \ln \lambda(\mu) & \hat{\mu} \leq \mu, \\ 0 & \hat{\mu} > \mu. \end{cases} \quad (3.5)$$

Pre nájdenie p -hodnoty potrebujeme rozdelenie testovacej štatistiky. Pre dostatočne veľký objem vzoriek sa táto distribúcia približuje k asymptotickej forme rozdelenia χ^2 , kde počet stupňov voľnosti sa rovná počtu POI, teda v našom prípade je to jedna [31]. Asymptotické rozdelenie PLL je nezávislé na rušivých parametroch a teda nie sme nútení zadať ich konkrétne hodnoty pri počítaní p -hodnoty.

Avšak pri konečnom počte vzoriek nie sú asymptotické formuly presné a teda p -hodnota do istej miery obecné závisí na rušivých parametroch. V takomto prípade musíme určiť rozdelenie testovacej štatistiky iným spôsobom. Bežne používaný spôsob sú rôzne MC metódy.

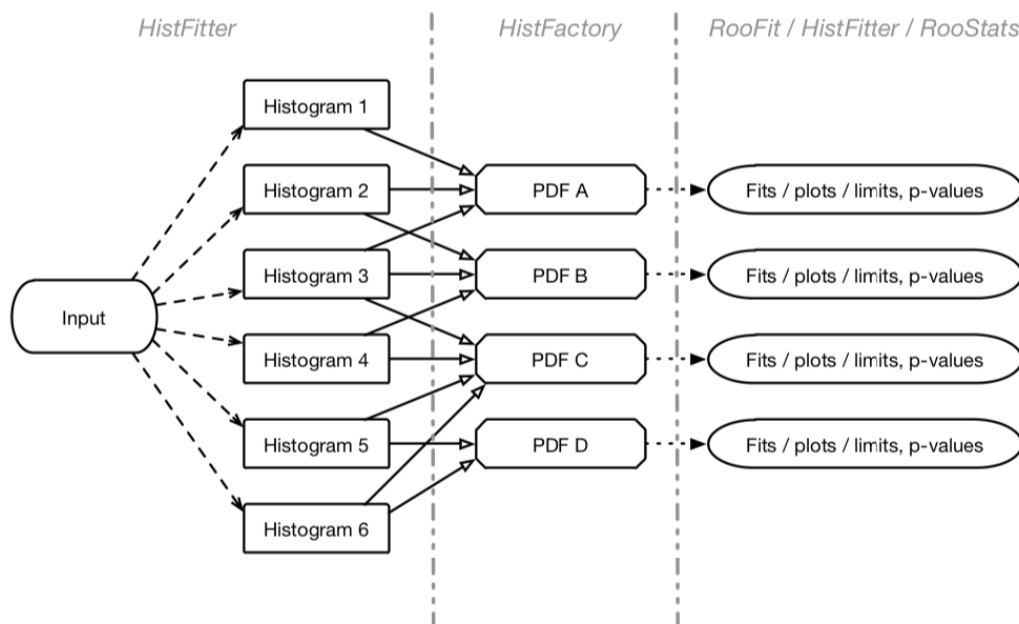
4. Analýza dát

4.1 HistFitter

Pre analýzu dát a vyhodnotenie nášeho hľadania leptokvarkov v pp zrážkach na experimente ATLAS sme používali program pre analýzu štatistických dát HistFitter [32]. V nasledujúcej časti si ho čiastočne popíšeme spolu s ďalšími balíkmi, ktoré zahŕňa.

Kolaborácia ATLAS používa HistFitter na analýzu dátasetov pochádzajúcich z pp zrážok na LHC. HistFitter je napísaný v jazykoch Python a C++. Na konštrukciu parametrických modelov a vykonávanie štatistických testov dát, využíva HistFitter balíky HistFactory [33] a RooStat [34], ktoré sú založené na RooFit [35] a ROOT [36].

Ako vstup používa HistFitter predformátované vstupné dátové vzorky z užívateľky definovaného konfiguračného súboru. Na základe užívateľky definovanej konfigurácie HistFitter automaticky pripraví počiatočné histogramy zo vstupných dát s použitím ROOT-u. Tieto histogramy sú s pomocou HistFactory skombinované na konštrukciu zodpovedajúcej PDF a následne je každá z PDF uložená v objekte `RooWorkspace` spolu s datasetom a modelovou konfiguráciou. Zkonštruované PDFs sa používajú na vykonanie fitov dát s RooFit, štatistických testov s RooStats a na vytváranie grafov a tabuliek. Tento proces je načrtnutý v schéme na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1: Prehľad postupnosti spracovania v HistFitteri [32]

Centrálna konfigurácia HistFitteru je postavená na správcovi konfigurácii `configManager`. Pri spúšťaní HistFitteru používateľ pracuje s Python rozhraním `configManager` a definuje pre každý dátový model objekt `fitConfig`. Správca konfigurácie môže mať ľubovoľný počet objektov `fitConfig`.

Objekt `fitConfig` obsahuje PDF popisujúce dáta z kontrolnej a signálovo-

vej oblasti (CR, SR) patriace do modelu, spoločne s meta-dátami potrebnými k vybudovaniu, vizualizácii a interpretácii každej konfigurácie. SR je oblasť fázového priestoru, získaná aplikovaním selekčných kritérií tak, aby daný signálny model predpovedal významný nadbytok udalostí nad predpovedaným pozadím. Na odhadnutie procesov pozadia kontaminujúcich SR slúži CR, v ktorej dominantné pozadie je kontrolované porovnaním s dátovými vzorkami a táto oblasť je navrhnutá tak aby mala vysokú čistotu pre jeden typ pozadia a nemala by byť kontaminovaná signálom.

Pre konštrukciu parametrického modelu, popisujúceho nominálne predpovede a súvisiace systematické variácie viacerých signálov a procesov pozadia vo viacerých oblastiach, využíva HistFitter balik HistFactory. Konštrukcia parametrického modelu je založená na vstupných histogramoch.

HistFactory zkonštruuje PDF, ktorá zahŕňa parameter záujmu, ako napr. normalizačný faktor procesov pozadia, a rušivé parametre, ktoré parametrizujú vplyv systematických chýb. PDF pre všetky hodnoty rušivých parametrov je v HistFactory získaná množstvom interpolačných algoritmov. Rôzne vzorky majú systematické neistoty, resp. *systematiky*. Systematické neistoty môžu byť štatistické, teoretické alebo experimentálne. Každá systematická chyba i je opísaná rušivým parametrom θ_i , ktorý kontinuálne interpoluje medzi variáciou a nominálnymi vzormi, napr. $\theta_i = \pm 1$ pre $\pm 1\sigma$ variáciu a $\theta_i = 0$ pre nominálny vzor, kde 1σ predstavuje jednu štandardnú odchýlku. Výsledkom HistFactory je `RooWorkspace` - trvalý objekt `RooFit` obsahujúci parametrizovanú PDF, dataset a pomocný objekt, ktorý sumarizuje konfiguráciu modelu.

Pomocou balíka `RooStats` je HistFitter schopný uskutočniť pár prednastavených štatistických testov, ako test hypotéz signálových modelov, konštrukciu očakávaných a pozorovaných intervalov spoľahlivosti parametrov modelu (napr. horná hranic 95% úrovne spoľahlivosti sily /angl. rate/ signálneho procesu) a stanovenie významnosti potenciálne pozorovaného udalostného prebytku.

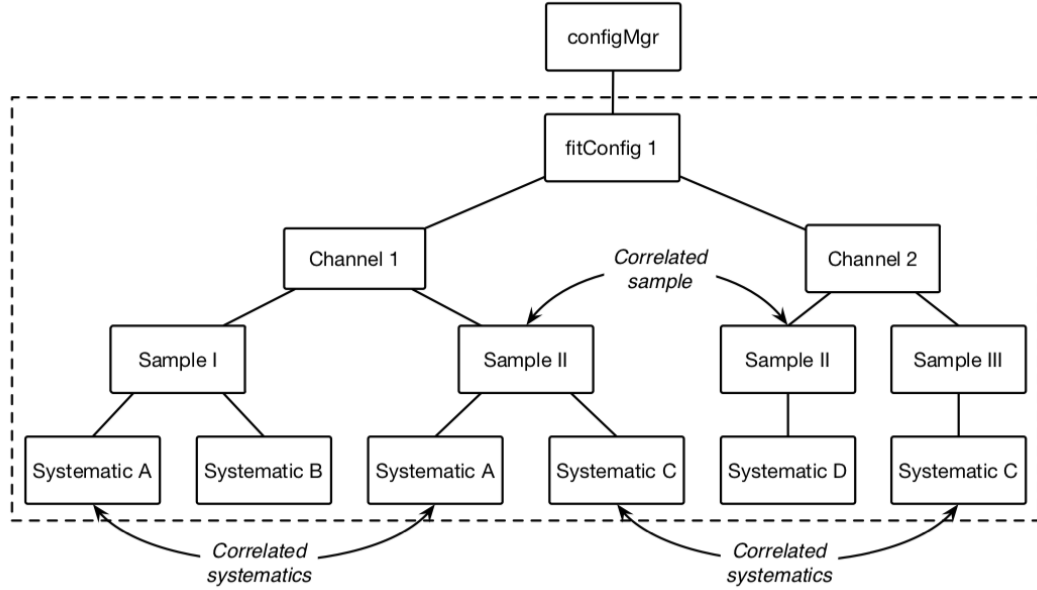
HistFitter využíva klasickú metódu na vykonanie testov hypotéz a používa testovacie štatistiky 3.4 a 3.5.

Funkcia vierohodnosti má v terminológii HistFactory viacero *kanálov* /angl. *channels*/, ktoré stotožníme s CR, SR a VR oblasťami. Tieto kanály potrebujú vstupy vo forme *vzoriek* /angl. *samples*/, odpovedajúce signálnym procesom a procesom pozadia pre danú oblasť. Obrázok 4.2 znázorňuje návrh typickej konfigurácie fitu pre HistFitter.

Najpoužívanejší typ vstupu, ktorý sme aj my použili pri našej analýze, je `TTree` - ROOT-ovská dátová štruktúra uložená v `TFile`, v ktorej je zoznam udalostí mapovaný na zoznam kľúčových hodnôt charakterizujúcich vlastností každej udalosti. Na konštrukciu daného samplu, HistFitter používa selekčné kritéria udalostí a aplikuje predvolené vzorkové váhy /angl. *weights*/ . Váhy sa odovzdávajú ako string, čo umožňuje jednoduché použitie váh uložených v ROOT `TTree`.

V HistFitteri sa systematické chyby aplikujú so špeciálnou triedou `Systematic` s niekoľkými možnosťami. Objekt `Systematic` môže byť koncipovaný ako dublet vzoriek špecifikujúcich variácie nahor a nadol okolo rodičovského `Sample`. Pri použití `TTree` vstupov, používajú sa dve metódy na výpočet variácií *systematik* nahor/nadol: *weight-based* a *tree-based*.

Na uskutočnenie fitu sa používajú rôzne fitové stratégie, ktoré sa rozlišujú na základe použitia konkrétnych kombinácií CRs, SRs a VRs, a či berú v úvahu sig-



Obrázek 4.2: Konfigurácia fitu v HistFitteri [32]

nálny model alebo nie. Tri najpoužívanejšie stratégie v HistFitteri sú definované ako background-only fit, model-dependent signal fit a model-independent signal fit. Pri našej analýze sme používali model-dependent signal fit a preto si ho bližšie popíšeme.

Model-dependent signal fit sa používa s cieľom študovať špecifický signálový model. Fit sa vykonáva súčasne v SR a CR a signálové vzorky sú, spoločne so vzorkami od pozadia, zahrnuté vo všetkých oblastiach, nie len v SR, aby sa brala v úvahu kontaminácia signálom v CR.

4.2 Signálna a kontrolné oblasti

4.2.1 Selekcia objektov a udalostí

Pri našej analýze, v ktorej sme hľadali párovú produkciu leptokvarkov, sme sa zamerali na miónový kánál $pp \rightarrow LQ LQ \rightarrow \mu\nu jj$. Vyberali sme udalosti, ktoré obsahovali aspoň 2 jety s $p_T > 60$ GeV a $|\eta| < 2,5$, mión s $p_T > 65$ GeV a $|\eta| < 2,5$ a $E_T^{\text{miss}} > 40$ GeV.

4.2.2 Oblasti citlivé na signál

Vzorky simulovaných udalostí leptokvarkov pochádzali z párovej produkcie s hmotnosťami od 200 GeV do 1000 GeV s krokom 50 GeV.

Použitím vhodných selekčných kritérií (angl. cuts) na danú veličinu sme sa obmedzili len na tie udalosti, pre ktoré táto veličina nadobúda väčšej hodnoty ako je istá hraničná hodnota. Použili sme kombináciu trojice selekčných kritérií veličín S_T , m_T a m_{LQ} , pre ktoré pomer počtu očakávaných udalostí od signálu a odmocniny z očakávaného počtu udalostí od pozadia nadobúdal maximálnej hodnoty [37]. S_T označuje súčet priechnej hybnosti miónu, chýbajúcej priechnej

energie a dvoch jetov s najväčšou priechnou hybnosťou, m_T je priechna hmotnosť miónu a E_T^{miss} , ktorá je definovaná ako $m_T = \sqrt{(\sum_i E_i)^2 - (\sum_i p_i^x)^2 - (\sum_i p_i^y)^2}$ a m_{LQ} je invariantná hmotnosť páru miónu a jetu. Sú testované obe možnosti párovania jetu a miónu (alebo E_T^{miss}) a vyberie sa párovanie, ktoré má menšiu absolútnu hodnotu rozdielu $|m_{LQ} - m_{LQ}^T|$. Hodnoty použitých selekčných kritérií sú uvedené v tabuľke 4.1

| Hmotnosť leptokvarkov [GeV] | m_T [GeV] | S_T [GeV] | m_{LQ} [GeV] |
|-----------------------------|-------------|-------------|----------------|
| 200 | 200 | 350 | 150 |
| 300 | 250 | 500 | 150 |
| 400 | 300 | 700 | 200 |
| 500 | 400 | 800 | 200 |
| 600 | 500 | 1000 | 350 |
| 700 | 500 | 1100 | 450 |
| 800 | 560 | 1200 | 370 |
| 900 | 500 | 1400 | 440 |
| 1000 | 500 | 1600 | 650 |

Tabuľka 4.1: Použité selekčné kritéria [37]

V tabuľke 4.1 môžeme vidieť, že sme mali získané selekčné kritéria iba pre hmotnosti LQ s krokom 100 GeV, pre LQ s hmotnosťami 250, 350, ..., 950 GeV sme použili selekčné kritéria pre príslušné nižšie hmotnosti.

4.2.3 Kontrolné oblasti

Pri hľadaní leptokvarkov sme používali dve kontrolné oblasti s nasledujúcimi selekčnými kritériami: $40 \text{ GeV} < m_T < 130 \text{ GeV}$ a $E_T^{\text{miss}} / \sqrt{p_T^{j1} + p_T^{j2} + p_T^\mu} > 4$. Udalosti, ktoré navyše obsahovali dva alebo viac b -tagged jetov tvorili kontrolnú oblasť $t\bar{t}$ (ttbarCR) a udalosti, ktoré neobsahovali žiadny b -tagged jet tvorili kontrolnú oblasť W (WCR).

4.3 Výsledky analýzy

Prvým krokom pri našej analýze bolo vytvoriť konfiguračný súbor pre Hist-Fitter. V tomto konfiguračnom súbore sú zadané vzorky pre pozadie a pre signál, systematické neistoty (tabuľka 4.2) a oblasti fitu (v našom prípade to boli dve CR a jedna SR, ktorá je rôzna pre každú hmotnosť LQ) s danými selekčnými kritériami, ktorým tieto oblasti musia podliehať. V úvahu sa berú len dva druhy systematických neistôt a to experimentálne systematické neistoty a štatistické neistoty, ktoré vznikli kvôli obmedzenému množstvu simulovaných procesov. Teoretické neurčitosti simulovaných procesov boli vynechané.

Signál a pozadie sú dané pdf vybudovanej s použitím buď SR alebo niektorej z CR, ktoré sme popísali v predchádzajúcej podkapitole 4.2. Systematické neistoty sú zahrnuté v pdf ako rušivé parametre. Ich variácie nadol/nahor/nominal sú vyobrazené v grafoch na obrázku 4.3 pre vzorky produkcie $t\bar{t}$ v ttbarCR, $W \rightarrow \mu\nu$ v WCR a v SR pre vzorky produkcie LQ800, $t\bar{t}$ a $W \rightarrow \mu\nu$. Všetky systematiky sú normalizované ("normHistoSys"), čo znamená, že pre každú vzorku je súčet

| Názov | Popis |
|-------------------------|---|
| tree-based | |
| EG_Reso | rozlíšenie energie fotónov a elektrónov |
| EG_Scale | meranie energie fotónov a elektrónov |
| JER_SingleNP | rozlíšenie energie jetov |
| JES_GroupedNP_1/2/3 | meranie energie jetov |
| JET_Eta | pseudorapidita jetov |
| MET_SoftTrk_ResoPara | rozlíšenie energie paralelnej projekcie hybnosti mäkkej zložky E_T^{miss} do p_T^{hadr} |
| MET_SoftTrk_ResoPerp | rozlíšenie energie kolmej projekcie hybnosti mäkkej zložky E_T^{miss} do p_T^{hadr} |
| MET_SoftTrk_Scale | škála E_T^{miss} meranie mäkkej zložky E_T^{miss} |
| MUON_Reso_ID | rozlíšenie energie miónom nameranej v ID |
| MUON_Reso_MS | rozlíšenie energie miónom nameranej v MS |
| MUON_Sag_ResBias | škála miónovej hybnosti |
| MUON_Sag_Rho | škála miónovej hybnosti |
| MUON_Scale | škála miónovej hybnosti |
| weight-based | |
| MUON_EffSF_STAT | SF efektivity miónovej rekonštrukcii (štat. komponenta) |
| MUON_EffSF_SYST | SF efektivity miónovej rekonštrukcii (syst. komponenta) |
| MUON_IsoSF_STAT | SF efektivity izolácie miónov (štat. komponenta) |
| MUON_IsoSF_SYST | SF efektivity izolácie miónov (syst. komponenta) |
| MUON_TTVA_STAT | SF efektivity spájania dráha-vrchol (štat. komponenta) |
| MUON_TTVA_SYST | SF efektivity spájania dráha-vrchol (syst. komponenta) |
| puWeight | množstvo pile-up |
| trigSF_stat | SF efektivity triggeru (štat. komponenta) |
| trigSF_syst | SF efektivity triggeru (syst. komponenta) |
| btagSF_B/C/L/ex/exFromC | SF efektivity b -taggingu |

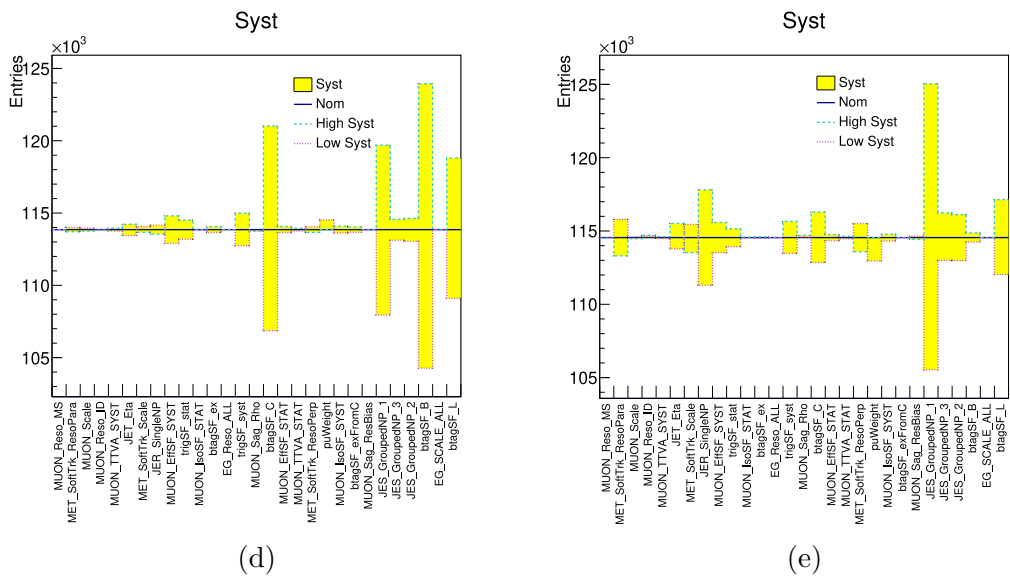
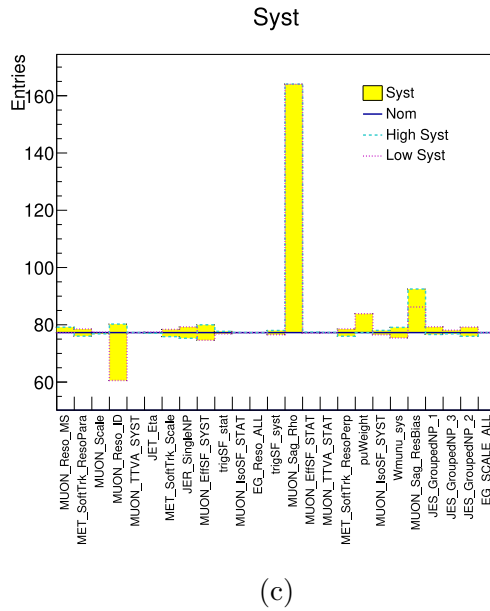
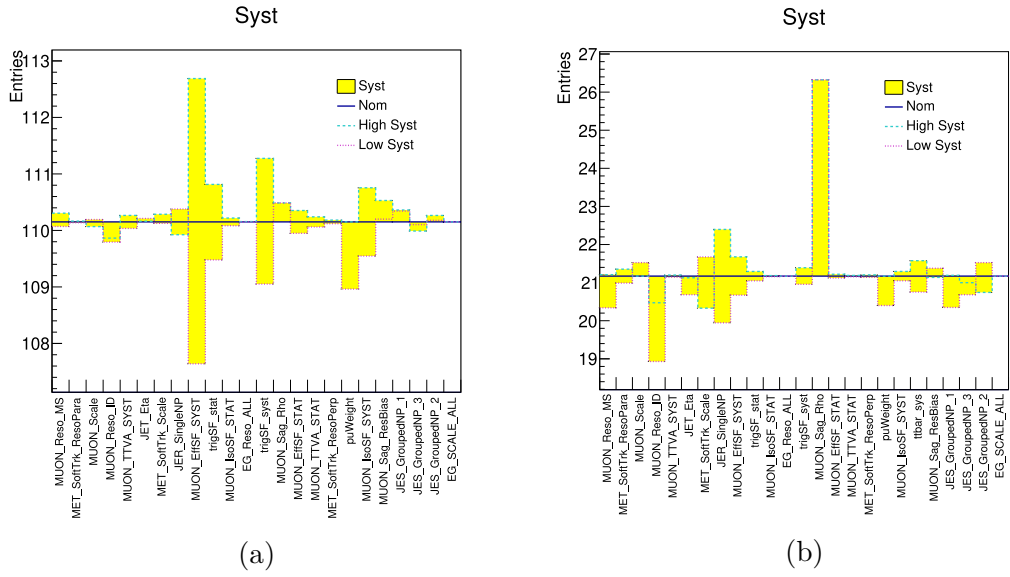
Tabulka 4.2: Zoznam a popis zdrojov systematických chýb

udalostí zo všetkých oblastí (CRs, SR) rovnaký pre normal, up-variáciu a down-variáciu.

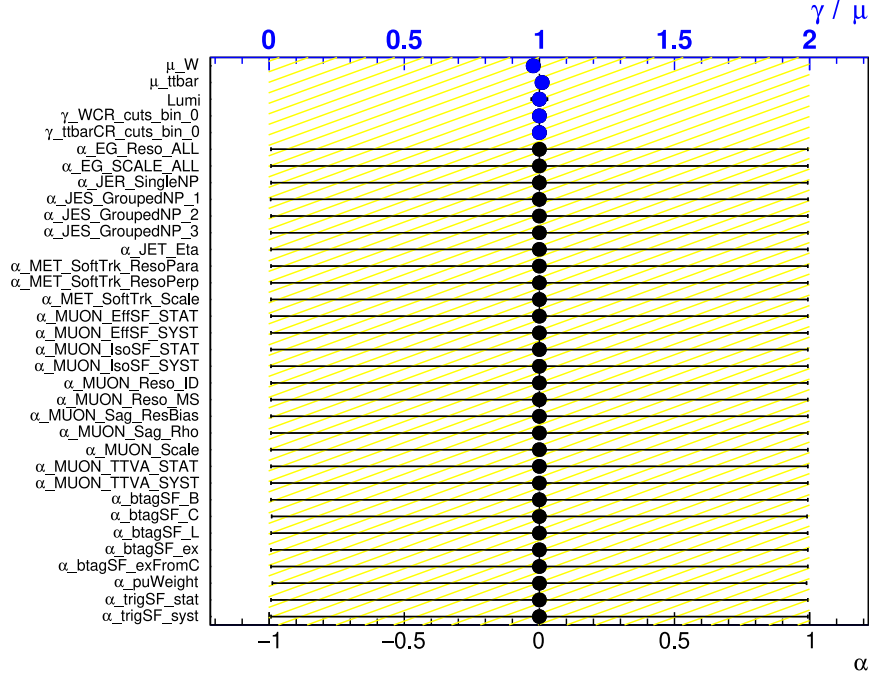
Fit bol rozdelený do dvoch častí. Najprv sa fitovali len CRs a následne sa normalizačné faktory pre pozadia μ_{ttbar} a μ_W , získané z CRs fitu zafixovali v SR fite. Parametr μ_{ttbar} , resp. μ_W odpovedá sile procesu pozadia s produkciou $t\bar{t}$, resp. $W \rightarrow \mu\nu$. Do fitu SR sme taktiež pridali dve systematiky, ktoré udávajú chyby normalizačných faktorov μ_{ttbar} a μ_W .

Kontrolné oblasti sú obohatené v špecifickom procese pozadia a majú zanedbateľnú kontamináciu signálom. Používajú sa na normalizáciu predpokladaného pozadia na dáta. Obrázok 4.4 zobrazuje hodnoty parametrov po prevedení fitu v kontrolných oblastiach ttbarCR a WCR. Očakávanej hodnote systematiky po prametrizácii rušivým parametrom odpovedá hodnota 0 a jej $\pm 1\sigma$ odpovedá ± 1 . Pri systematikách teda očakávame, že im príslušiacie parametre budú blízke 0, čo aj môžeme pozorovať v našom prípade. Všimnime si, že chyba parametrov príslušiacich systematikám je po fite rovná alebo menšia ako 1, čo značí, že fit bol schopný znížiť neistotu vzhľadom k hodnote, ktorú sme poskytli na začiatku ako vstup. Na obrázku 4.5 sú vyobrazené počty udalostí príslušiacich jednotlivým vzorkám v daných kontrolných oblastiach pred prevedením fitu a po ňom.

Na obrázku 4.6 je korelačná matica parametrov po ich fitovaní v CR. Môžeme vidieť, že žiadne dva rušivé parametre nekorelujú. Vzájomnú koreláciu si mô-



Obrázek 4.3: Variácie systematík nahor/nadol/nominal pre všetky systematiky v SR vo vzorkách a) LQ b) $t\bar{t}$ c) $W \rightarrow \mu\nu$ pre hmotnostný bod LQ800 a v kontrolných oblastiach d) $t\bar{t}b\bar{c}R$ vzorka $t\bar{t}$ a e) WCR vzorka $W \rightarrow \mu\nu$



Obrázek 4.4: Hodnoty parametrov získané CRs fitom. Parametre μ odpovedajú normalizačným faktorom pre hlavné procesy pozadia, parameter γ udáva celkovú štatistickú chybu na odhadoch pozadia z limitovanej MC štatistiky a parametre α patria systematickým neistotám z tabuľky 4.2

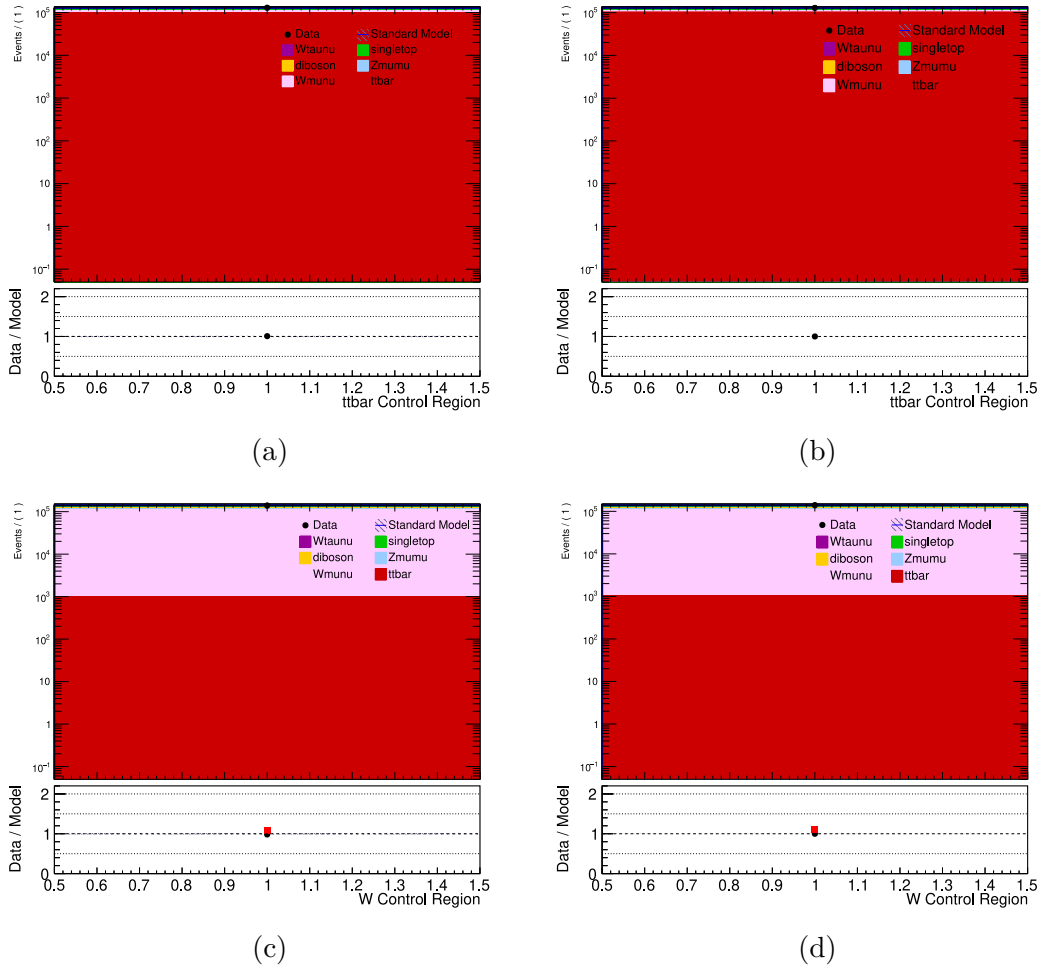
žeme všimnúť iba medzi μ_{ttbar} , resp. μ_W a ostatnými parametrami. Väčšina parametrov systematickí nekoreluje s μ_{ttbar} a μ_W a záporná korelácia parametrov μ_{ttbar} a $\gamma_{stat_ttbarCR_cuts_bin_0}$, resp. μ_W a $\gamma_{stat_WCR_cuts_bin_0}$ je očakávaná. Výsledné hodnoty parametrov μ_{ttbar} a μ_W po CRs fite sú

$$\begin{aligned}\mu_W &= 0,977 (+0,024,-0,024), \\ \mu_{ttbar} &= 1,010 (+0,019,-0,020).\end{aligned}$$

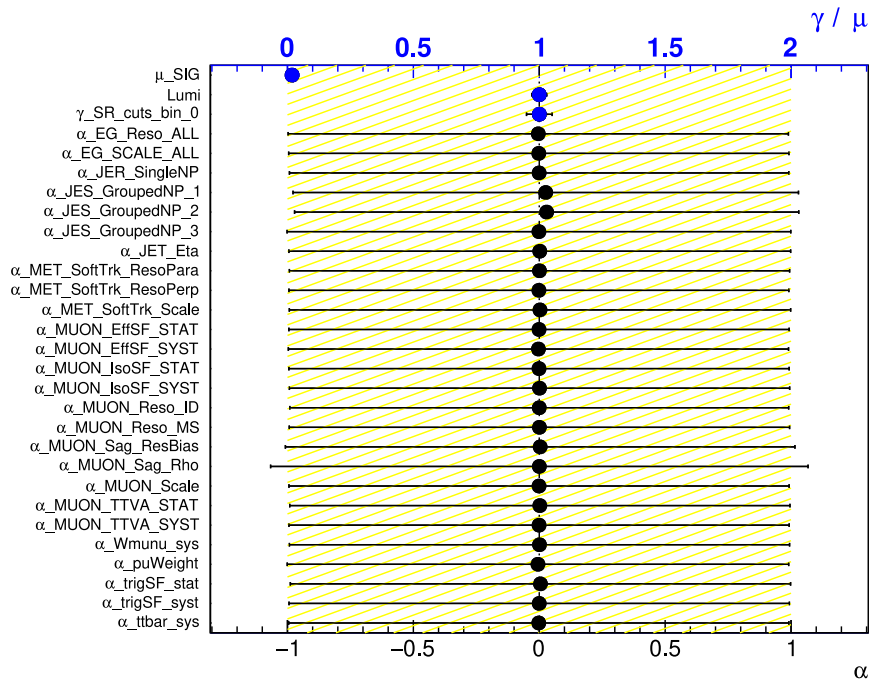
Pri SR fite, pdf zahŕňa silu signálu μ_{SIG} ako parameter záujmu. Sila signálu predstavuje škálovací faktor účinného prierezu signálu vzhľadom na SM predpovede. Tento fit bol vykonaný pre všetky hmotnostné body leptokvarkov. Graficky spracované výsledné hodnoty parametrov získané SR fitom pre hmotnostné body LQ200, LQ500 a LQ800 sú uvedené na obrázku 4.7. Hodnoty μ_{ttbar} a μ_W odpovedajú hodnotám normalizačných faktorov získaných v CRs fite. Na obrázkoch 4.8, 4.9 4.10 sú vyobrazené korelačné matice medzi parametrami fitu po jeho prevedení pre dané hmotnosti leptokvarkov. Znovu si môžeme všimnúť, že žiadne dva rušivé parametre nekorelujú. U μ_{SIG} sa, podobne ako to bolo v CRs fite, objavuje záporná korelácia s parametrom gamma a navyše je viditeľná korelácia s $\alpha_{JES_GroupedNP_1}$ a $\alpha_{MUON_Reso_ID}$.

Predpovedané počty udalostí príslušiacich jednotlivým procesom v SR pred prevedením fitu a následne vyhodnotené fitom sú spoločne s dátami vyobrazené v histogramoch na obrázku 4.11 pre hmotnosti leptokvarkov 200 GeV, 500 GeV, 800 GeV. Spodný panel týchto grafov zobrazuje pomer pozorovaných dát a počtu

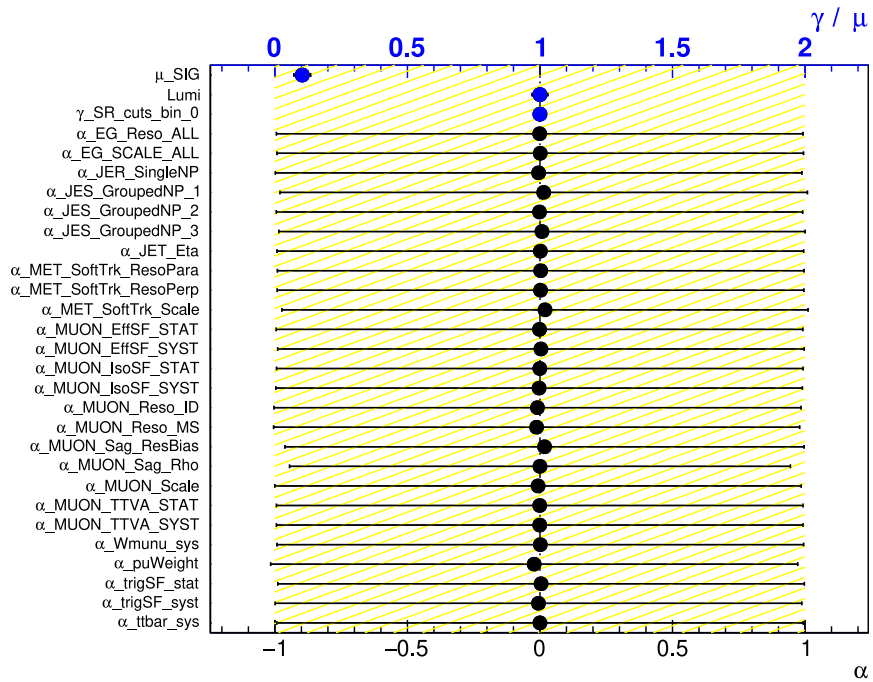
udalostí od procesov SM spolu so signálom. Pre hmotnosť leptokvarkov 200 GeV bola očakávaná vysoká hodnota udalostí pochádzajúcich od signálu a v spodnom paneli grafu pred fitom je možné pozorovať vysokú nekopatibilitu predpovedaného modelu a pozorovaných dát. Po fitovaní predpovedaného modelu na dáta bola hodnota sili signálu blízka nulovej hodnote (obr. 4.7a), čo aj odpovedá uvedeným grafom. Sila signálu nadobudla po fite nižšej hodnoty pre všetky uvažované hmotnostné body leptokvarkov.



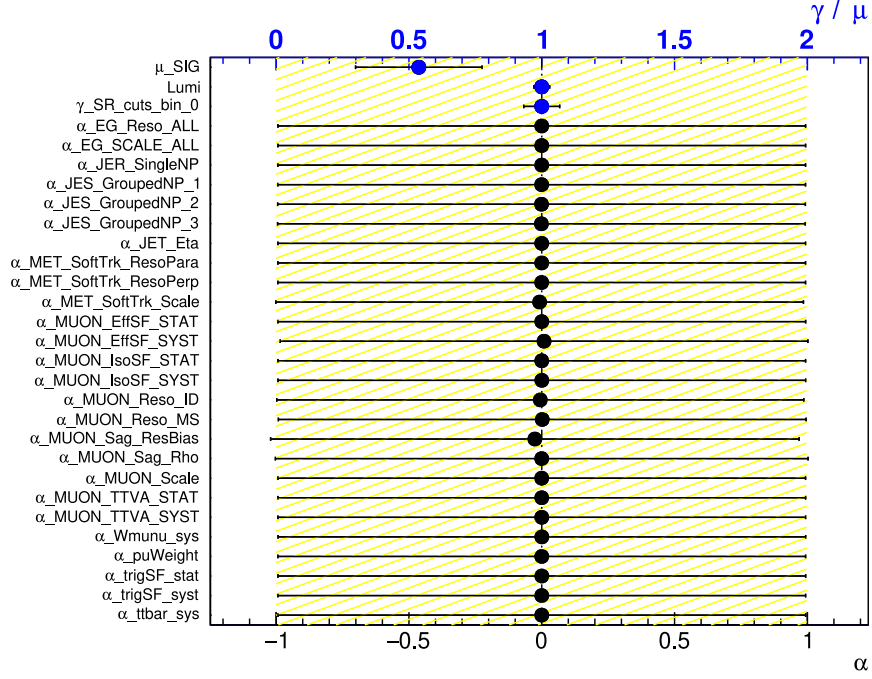
Obrázek 4.5: Kontrolná oblasť $t\bar{t}$ CR a) pred a b) po prevedení fitu a kontrolná oblasť WCR c) pred a d) po prevedení fitu. Dáta sú zobrazené spoločne s príspevkom od pozadia odpovedajúcim procesom $W(\tau\nu)$, single-top, diboson, $Z(\mu\mu)$, $W(\mu\nu)$ a $t\bar{t}$. Modrá čiara udáva počet udalostí SM. Šedé šrafované pásmo odpovedá celkovej neistote. V spodnom paneli je vyobrazený pomer medzi pozorovanými dátami a predpovedaným modelom (čierna bodka).



(a)



(b)



(c)

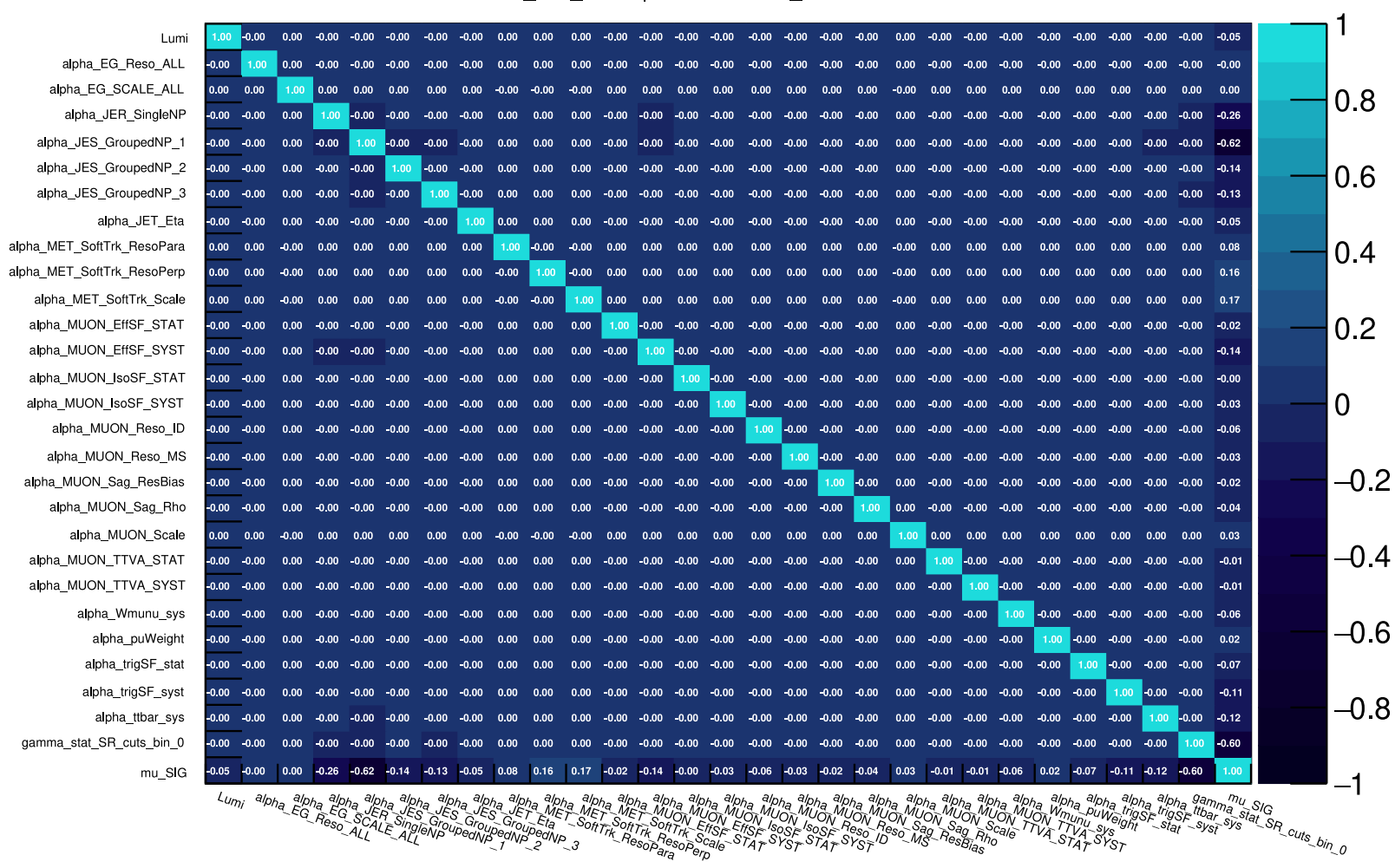
Obrázek 4.7: Hodnoty parametrov získané fitom SR pre hmotnostné body a) LQ200 b) LQ500 c) LQ800. Parameter μ_SIG odpovedá sile signálu a predstavuje POI daného fitu. Parameter γ udáva celkovú štatistickú chybu na odhadoch pozadia a signálu z limitovanej MC štatistiky a parametre α patria systematickým neistotám z tabuľky 4.2

Na obrázku 4.12 sú vykreslené funkcie profilových vierohodností (PLL) niektorých rušivých parametrov fitu. Vykreslením týchto funkcií je možné zkontrolovať funkciu, ktorá patrí do veľa dimenzionálneho priestoru. PLL vo väčšine prípadov v oblasti 1σ odpovedá parabole, čo platí pre všetky vyobrazené grafy.

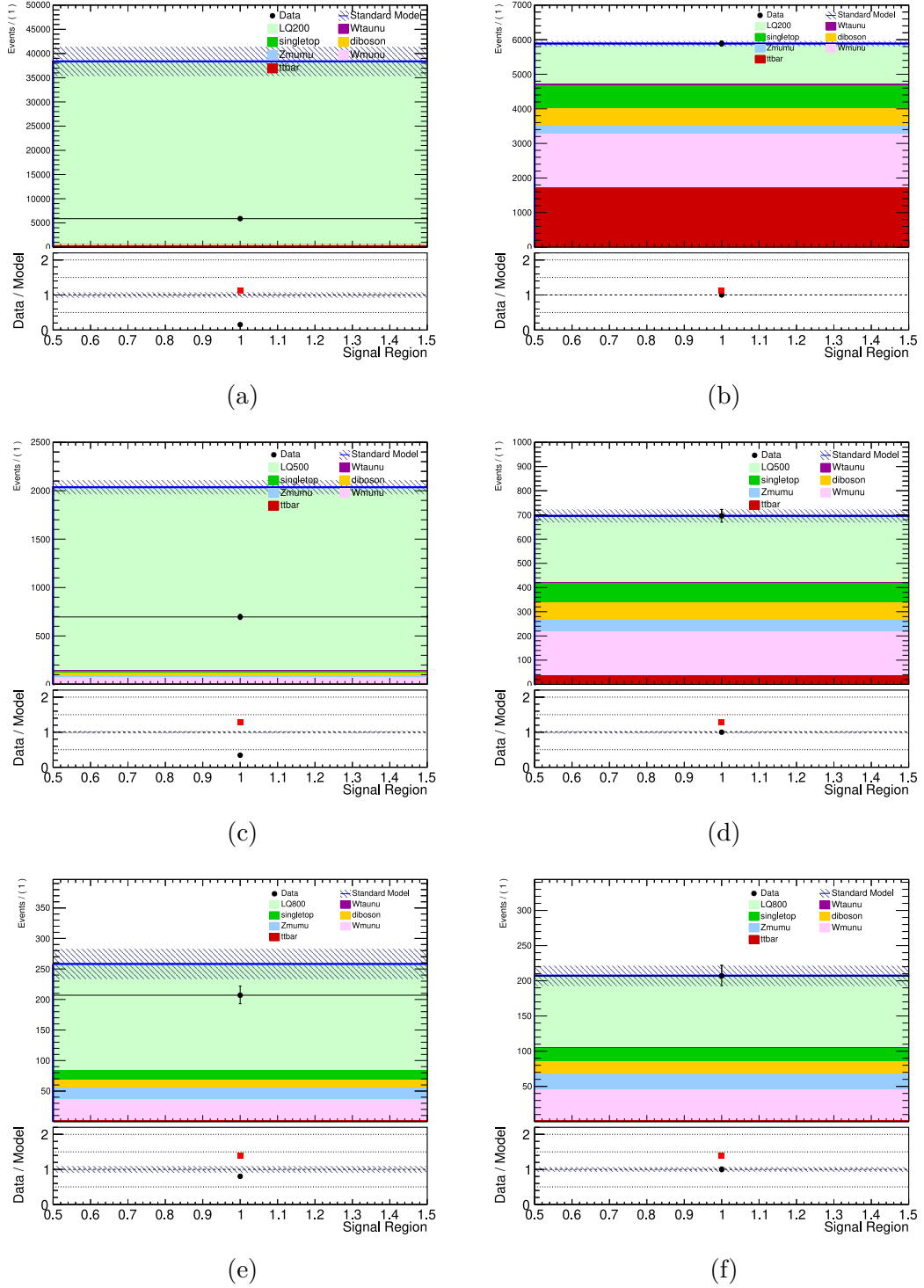
Pre určenie hornej limity s 95% CL bol vykonaný inverzný test hypotézy pre každý hmotnostný bod leptokvarkov. Inverzný test hypotézy pre LQ200, LQ500 a LQ800 sa nachádza v grafoch na obrázku 4.13. Pozorovaná (observed) CLs udáva p -hodnotu pre danú silu signálu vzhľadom k pozorovaným dátam. Očakávaná (expected) CLs sa získa tak, že za dáta sa do testovacej štatistiky dosadia Asimov data. Takto spočítaná očakávaná CLs je potom mediánom rozdelenia p -hodnoty za predpokladu, že existuje iba pozadie. 1σ a 2σ pásy neurčitosti na očakávanú hodnotu sú vypočítané z asymptotických formulí uvedených v [31].

Účinný prierez leptokvarkov z párovej produkcie σ a horná limita na tento účinný prierez s 95% CL sú ako funkcie hmotnosti leptokvarkov m_{LQ} vynesené v grafe na obrázku 4.14. V grafe sú taktiež zobrazené pásy neurčitosti pre jednu a dve štandardné odchýlky na očakávanú limitu. Pozorované limity sú v súlade s očakávanými limitami pre všetky hmotnostné body. Limita na hmotnosť leptokvarku získaná z priesečníku $\sigma(m_{LQ})$ a limity na $\sigma(m_{LQ})$ predstavuje $m_{LQ} = 780$ GeV.

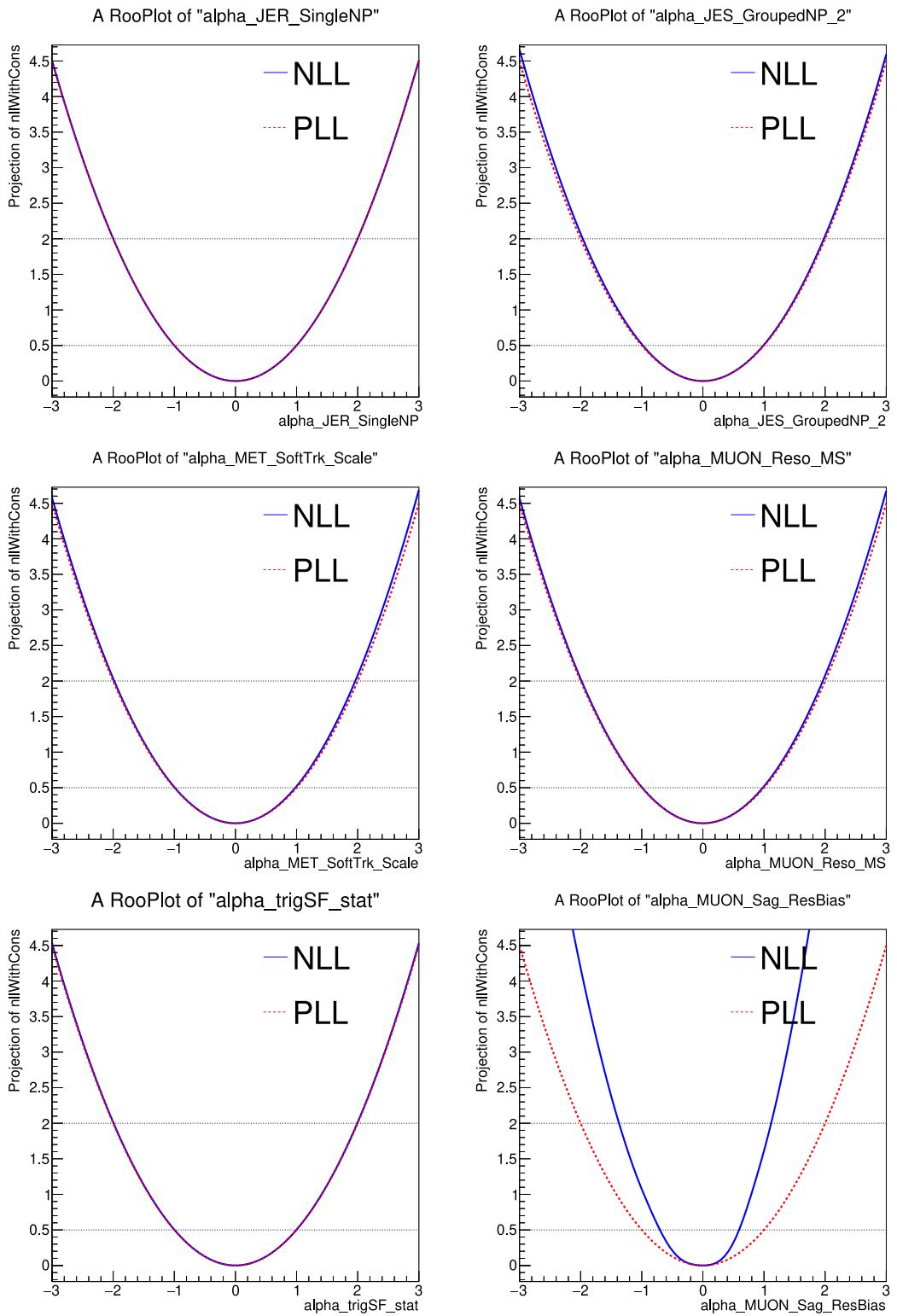
h_corr_RooExpandedFitResult_afterFit



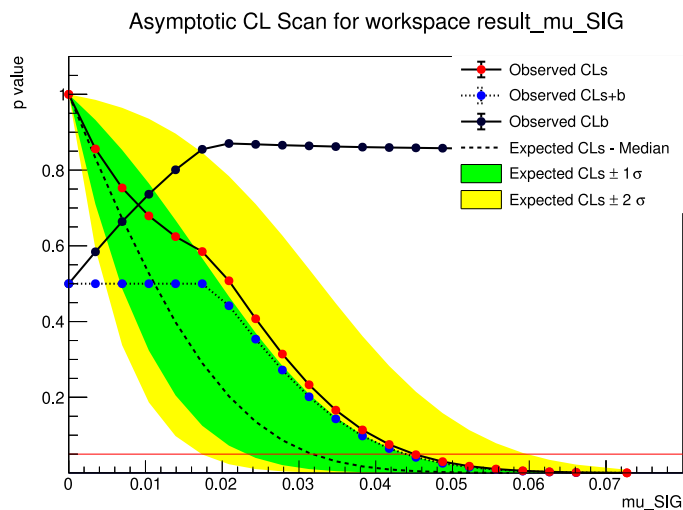
Obrázek 4.8: Korelačná matica medzi parametrami po prevedení fitu pre LQ200



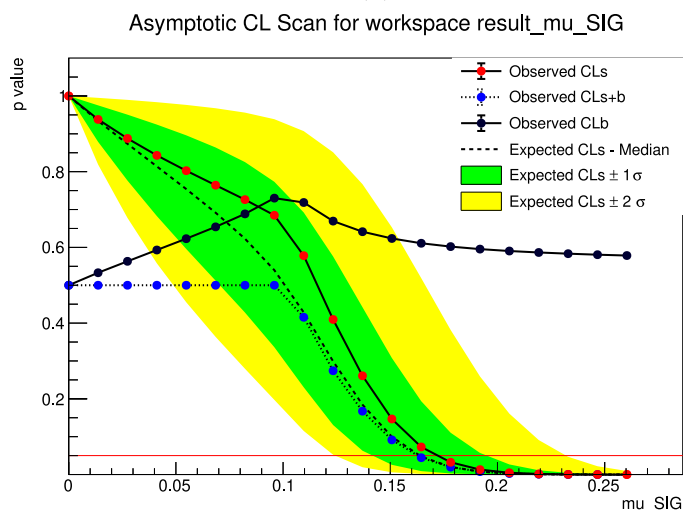
Obrázek 4.11: Signálová oblasť a) pred a b) po prevedení fitu pre hmotnostný bod LQ_{200} a rovnako c) a d) pre hmotnostný bod LQ_{500} a e), f) pre LQ_{800} . Dáta sú zobrazené spoločne s príspevkom od pozadia odpovedajúcim procesom $W(\tau\nu)$, single-top, diboson, $Z(\mu\mu)$, $W(\mu\nu)$ a $t\bar{t}$. Komponenta LQ zodpovedá signálu. Modrá čiara udáva počet udalostí SM + LQ. Šedé šrafované pásmo odpovedá celkovej neistote. V spodnom paneli je vyobrazený pomer medzi pozorovanými dátami a predpovedaným modelom (čierna bodka).



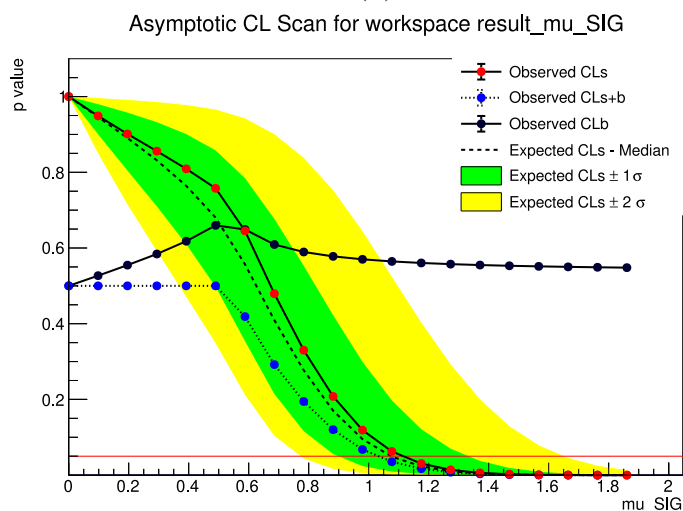
Obrázek 4.12: Likelihood funkcie (PLL) pre systematické neistoty ako rušivé parametre fitu SR pre hmotnostný bod leptokvarkov 800 GeV



(a)

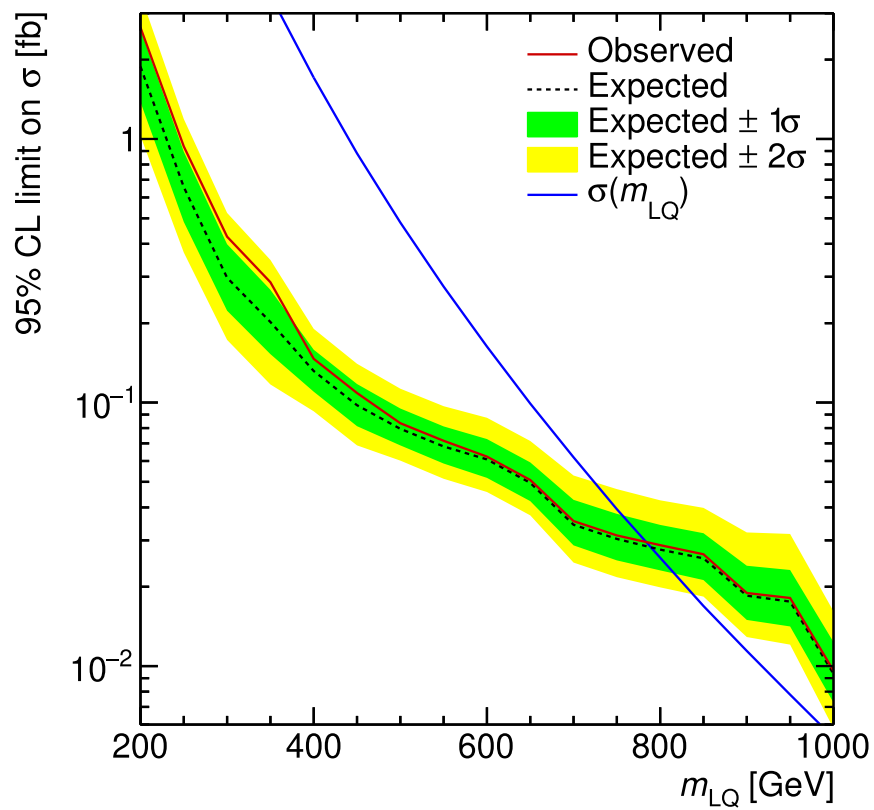


(b)



(c)

Obrázek 4.13: Inverzný test hypotézy pre a) LQ200 b) LQ500 c) LQ800. Červená čiara konštantná s p -hodnotou 0,05 značí hornú limitu s CL 95%.



Obrázek 4.14: Účinný prierez leptokvarkov z párovej produkcie a limita (pozorovaná a očakávaná) na tento účinný prierez ako funkcia hmotnosti LQ.

Závěr

Hľadanie párovej produkcie leptokvarkov v pp zrážkach s $\sqrt{s} = 13$ GeV bolo vykonané s použitím dát pochádzajúcich z detektoru ATLAS na LHC v období zberu dát Run 2 v rokoch 2015-2016. Dáta zodpovedajú luminozite o hodnote $36,1 \text{ fb}^{-1}$.

Bol skúmaný miónový kanál leptokvarkov postulovaných v minimalnom Buchmüller–Rückl–Wyler modeli s konečným stavom rozpadu $\mu\nu jj$. Analýza bola uskutočnená v programe pre štatistickú analýzu HistFitter. Vykonal sa fit predpovedaného modelu na pozorované dáta a z inverzného testu hypotéz sa určila horná limita na silu signálu pre všetky uvažované hmotnosti leptokvarkov. Na základe stanovenia limity na účinný prierez leptokvarkov sa stanovila aj limita na hmotnosť leptokvarkov a to s hmotnosťou 780 GeV.

Zoznam použitej literatúry

- [1] W. Buchmüller, R. Rückl, and D. Wyler, *Leptoquarks in lepton–quark Collisions*, Phys.Lett. B **191** (1987) 442–448. *Erratum ibid.* 448:320, 1999.
- [2] ATLAS Collaboration, *Searches for scalar leptoquarks and differential cross-section measurements in dilepton–dijet events in proton–proton collisions at a centre-of-mass energy of $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS experiment*, arXiv:1902.00377 [hep-ex].
- [3] LHC Guide, Mar, 2017. <https://cds.cern.ch/record/2255762>.
- [4] ATLAS Collaboration, *Trigger Menu in 2016*, ATL-DAQ-PUB-2017-001, Jan, 2017. <http://cds.cern.ch/record/2242069>.
- [5] Experiment ATLAS. <http://atlas.cern/discover/detector>.
- [6] ATLAS Collaboration, *Topological cell clustering in the ATLAS calorimeters and its performance in LHC Run 1*, Eur. Phys. J. **C77** (2017) 490, arXiv:1603.02934 [hep-ex].
- [7] ATLAS Collaboration, *The ATLAS Tile Calorimeter*, ATL-TILECAL-PROC-2015-002, Mar, 2015. <https://cds.cern.ch/record/2004868>.
- [8] ATLAS Collaboration, *The ATLAS Trigger Algorithms Upgrade and Performance in Run-2*, arXiv:1709.09427 [hep-ex].
- [9] ATLAS Collaboration, *Muon reconstruction performance of the ATLAS detector in proton–proton collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV*, Eur. Phys. J. **C76** (2016) no. 5, 292, arXiv:1603.05598 [hep-ex].
- [10] ATLAS Collaboration, *Muon reconstruction performance of the ATLAS detector in 2016*, ATL-PHYS-PROC-2017-246, Nov, 2017. <https://cds.cern.ch/record/2292925>.
- [11] M. Cacciari, G. P. Salam, and G. Soyez, *The anti- k_t jet clustering algorithm*, JHEP **04** (2008) 063, arXiv:0802.1189 [hep-ph].
- [12] ATLAS Collaboration, *Jet energy measurement and its systematic uncertainty in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector*, Eur. Phys. J. **C75** (2015) 17, arXiv:1406.0076 [hep-ex].
- [13] ATLAS Collaboration, *Jet energy scale measurements and their systematic uncertainties in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector*, Phys. Rev. **D96** (2017) no. 7, 072002, arXiv:1703.09665 [hep-ex].
- [14] A. Hrynevich, *ATLAS jet and missing energy reconstruction, calibration and performance in LHC Run-2*, JINST **12** (2017) no. 06, C06038.

- [15] ATLAS Collaboration, *Performance of missing transverse momentum reconstruction with the ATLAS detector using proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV*, Eur. Phys. J. **C78** (2018) no. 11, 903, [arXiv:1802.08168 \[hep-ex\]](#).
- [16] T. Mandal, S. Mitra, and S. Seth, *Pair Production of Scalar Leptoquarks at the LHC to NLO Parton Shower Accuracy*, Phys. Rev. **D93** (2016) no. 3, 035018, [arXiv:1506.07369 \[hep-ph\]](#).
- [17] F. Maltoni and T. Stelzer, *MadEvent: Automatic event generation with MadGraph*, JHEP **02** (2003) 027, [arXiv:hep-ph/0208156 \[hep-ph\]](#).
- [18] T. Sjostrand, S. Mrenna, and P. Z. Skands, *A Brief Introduction to PYTHIA 8.1*, Comput. Phys. Commun. **178** (2008) 852–867, [arXiv:0710.3820 \[hep-ph\]](#).
- [19] T. Gleisberg, S. Hoeche, F. Krauss, M. Schonherr, S. Schumann, F. Siegert, and J. Winter, *Event generation with SHERPA 1.1*, JHEP **02** (2009) 007, [arXiv:0811.4622 \[hep-ph\]](#).
- [20] P. Nason, *A New method for combining NLO QCD with shower Monte Carlo algorithms*, JHEP **11** (2004) 040, [arXiv:hep-ph/0409146 \[hep-ph\]](#).
- [21] S. Frixione, P. Nason, and C. Oleari, *Matching NLO QCD computations with Parton Shower simulations: the POWHEG method*, JHEP **11** (2007) 070, [arXiv:0709.2092 \[hep-ph\]](#).
- [22] S. Alioli, P. Nason, C. Oleari, and E. Re, *A general framework for implementing NLO calculations in shower Monte Carlo programs: the POWHEG BOX*, JHEP **06** (2010) 043, [arXiv:1002.2581 \[hep-ph\]](#).
- [23] S. Alioli, S.-O. Moch, and P. Uwer, *Hadronic top-quark pair-production with one jet and parton showering*, JHEP **01** (2012) 137, [arXiv:1110.5251 \[hep-ph\]](#).
- [24] T. Sjostrand, S. Mrenna, and P. Z. Skands, *PYTHIA 6.4 Physics and Manual*, JHEP **05** (2006) 026, [arXiv:hep-ph/0603175 \[hep-ph\]](#).
- [25] S. Agostinelli et al., *GEANT4 – a simulation toolkit*, Nucl.Instrum.Meth. A **506** (2003) 250–303.
- [26] ATLAS Collaboration, *The ATLAS Simulation Infrastructure*, Eur. Phys. J. **C70** (2010) 823–874, [arXiv:1005.4568 \[physics.ins-det\]](#).
- [27] ATLAS Collaboration, *The simulation principle and performance of the ATLAS fast calorimeter simulation FastCaloSim*, ATL-PHYS-PUB-2010-013, 2010. <https://cds.cern.ch/record/1300517>.
- [28] G. Cowan, *Statistical Data Analysis*. Oxford science publications. Clarendon Press, 1998. <https://books.google.cz/books?id=ff8ZyW0n1JAC>.

- [29] K. Cranmer, *Practical Statistics for the LHC*, in *Proceedings, 2011 European School of High-Energy Physics (ESHEP 2011): Cheile Gradistei, Romania, September 7-20, 2011*, pp. 267–308. 2015. arXiv:1503.07622 [physics.data-an]. [,247(2015)].
- [30] G. Cowan, *Statistics for Searches at the LHC*, in *Proceedings, 69th Scottish Universities Summer School in Physics : LHC Phenomenology (SUSSP69): St.Andrews, Scotland, August 19-September 1, 2012*, pp. 321–355. 2013. arXiv:1307.2487 [hep-ex].
- [31] G. Cowan, K. Cranmer, E. Gross, and O. Vitells, *Asymptotic formulae for likelihood-based tests of new physics*, Eur. Phys. J. **C71** (2011) 1554, arXiv:1007.1727 [physics.data-an]. [Erratum: Eur. Phys. J.C73,2501(2013)].
- [32] M. Baak, G. J. Besjes, D. Côte, A. Koutsman, J. Lorenz, and D. Short, *HistFitter software framework for statistical data analysis*, Eur. Phys. J. **C75** (2015) 153, arXiv:1410.1280 [hep-ex].
- [33] ROOT Collaboration, *HistFactory: A tool for creating statistical models for use with RooFit and RooStats*, Tech. Rep. CERN-OPEN-2012-016, New York U., New York, Jan, 2012. <https://cds.cern.ch/record/1456844>.
- [34] L. Moneta, K. Belasco, K. Cranmer, S. Kreiss, A. Lazzaro, D. Piparo, G. Schott, W. Verkerke, and M. Wolf, *The RooStats Project*, <http://arxiv.org/abs/1009.1003v2>.
- [35] W. Verkerke and D. P. Kirkby, *The RooFit toolkit for data modeling*, eConf **C0303241** (2003) MOLT007, arXiv:physics/0306116 [physics]. [,186(2003)].
- [36] R. Brun and F. Rademakers, *ROOT: An object oriented data analysis framework*, Nucl. Instrum. Meth. **A389** (1997) 81–86.
- [37] T. Petrů. Závěrečná zpráva - Splnění cílu SFG, Oct, 2018. http://ipnp.cz/wp-content/uploads/2019/05/SFG_2018_Petru_zaverecna_zprava.pdf.

Zoznam obrázkov

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Detektor ATLAS [5] | 4 |
| 1.2 | Rez systémom kalorimetrov detektoru ATLAS [6] | 5 |
| 3.1 | Funkcia hustoty pravdepodobnosti $f(x H_0)$ a $f(x H_1)$ za predpokladu H_0 a H_1 a ilustrácia kritickej oblasti (prebraté z [30] a upravené) | 11 |
| 4.1 | Prehľad postupnosti spracovania v HistFitteri [32] | 15 |
| 4.2 | Konfigurácia fitu v HistFitteri [32] | 17 |
| 4.3 | Variácie systematík nahor/nadol/nominal pre všetky systematiky v SR vo vzorkách a) LQ b) $t\bar{t}$ c) $W \rightarrow \mu\nu$ pre hmotnostný bod LQ800 a v kontrolných oblastiach d) ttbarCR vzorka $t\bar{t}$ a e) WCR vzorka $W \rightarrow \mu\nu$ | 20 |
| 4.4 | Hodnoty parametrov získané CRs fitom. Parametre μ odpovedajú normalizačným faktorom pre hlavné procesy pozadia, parameter γ udáva celkovú štatistickú chybu na odhadoch pozadia z limitovanej MC štatistiky a parametre α patria systematickým neistotám z tabuľky 4.2 | 21 |
| 4.5 | Kontrolná oblasť ttbarCR a) pred a b) po prevedení fitu a kontrolná oblasť WCR c) pred a d) po prevedení fitu. Dáta sú zobrazené spoločne s príspevkom od pozadia odpovedajúcim procesom $W(\tau\nu)$, single-top, diboson, $Z(\mu\mu)$, $W(\mu\nu)$ a $t\bar{t}$. Modrá čiara udáva počet udalostí SM. Šedé šrafované pásmo odpovedá celkovej neistote. V spodnom paneli je vyobrazený pomer medzi pozorovanými dátami a predpovedaným modelom (čierna bodka). | 22 |
| 4.6 | Korelačná matica medzi parametrami po prevedení fitu v CR . . . | 23 |
| 4.7 | Hodnoty parametrov získané fitom SR pre hmotnostné body a) LQ200 b) LQ500 c) LQ800. Parameter μ_SIG odpovedá sile signálu a predstavuje POI daného fitu. Parameter γ udáva celkovú štatistickú chybu na odhadoch pozadia a signálu z limitovanej MC štatistiky a parametre α patria systematickým neistotám z tabuľky 4.2 | 25 |
| 4.8 | Korelačná matica medzi parametrami po prevedení fitu pre LQ200 | 26 |
| 4.9 | Korelačná matica medzi parametrami po prevedení fitu pre LQ500 | 27 |
| 4.10 | Korelačná matica medzi parametrami po prevedení fitu pre LQ800 | 28 |
| 4.11 | Signálová oblasť a) pred a b) po prevedení fitu pre hmotnostný bod LQ200 a rovnako c) a d) pre hmotnostný bod LQ500 a e), f) pre LQ800. Dáta sú zobrazené spoločne s príspevkom od pozadia odpovedajúcim procesom $W(\tau\nu)$, single-top, diboson, $Z(\mu\mu)$, $W(\mu\nu)$ a $t\bar{t}$. Komponenta LQ zodpovedá signálu. Modrá čiara udáva počet udalostí SM + LQ. Šedé šrafované pásmo odpovedá celkovej neistote. V spodnom paneli je vyobrazený pomer medzi pozorovanými dátami a predpovedaným modelom (čierna bodka). | 29 |
| 4.12 | Likelihood funkcie (PLL) pre systematické neistoty ako rušivé parametre fitu SR pre hmotnostný bod leptokvarkov 800 GeV | 30 |

| | | |
|------|---|----|
| 4.13 | Inverzný test hypotézy pre a) LQ200 b) LQ500 c) LQ800. Červená čiara konštantná s p -hodnotou 0,05 značí hornú limitu s CL 95%. | 31 |
| 4.14 | Účinný prierez leptokvarkov z párovej produkcie a limita (pozorovaná a očakávaná) na tento účinný prierez ako funkcia hmotnosti LQ. | 32 |