

Predmet: Izvještaj Komisije za ocjenu magistarskog rada Jelene Mijušković

Vijeće Prirodno-matematičkog fakulteta, na sjednici održanoj 10. 07. 2018. godine, donijelo je Odluku o imenovanju komisije za ocjenu magistarskog rada pod nazivom „**Emisija $\mu^+\mu^-$ parova u pp interakcijama na energiji od 5 TeV na CMS eksperimentu**“, specijaliste fizike **Jelene Mijušković**.

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* (2 stranice), četiri poglavlja – *Eksperimentalna postavka* (17 stranica), *Teorijski okvir* (9 stranica), *Eksperimentalni rezultati* (30 stranica) i *Zaključak* (3 stranice) i *Literatura* (3 stranice) uz dodatne stranice koje sadrže *Sažetak*, *Abstract*, *Sadržaj* i *Popis slika*. Rad sadrži 45 slika. Struktura rada ispunjava sve zahtjeve propisane članom 27 Pravila studiranja na postdiplomskim studijama.

Postavljeni cilj

U ovom radu analizirani su dimionski ($\mu^+\mu^-$) Drell-Yan (DY) parovi koji su nastali iz interakcije tj. sudara protona (*pp*) koji su ubrzani na LHC akceleratoru (skr. engl. *Large Hadron Collider*) u CERNu do energija od 5 TeV u sistemu centra masa. Analizirani su sudari koji su se dešavali tokom desetodnevnog perioda u novembru 2017. godine u tačkama koje su okružene detektorskom aparaturom CMS eksperimenta (skr. engl. *Compact Muon Solenoid*). Analiza eksperimentalnih podataka podijeljena je u tri dijela.

Dobijene su eksperimentalne raspodjele dimionskih parova u širokom interval invarijantnih masa kako bi se ocijenio potencijal podataka dobijenih iz ovih interakcija – naročito u oblasti najnižih invarijantnih masa i niskih vrijednosti transverznog impulsa para, koji su od izuzetnog značaja za razumijevanje interakcija sastavnih dijelova protona i njihovih raspodjela. Analizirane su i raspodjele kombinatornih fonskih parova ($\mu^-\mu^-$ i $\mu^+\mu^+$) kojima se procjenjuje doprinos fona koji potiče od miona iz džetova koji kombinovanjem daju parove koji predstavljaju dominantni doprinos fonu u oblasti niskih i srednjih masa DY parova.

U masenoj oblasti Z bozona, eksperimentalne raspodjele upoređene su sa Monte Carlo simulacijom koja uključuje korišćenje MadGraph generatora događaja i parametrizaciju efekata koji nastaju prolaskom miona kroz eksperimentalnu aparaturu CMSa. Parametrizacija

je dobijena iz Delphes paketa za brzu simulaciju detektora. Izmjeren je totalni efikasni presjek za process $pp \rightarrow Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$.

Manji dio rada posvećen je automatizaciji brze provjere kvaliteta podataka dobijenih u detektorskim komponentama CMS eksperimenta.

Primijenjene metode

CMS je eksperiment koji se sastoji od velikog broja detektora pri čemu svaki ima svoju funkciju. Centralni dio CMS-a čini superprovodljivi solenoid dužine 12.5 m i prečnika 6 m. Nominalna vrijednost magnetnog polja koje proizvodi ovaj solenoid je 4 T što je neophodna za ostvarivanje što veće zakrivljenosti trajektorija naelektrisanih čestica, a time i za bolju identifikaciju čestica visokih energija. Glavne komponente koje se koriste za detekciju i identifikaciju miona tj. njihovih trajektorija su mionske komore koje prekrivaju oblast pseudorapiditeta do vrijednosti 2.4. Ovaj sistem se sastoji iz tri različita tipa gasnih detektora: drift cijevi, katodne trakaste komore (eng. Cathode Strip Chambers - CSCs) i komore sa tzv. otpornim pločama (eng. Resistive Plate Chambers - RPCs). Ove komore se nalaze na periferiji CMS detektora na najvećim rastojanjima od tačke interakcije tj. verteksa jer su mioni čestice koje uglavnom kroz detektorsku sredinu prolaze bez interakcije i kao takve (za razliku od ostalih naelektrisanih čestica) stižu do velikih udaljenosti od mjesta svog nastanka. Trajektorija naelektrisane čestice se rekonstruiše u tzv. unutrašnjem sistemu za detekciju tragova. On se sastoji iz silicijumskih senzora koji su konstruisani tako da omogućavaju precizna i efikasna mjerenja trajektorija naelektrisanih čestica transveralnog impulsa $p_T > 1$ GeV, kao i precizne rekonstrukcije sekundarnih verteksa koji se pojavljuju kao rezultat raspada masivnijih čestica. Sastoji se iz dva dijela, unutrašnjeg silicijumskog piksel detektora i spoljašnjeg silicijumskog detektora sa trakastim elektrodama.

Monte Carlo simulacija pp interakcija dobijena je MadGraph generatorom događaja, a odziv detektora simuliran je parametrizacijama iz Delphes paketa koje se odnose na efikasnost detekcije miona i impulsnu rezoluciju miona.

Rezultati predstavljeni u ovom radu dobijeni su korišćenjem programskog jezika C++ u okviru CMS softverskog okruženja.

Grafici analiziranih raspodjela dobijeni su korišćenjem softverskog paketa ROOT koji je opšte korišćeni softver u analizama u fizici čestica.

Dobijeni rezultati

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

1. Analiza raspodjela dimionskih parova dobijenih iz eksperimentalnih podataka korišćenjem triggera sa ograničenjem na transveralni impuls miona.
2. Analiza raspodjela dimionskih parova sa invarijantnom masom masom u okolini Z bozona i upoređivanje sa Monte Carlo simulacijom.
3. Automatizacija rutina za brzo dobijanje informacija o pojedinim djelovima CMS detektora i njihovom funkcionisanju.

U prvom dijelu dobijene su raspodjele po invarijantnoj masi, rapiditetu i transveralnom impulsu dimionskih parova kao i raspodjele po transveralnom impulsu i pseudorapiditetu miona. Navedene raspodjele su dobijene i za mionske parove istog znaka naelektrisanja. U

raspodjeli po invarijantnoj masi para sa različitim znakom naelektrisanja miona uočavaju se svi očekivani rezonantni maksimumi koji nastaju kao rezultat raspada kvarkonijumskih stanja na dimionski par. U raspodjeli po transverzalnom impulsu parova uočava se pik u okolini oko 5 GeV/c koji je posljedica izračavanja partona u početnom stanju. U raspodjeli po transverzalnom impulsu miona uočava se Jakobijev pik koji je posljedica raspada Z bozona. Nijedno od navedenih obilježja se ne uočava u raspodjelama mionskih parova sa mionima istog znaka naelektrisanja. Kombinatorni fon daje najveći doprinos u oblasti nižih i srednjih vrijednosti invarijantnih masa gdje dostiže i do 50% dok je u oblasti ekstremno niskih masa (manjih od 4 GeV/c²) ovaj fon zanemarljiv. Utvrđeno je da parovi ekstremno niskih masa nastaju samo ukoliko mioni koji ih čine zaklapaju mali prostorni ugao. Takođe najveći doprinos kombinatornog fona je za niže vrijednosti transverzalnog impulsa para i za male apsolutne vrijednosti rapiditeta. Razdvajanjem parova po invarijantnoj masi u četiri intervala, razmatrane su raspodjele po transverzalnom impulsu i rapiditetu parova kao i raspodjele po pseudorapiditetu miona iz tih parova. Utvrđeno je da je raspodjela po transverzalnom impulsu parova sa ekstremno niskom invarijantnom masom ograničena i počinje od vrijednosti koju diktira korišćeni trigger. Mionski parovi nižih invarijantnih masa i mioni koji iz njih potiču imaju velike apsolutne vrijednosti rapiditeta odnosno pseudorapiditeta dok se sa porastom invarijantne mase ove vrijednosti smanjuju.

U drugom dijelu dimionski parovi sa invarijantnom masom u okolini Z bozona (između 60 i 110 GeV/c²), koje obrazuju mioni sa transverzalnim impulsom većim od 20 GeV/c i apsolutnom vrijednošću pseudorapiditeta manjom od 2.4, analizirani su i upoređeni sa Monte Carlo simulacijom koja se sastoji od generatora pp interakcija sa vodećim redom (MadGraph) i parametrizacije odziva detektora korišćenjem modula iz Delphes paketa koji se odnose na prolazak miona. Primjenom parametrizacije ograničene impulsne rezolucije, Monte Carlo simulacija odlično reprodukuje eksperimentalne rezultate što je testirano kroz upoređivanje raspodjela po invarijantnoj masi para iz eksperimentalnih podataka i Monte Carla koje se poklapaju i po položaju i po širini pika koji se odnosi na raspad Z bozona. Raspodjele po ostalim kinematičkim varijablama pokazuju takođe solidno slaganje između eksperimentalnih raspodjela i Monte Carla sem za slučaj raspodjela po transverzalnom impulsu para gdje se vidi da je doprinos parova sa nižim vrijednostima transverzalnog impulsa manji u podacima nego u Monte Carlo simulaciji.

Procjenom efikasnosti rekonstrukcije, identifikacije i izolacije miona, kao i efikasnosti kinematičkih ograničenja na mione iz Monte Carlo simulacije, procijenjen je totalni inkluzivni efikasni presjek za process $pp \rightarrow Z \rightarrow \mu^+\mu^-$ i greške njegovog mjerenja koje potiču od ograničene tačnosti mjerenja eksperimentalnih efekata (u prvom redu efikasnosti miona), teorije (kojom dominira izbor funkcija raspodjele partona) i luminoznosti. Dobijeni rezultat iznosi 598.8 ± 11.8 (eksp.) ± 13.17 (teorija) ± 14.7 (luminoznost).

U trećem dijelu je ukazano na značaj alatki za brzu provjeru podataka dobijenih u CMS detektoru. Da bi se što jednostavnije i brže uočili eventualni problem u funkcionisanju detektora, rađeno je na pojednostavljenju dobijanja raspodjela po veličinama koje bi mogle ukazati na potencijalne problem u radu detektora. Procedure za dobijanje ovih veličina su automatizovane i ubrzo će biti dostupne za jednostavno korišćenje članovima CMS kolaboracije.

Zaključci o realizovanim istraživanjima

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

Članovi komisije imali su par sugestija koje je kandidatkinja prihvatila. U odnosu na radnu verziju rada koju Komisija ocjenjuje, u konačnoj verziji biće još dvije ili tri slike u dijelu koji se odnose na automatizaciju brze provjere kvaliteta podataka. Takođe, uvršćena je dodatna diskusija o greškama mjerenja efikasnog presjeka koja se odnosi na neodređenost teorijskih modela prije svega funkcija raspodjele partona u protonu.

Zaključni stav i prijedlog

Na osnovu prethodno napisanog, pozitivno ocjenjujemo magistarski rad „Emisija $\mu^+\mu^-$ parova u pp interakcijama na energiji od 5 TeV na CMS eksperimentu“ autora, specijaliste fizike, Jelene Mijušković.

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

U Podgorici, 21.09.2018.

KOMISIJA

N. Raičević

dr Nataša Raičević, redovni profesor-mentor

St. Backović

dr Slobodan Backović, akademik – član

Ivana Pićurić

dr Ivana Pićurić, redovni profesor - član