

Predmet: Izvještaj Komisije za ocjenu magistarskog rada Itane Bujanje

Vijeće Prirodno-matematičkog fakulteta, na sjednici održanoj 28. 05. 2019. godine, donijelo je Odluku o imenovanju komisije za ocjenu magistarskog rada pod nazivom „**Analiza dileptonskih parova iz raspada Z bozona nastalih u proton-proton interakcijama na energiji od 5 TeV na CMS eksperimentu**“, specijaliste fizike Itane Bujanje.

Kao članovi imenovane komisija (prof. dr Nataša Raičević – mentor, prof. dr Ivana Pićurić i prof. dr Slobodan Backović), nakon pregleda magistarskog rada, u skladu sa članom 29 stav 1 Pravila studiranja na postdiplomskim studijama Univerziteta Crne Gore, Vijeću Prirodno-matematičkog fakulteta podnosimo

IZVJEŠTAJ

Tekst rada dostavljenog za ocjenu čini *Uvod* (6 stranica), četiri poglavlja – *Eksperimentalna postavka* (15 stranica), *Teorijski okvir* (13 stranica), *Rezultati* (30 stranica) i *Zaključak* (4 stranice) i *Literatura* (4 stranice) uz dodatne stranice koje sadrže *Sažetak*, *Abstract*, *Sadržaj*, *Popis slika* i *Popis tabela*. Rad sadrži 43 slike i dvije tabele. Struktura rada ispunjava sve zahtjeve propisane članom 27 Pravila studiranja na postdiplomskim studijama.

Postavljeni cilj

Produkcija dileptonskih parova kroz anihilaciju kvarka i antikvarka iz protona u virtualni foton ili Z bozon, iz kojih zatim nastaju leptoni iste generacije suprotnog naelektrisanja je jedan od procesa koji ostavlja vrlo jasan signal u detektorskim komponentama. Veliki presjek za produkciju dileptonskih parova i jasan signal koji nastaje njihovom kreacijom omogućavaju detaljno proučavanje kinematičkih raspodjela koje predstavljaju pouzdani test teorije jake interakcije sa visokom preciznošću.

Fokus rada je na analizi dielektronskih, e^+e^- , parova koji nastaju pri inkluzivnoj produkciji Z bozona u proton-proton interakcijama na energiji od 5 TeV. Prvi put će se analizirati raspodjele dielektronskih parova dobijenih iz podataka sa eksperimenta CMS (engl. Central Muon Solenoid) nastalih sudarom protona ubrzanih u akceleratoru LHC (Large Hadron Collider) u laboratoriji CERN u Ženevi u novembru 2017. Eksperimentalne raspodjele e^+e^- parova, kao i raspodjele ranije analiziranih dimionskih parova prvi put će biti upoređene sa punom simulacijom pp interakcija u CMS eksperimentu.

Mehanizam same interakcije takođe utiče na raspodjelu džetova koji predstavljaju mlazove hadrona, koji nastaju od rasijanog (anti)kvarka, i emituju se u uskom konusu čija se osa poklapa sa pravcem rasijanog (anti)kvarka. Jedan dio rada posvećen je analizi raspodjela

džetova koji se emituju sa Z bozonom u proton-proton interakcijama na energiji od 5 TeV.

Primijenjene metode

Eksperimentalni podaci iz kojih se rekonstruišu fizičke veličine koje opisuju kretanje elektrona, pozitrona i miona dobijaju se njihovim skretanjem u magnetnom polju od 3.4 T koje obezbjeđuje superprovodni solenoid unutrašnjeg poluprečnika 6 m. Trajektorije čestica rekonstruišu se u silicijumskim piksel i trakastim detektorima koji se nalaze unutar solenoida. Energija elektrona i pozitrona se mjeri u elektromagnetnom kalorimetru od olovo volframata i hadronskom kalorimetru od mesinga i scintilatora. Mioni se detektuju u gasnim jonizacionim komorama koje su smještene na obodu CMS detektora zasnovane na tri vrste tehnologija: drift cijevi, katodne trakaste komore i komore sa otpornim pločama.

Monte Carlo simulacija pp interakcija neophodna za procjenu efikasnosti signala i fonskih procesa dobijena je generisanjem signala od dileptonskih parova korišćenjem MadGraph (v1.3.30) generatora događaja. Partonski "tuševi" i efekti hadronizacije su implementirani korišćenjem generatora PYTHIA6 sa tzv. kt-MLM šemom. Za generisanje fona biće korišćeni dodatni generatori. Prolazak čestice kroz materiju i odzivi detektora simulirani su korišćenjem paketa GEANT4. Eksperimentalne i Monte Carlo generisane raspodjele analiziraju se i upoređuju korišćenjem softverskog paketa root. Softver za obradu eksperimentalnih i simuliranih podataka, crtanje grafika i raspodjela čestica i dileptonskih parova napisan je u programskom jeziku C++

Dobijeni rezultati

Eksperimentalni rezultati dobijeni u ovom radu prodijeljeni su u tri dijela.

1. Analiza pp interakcija sa inkluzivnom produkcijom Z bozona koji se raspada na e^+e^- par.
2. Analiza pp interakcija sa inkluzivnom produkcijom Z bozona koji se raspada na $\mu^+\mu^-$ par.
3. Analiza pp interakcija sa inkluzivnom produkcijom Z bozona i džetova.

U prvom dijelu rad po prvi put su dobijene raspodjele elektrona, pozitrona i elektronskih parova rekonstruisanih iz ovih podataka. Luminoznost analiziranih eksperimentalnih podataka iznosi 242 pb^{-1} . Raspodjela po transversalnom impulsu elektrona dobijena iz eksperimentalnih podataka dobro je opisana simulacijom. U njoj se jasno uočava Jakobijev pik. Raspodjele po pseudorapiditetu elektrona dobijene iz eksperimentalnih podataka korektno su reprodukovane simulacijom osim u oblasti velikih vdijednosti pseudorapiditeta prvog elektrona na kojem se najčešće zasniva signal triger. Razlog ovog neslaganja je poznat u kolaboraciji i potiče od neefikasnosti trigger elementa koji je dio signala za realizaciju triger za elektron i odnosi se na samu unutrašnjost elektromagnetnog kalorimetra. U ovom radu ove korekcije još uvijek nijesu implementirane. U raspodjeli po invarijantnoj masi e^+e^- para uočava se jasan pik u položaju mase Z bozona koji po širini odgovara raspodjeli dobijenoj simulacijom. Fino podešavanje impulsne skale je u toku. Raspodjela po rapiditetu e^+e^- para tj. Z bozona slaže se po obliku sa simuliranom raspodjelom osim u oblasti velikog rapiditeta, a uzrok je gore pomenuta neefikasnost trigger elementa. U raspodjelama po tranzverznom impulsu Z bozona simulacija sadrži veći broj

događaja sa malim vrijednostima ($\leq 6 \text{ GeV}/c$) dok se u eksperimentalnim podacima nalazi veći broj događaja sa većim transverzalnim impulsom. Pošto je Φ^* varijabla proporcionalna transverzalnom impulsu Z bozona, raspodjela po ovoj varijabli ima isti trend kao raspodjela po transverzalnom impulsu. Odstupanja Φ^* i P_T eksperimentalnih raspodjela od simulacije korelisano je sa raspodjelom po razlici azimutalnih uglova leptona iz para.

U drugom dijelu rada po prvi put se upoređuju ranije dobijene raspodjele miona i mionskih parova sa postojećom punom simulacijom. Luminoznost analiziranih eksperimentalnih podataka iznosi 296 pb^{-1} . Sve raspodjele i poređenja dobijena za elektrone i elektronske parove dobijena su i za mione i mionske parove. U eksperimentalnim raspodjelama po pseudorapiditetu miona i rapiditetu mionskih parova ne uočava se deficit pri velikim vrijednostima ovih varijabla. Sve ostale eksperimentalne raspodjele miona i mionskih parova kvalitativno i kvantitativno su u potpunosti konzistentne sa raspodjelama elektrona i elektronskih parova.

Na osnovu dobijenih raspodjela elektronskih i mionskih parova moguće je procijenjeniti efikasni presjek za inkluzivnu produkciju Z bozona koji se raspada na dileptonski par u analiziranoj kinematičkoj oblasti. Korekcije za razliku efikasnosti između simulacije i eksperimentalnih podataka na osnovu kojih se računa presjek dobijene su od grupa koje rade na izačunavanju ovih korekcija i za sada su za podatke iz 2017. godine dostupne samo korekcije za interakcije na energiji od 13 TeV i sa nominalnim preklapanjem događaja. S obzirom na to da efikasnost trigera korišćenih u ovom radu još uvijek nije dostupna, korekcije vezane za trigere nijesu uključene. Iz tih razloga na ovom nivou analize, nije moguće jasno procijeniti sistematsku grešku mjerenja presjeka u kojoj dominira greška mjerenja efikasnosti odnosno korekcionih faktora. Dominantna greška mjerenja je greška sa kojom se mjeri luminoznost. Dobijene vrijednosti presjeka za mionski odnosno elektronski kanal su u odličnoj saglasnosti i sa vrijednošću dobijenom Monte Carlo simulacijom slažu se u okviru 2% . Eksperimentalne vrijednosti mogu se povećati za još nekoliko procenata zbog neefikasnosti trigera. Kvantitativna razlika između mjernja presjeka mionskim i elektronskim kanalom može biti maksimalno $4\text{--}5 \%$ nakon primjene korekcija za neefikasnost pomenutog trigger elementa.

S obzirom na to da korekcije za (ne)efikasnost rekonstrukcije leptona odnosno leptonskih parova nisu dobijene iz analiziranog seta podataka i da korekcije za efikasnost korišćenih trigera još uvijek nisu dostupne pa zbog toga nije moguće dati preciznu procjenu sistematske greške, treba razmisliti o tome da se vrijednosti za efikasni presjek ne navode eksplicitno (kao što je to urađeno u radnoj verziji ovog rada) već prije njihov odnos sa akcentom na konzistentnost tih vrijednosti.

U trećem dijelu rada dobijene su raspodjele po broju džetova pri inkluzivnoj i ekskluzivnoj produkciji Z bozona i određenog broja džetova i raspodjele po kinematičkim karakteristikama džetova i Z bozona. Sve raspodjele su analizirane za oba kanala raspada Z bozona. Analizirani su događaji u kojima osim dileptonskog para nastaje džet koji ima transverzalni impuls vrijednosti veće od $30 \text{ GeV}/c$ i apsolutnu vrijednost pseudorapiditeta manju od 2.4 . Iz raspodjela po multiplicitetu džetova vidi se da u simulaciji postoji više događaja sa produkcijom Z bozona i jednog i dva džeta nego u podacima za oko 15% dok događaja sa većim brojem džetova imamo više u eksperimentalnim podacima. Detaljno su analizirane raspodjele sa inkluzivnom produkcijom jednog džeta i Z bozona. Pokazuje se da postavljanjem pomenutog ograničenja na transverzalni impuls džeta, više događaja se redukuje u eksperimentalnim podacima tj. broj džetova manje energije je veći je u podacima. Razlog za ovu razliku bi mogao biti manji intenzitet nastanka partonskih tuševa u postojećoj

simulaciji nego u podacima. Pokazuje se da se u simulaciji u oblasti velike vrijednosti pseudorapiditeta emituje značajno više džetova nego u eksperimentalnim podacima i da je vrijednost balansa transverzalnog impulsa pomjerena u podacima u odnosu na simulaciju tj. za male vrijednosti ove veličine imamo više događaja u simulaciji nego u podacima. Što se raspodjele po transverzalnom impulse Z bozona tiče primjećuje se da je broj Z bozona sa manjim transverzalnim impulsom značajno veći u simulaciji nego u eksperimentalnim podacima. Eksperimentalna raspodjela po rapiditetu Z bozona po obliku ne odstupa od simulacije. Sličan trend prate i raspodjele po pseudorapiditetu i transverzalnom impulsu drugog džeta u događajima sa inkluzivnom produkcijom Z bozona i dva džeta.

Zaključci o realizovanim istraživanjima

Nakon pregleda magistarskog rada kandidata Itane Bujanje, analize njegovog teksta i ostvarenih rezultata, smatramo da je rad napisan jasno, da je cilj rada realizovan i da rad ispunjava sve uslove istraživačkog rada predviđene Pravilima studiranja na postdiplomskim studijama.

Članovi komisije imali su nekoliko sugestija koje je kandidatkinja prihvatila i implementirala.

Zaključni stav i prijedlog

Na osnovu prethodno napisanog, pozitivno ocjenjujemo magistarski rad „Analiza dileptonskih parova iz raspada Z bozona nastalih u proton-proton interakcijama na energiji od 5 TeV na CMS eksperimentu“ autora, specijaliste fizike, Itane Bujanje.

Predlažemo Vijeću Prirodno-matematičkog fakulteta da rad prihvati i imenuje komisiju za njegovu javnu usmenu odbranu.

U Podgorici, 26.08.2019.

KOMISIJA

W. Raičević
dr Nataša Raičević, redovni profesor-mentor

St. Backović
dr Slobodan Backović, akademik – član

Ivana Picurić
dr Ivana Picurić, redovni profesor - član