

OCJENA DOKTORSKE DISERTACIJE

OPŠTI PODACI O DOKTORANDU		
Titula, ime i prezime	Mr Jelena Mijušković	
Fakultet	Prirodno-matematički fakultet, UCG	
Studijski program	Fizika	
Broj indeksa	1/2018	
MENTOR/MENTORI		
Prvi mentor	Dr Nataša Raičević, Redovni profesor	Univerzitet Crne Gore
Drugi mentor	Dr Federico Ferri Istraživač sa habilitacijom (habilitation à diriger des recherches)	Institut CEA- IRFU, Saclay, Pariz, Francuska
KOMISIJA ZA OCJENU DOKTORSKE DISERTACIJE		
Dr Marco Delmastro, Istraživač sa habilitacijom (habilitation à diriger des recherches) - direktor za istraživanje, Eksterni evaluator za Univerzitet Paris-Saclay	LAPP, Univerzitet Savoie Mont Blanc, CNRS/IN2P3, Annecy, Francuska	
Dr Ulla Blumenschein, senior istraživač Eksterni evaluator za Univerzitet Paris-Saclay	School of Physics and Astronomy, Queen Mary University of London, Engleska	
Dr Philippe Gras, istraživač sa stalnom pozicijom	CEA-IRFU, Saclay, Pariz, Francuska	
Dr Federico Ferri, istraživač sa habilitacijom (habilitation à diriger des recherches)	CEA-IRFU, Saclay, Pariz, Francuska	
Dr Nataša Raičević, redovni profesor	Univerzitet Crne Gore, Crna Gora	
Datum značajni za ocjenu doktorske disertacije		
Doktorska disertacija i Izvještaj Komisije dostavljen Biblioteci UCG	29.03.2022.	
Javnost informisana (dnevne novine) da su Doktorska disertacija i Izvještaj Komisije dati na uvid	30.03.2022.	
Sjednica Senata na kojoj je izvršeno imenovanje Komisije za ocjenu doktorske disertacije	9.03.2022.	
Uvid javnosti		
U predviđenom roku za uvid javnosti bilo je primjedbi?		
OCJENA DOKTORSKE DISERTACIJE		
1. Pregled disertacije (bibliografski podaci o disertaciji i sažetak disertacije)		
Naučna oblast disertacije je Fizika elementarnih čestica koja se naziva i Fizika visokih energija. U radu su prikazana mjerenja diferencijalnog efikasnog presjeka za produkciju Z bozona i djetova koji nastaju u proton-proton sudarima pri energiji u sistemu centra mase od 13 TeV. Analizirani podaci dobijeni su sa CMS (Central Muon Solenoid) eksperimenta na akceleratoru LHC (Large Hadron Collider) u CERN-u tokom 2018. godine i odgovaraju integriranoj luminoznosti od 59		

fb^{-1} . Fokus rada je mjerenje varijabli N-džetnosti, τ_N :

$$\tau_N = \sum_k \min \{q_a \cdot p_k, q_b \cdot p_k, q_1 \cdot p_k \dots q_N \cdot p_k\}$$

gdje je p_k kvadri-impuls čestice k , q_a i q_b su kvadri-impulsi snopova, a $q_1, \dots, q_N$ predstavljaju kvadri-impulse N džetova u događaju. U graničnom slučaju kada $\tau_N \rightarrow 0$, događaj sadrži N uskih džetova.

U ovom radu mjeri se efikasni presjek u zavisnosti od N-džetnost varijabli: nula-džetnost (τ_0), jedan-džetnost (τ_1) kao i zbir transverzalnih impulsa čestica kreiranih u interakciji. Osim ovih varijabli zasnovanih na kinematici rekonstruisanih naelektrisanih čestica, u ovom radu mjere se i varijable koje su zasnovane na kinematici rekonstruisanih džetova anti-kT algoritmom. Ove varijable definisane su na sljedeći način:

$$\tau_j = p_T^j \frac{1}{2 \cosh(y_j - Y)},$$

gdje su p_T^j i y_j transverzalni impuls i rapiditet džeta, j , dok je Y rapiditet Z bozona. U radu su dobijeni efikasni presjeci u zavisnosti od $\tau_{\max} = \max_j \tau_j$ i $\tau_{\text{sum}} = \sum_j \tau_j$.

Mjerenja opisanih varijabli su dobijena analizom događaja koji sadrže par rekonstruisanih miona koji nastaju pri raspadu realnog Z bozona sa invarijantnom masom između 76 and 106 GeV kao i virtuelnih Z bozona sa invarijantnom masom između 125 i 150 GeV, 150 i 350 GeV i između 350 i 1500 GeV za četiri različita intervala transveralnog impulse Z bozona.

Mjerenja su upoređena sa dva teorijska modela zasnovana na presjecima sa tzv. fiksiranim redom na nivou partona sa tačnošću do vodećeg reda (engl. leading-order – LO) ili sljedećeg vodećeg reda (engl. next-to-leading-order – NLO) u teoriji jake interakcije Kvantne hromodinamike (engl. Quantum ChromoDynamics – QCD) za različite multipliciteta lakih partona koji se spajanjem podudaraju sa nastalom partonskom kaskadom. Rezultati teorijskih modela dobijeni su korišćenjem generatora MadGraph5_aMC@NLO. Prvi model spaja od nula do četiri partona pri vodećem redu tj. LO dok se u drugom spajanje vrši od nula do dva pri NLO. Eksperimentalni rezultati su upoređeni i sa modelom zasnovanim na narednom-nakon-sljedećeg-reda (engl. next-to-next-to-leading order – NNLO) kombinovanim sa resumacijom članova višeg reda po 0-džetnost varijabli koji se podudaraju sa partonskim kaskadama dobijenim GENEVA generatorom događaja.

Jedan dio disertacije posvećen je izučavanju performansi i kalibraciji Elektromagnetnog kalorimetra (ECAL) sa CMS eksperimenta tokom RUN 2 perioda (2016, 2017 i 2018. godina). Ovaj detektor je ključna komponenta za detekciju fotona, elektrona i pozitrona i zbog toga je vrlo značajan za mnoge analize koje se izvode u CMS kolaboraciji.

Disertacija se sastoji od uvodnog dijela, pet poglavlja i zaključka. Pored toga, date su liste sa slikama i tabelama. Disertaciji prethodi apstrak napisan na crnogorskom, francuskom i engleskom jeziku. Teorijski uvod u Standardni Model je opisan u poglavlju 1. U poglavlju 2 opisan je CMS detektor. Interkalibracija i performance ECAL detektora opisane su u poglavlju 3. Mjerenja varijabli zasnovanih na kinematici rekonstruisanih naelektrisanih čestica predstavljena su u poglavlju 4 dok su mjerenja varijabli zasnovanim na rekonstruisanim džetovima predstavljena u poglavlju 5. Nakon toga slijede zaključci.

Poglavlje 1 opisuje teorijske osnove Standardnog Modela. Teorije i Lagranžijani koji opisuju fundamentalne interakcije su ukratko izloženi: kvantna elektrodinamika, kvantna hromodinamika i elektroslaba teorija. Glavni koncepti teorije Izvan Standardnog Modela (engl. Beyond the Standard Model) su diskutovani u potpoglavlju 1.1. Teorijski proračun efikasnog presjeka proton-proton interakcije sa kolinearnom faktorizacijom i Funkcijama raspodjele partona (engl.

Partong Density Functions – PDF) su opisani u dijelu 1.2. Nakon ovog opšteg dijela, u potpoglavlju 1.3 detaljno je objašnjen Drel-Jan proces. U potpoglavlju 1.4 uvode se Monte Carlo (MC) simulacije fizičkih procesa kao i odziva detektora koje imaju vrlo važnu ulogu za mjerenja i nova otkrića. Ključni koncepti generatora, MadGraph5_aMCc@NLO i GENEVA, korišćenih za upoređivanje eksperimentalnih rezultata i teorijskih predikcija su opisani.

Poglavlje 2 opisuje eksperimentalnu aparaturu. Protoni se ubrzavaju na sudaraču LHC. Protoni i čestice koje nastaju pri njihovim sudarima detektuju se u CMS detektoru. CMS je vrlo sofisticirana aparatura koja se sastoji od poddetektora zasnovanim na različitim tehnologijama. Kombinovanjem informacija sa subdetektora rekonstruiše se kinematika svakog sudara: identifikuju se nastale čestice i mjere se njihovi impulsi i energije. U ovom poglavlju predstavljen je skeleratorski sistem i detektori CMS eksperimenta. U potpoglavlju 2.1 dat je kratak osvrt na LHC, njegov dizajn i performanse, rad i budući planovi. Potpoglavlje 2.2 je namijenjeno CMS eksperimentu. CMS koordinatni sistem i osnovne kinematičke varijable koje opisuju čestice kreirane u proton-proton interakcijama su definisane. Struktura i performance ključnih detektorskih komponenti CMS-a su ukratko predstavljene. Rekonstrukcija čestica u detektorima je opisana u potpoglavlju 2.3. Objašnjena je rekonstrukcija trajektorija nastalih čestica i verteksa, kao i identifikacija i rekonstrukcija elektrona, forona, miona kao i algoritam za rekonstrukciju čestica korišćenjem informacija sa različitih detektorskih sistema (engl. Particle flow algorithm - PF). Ovo poglavlje zaključeno je potpoglavljem 2.4 koje opisuje nadgradnju CMS detektora koja se predviđa za fazu rada LHC-a sa visokom luminoznošću (HL-LHC period).

Kao što je ranije pomenuto, dio ove teze je posvećen interkalibraciji i izučavanju performansi elektromagnetnog kalorimetra CMS-a što je opisano u **Poglavlju 3**. Odlična rezolucija ovog kalorimetra ima važnu ulogu u mnogim fizičkim analizama koje se realizuju na CMS-u. Naročito, visoka preciznost mjerenja enrgije elektrona i fotona ovim kalorimetrom imala je esencijalni doprinos u otkriću Higs bozona kroz kanal raspada na dva forona, $H \rightarrow \gamma\gamma$, tokom Run 1 perioda rada LHC-a. Da bi se optimizirale performanse detektora sprovedena je kalibracija relativnog odziva ECAL kanala i dobijene korekcije za varijacija odziva detektora tokom vremena. Tokom RUN 2 perioda, zbog značajnog povećanja luminoznosti tj. broja proton-proton interakcija u jedinici vremena, kreirani su zahtjevni uslovi na koje je ECAL morao što bolje odgovoriti.

Mjerenje enrgije i rekonstrukcija signala u ECAL-u su opisani u potpoglavljima 3.1 i 3.2. Pošto odziv ECAL-a varira tokom vremena zbog varijacija transparentnosti kristala izazvanih radijacijom, vršena je konstantna kalibracija kalorimetra. Laserski sistem za praćenje transparentnosti kristala je opisan u potpoglavlju 3.3. Dio ove disertacije posvećen je interkalibraciji ECAL-a korišćenjem Drel-Jan procesa tokom kojeg se kreira electron-pozitron par. Konstante interkalibracije dobijene su za sve tri godine tokom Run 2 perioda. Pored ovog, ova teza obuhvata i mjerenje rezolucije ECAL-a tokom Run 2 perioda i upoređivanje performansi rada ECAL-a tokom Run 1 i Run 2 perioda. U potpoglavlju 3.4 predstavljene su različite metode za interkalibraciju dok potpoglavlje 3.5 daje više detalja o korišćenju Drel-Jan procesa u ove svrhe. Planovi koji se odnose na nadgradnju ECAL-a tokom HL-LHC perioda opisani su u potpoglavlju 3.6.

U **Poglavlju 4** prikazana su mjerenja diferencijalnog efikasnog presjeka za produkciju Z bozona u funkciji N-džetnost varijabli, τ_0 and τ_1 , kao i diferencijalni efikasni presjeci u zavisnosti od sume transverzalnih impulse naelektrisanih čestica. Sudari tj. interakcije u kojima se kreira Z bozon selektuju se kroz postojanje dva naelektrisana miona. Mjerenja su dobijena za realni Z i virtuelne Z bozone i fotone. Zbog velike luminoznosti, glavni izazov pri ovakvim mjerenjima je prisustvo čestica iz velikog broja proton-proton interakcija koje se preklapaju i dešavaju istovremeno sa interakcijom tokom koje se kreirao Z bozon, njih u prosjeku 35, tzv. *pileup*. Da bi se redukovao doprinos od čestica koje potiču od *pileup* događaja, pomenute varijable su računane samo

korišćenjem rekonstruisanih naelektrisanih čestica jer se za njih može odrediti da li potiču od tzv. primarnog vertexa tj. tačke u kojoj se desila interakcija od interesa. Mjerenja su vršena za četiri interval transverzalnog impulse Z bozona, $p_T(Z)$, i tri intervala dileptonskih masa (M_{ll}). U prvom dijelu ovog poglavlja (4.1) definisane su varijable koje će se mjeriti. U potpoglavlju 4.2 predstavljeni su uzorci anlaiziranih interakcija dobijenih iz eksperimentalnih podataka i iz simulacija korišćeni u ovom radu. Selekcioni kriterijumi korišćeni za odabir interakcija od interesa, kao i naelektrisanih čestica nastalih u njima predstavljeni su u potpoglavlju 4.3. Selekcija događaja tj. interakcije zasnovana je na identifikaciji miona čije su trajektorije rekonstruisane sa velikom preciznošću u detektoru za rekonstrukciju trajektorija naelektrisanih čestica i Mionskom sistemu. Osim ovog, zahtjeva se da ovi mioni budu izolovani tj. da ne pripadaju nekom džetu u kojem nastaju kao rezultat raspada drugih čestica – uglavnom hadrona. Takođe, za računanje τ_0 , τ_1 i sumarnog transverzalnog impulse čestica uzimaju se u obzir samo naelektrisane čestice čiji je transverzalni impuls veći od 1GeV. Za sve čestice se zahtjeva se da se emituju unutar geometrijske oblasti koja je u potpunosti pokrivena detektorima tj. da je apsolutna vrijednost pseudorapiditeta $|\eta| < 2.4$.

Odziv detektora je detaljno simuliran sofisticiranim softverom uz modeliranje interakcije svake čestice sa materijalom detektora i uz emulaciju elektronike za očitavanje signala. Simulacija se upoređuje sa realnim podacima da bi se utvrdila eventualna razlika. Potpoglavlje 4.4 opisuje dobijanje korekcija koje se dodatno primjenjuju na simulirane događaje kako bi se unaprijedila tačnost simulacije. Ove korekcije su zajedničke za sve analize na CMS-u. Računanje ovih tzv. faktora skaliranja za primijenjeni trigger je dio rada ove doktorske disertacije i dobijeni su primjenom *Tag-and-Probe* metoda dok su ostale korekcije dobijene u okviru drugih CMS grupa. Nakon primijenjenih korekcija, raspodjele za mione i mionske parove upoređene su sa simulacijom. Ova poređena su urađena i za raspodjele kinematičkih veličina koje koje karakterišu razmatrane naelektrisane čestice. Da bi se eksperimentalni rezultat upoređivao sa rezultatima teorijskih modela, mjerenja moraju biti korigovana za detektorske efekte koji utiču na rekonstrukciju čestica, a vezani su za neefikasnog detektora ili misidentifikacija čestica od interesa. Dodatno, pošto eksperimentalna aparatura ima ograničenu rezoluciju, izmjerena vrijednost neke opservable obično ne odgovaraju tačnoj vrijednosti i neophodno je primijeniti tehnike za dekonvoluciju detektorskih efekata koje su predstavljenе u potpoglavlju 4.5. U potpoglavlju 4.6 je detaljno objašnjeno računanje svih prisutnih sistematskih grešaka. Ovaj dio takođe uključuje detaljno objašnjenje računanja teorijskih grešaka koje postoje usred primjene određenih modela. U potpoglavlju 4.7 predstavljeni su rezultati diferencijalnog efikasnog presjeka u zavisnosti od 0-džetnosti, 1-džetnosti i sumarnog transverzalnog impulsa naelektrisanih čestica. Rezultati su dobijeni za invarijantnu masu Z bozona, u oblasti pika, između 76 i 106 GeV, između 125 i 150 GeV, 150 and 350 GeV i 350 i 1500 GeV. Varijable su izmjerene i za četiri intervala transverzalnog impulse Z bozona: transverzalni impuls manji od 6 GeV, od 6 do 12 GeV, od 12 do 25 GeV i iznad 25 GeV. Eksperimentalni rezultati su upoređeni sa tri prethodno opisana teorijska modela.

Poglavlje 5 sadrži rezultate opservabli zasnovanih na rekonstruisanim džetovima. Ove opservable su izmjerene u događajima u kojima rekonstruisani Z bozon ima vrijednost mase u oblasti pika (realni Z bozon tj- Z bozon na masenoj ljusci). Definicije varijabli zasnovanih na džetovima, τ_{max} and τ_{sum} , predstavljene su u potpoglavlju 5.1. Objašnjen je i značaj mjerenja efikasnog presjeka u zavisnosti of ovih varijabla i njihova prednost u odnosu na standardne varijable koje opisuju džetove. Potpoglavlje 5.2 opisuje rekonstrukciju i selekciju džetova. Dva metoda za redukciju doprinosa džetova koji potiču od pileup-a su upoređena i usvojen je onaj koji je pogodniji za mjerenja N-džetnost varijabli. U poglavlju 5.3 objašnjene su dodatne sistematske greške koje se pojavljuju rekonstrukcijom džetova. Raspodjele po τ_{max} and τ_{sum} varijablama na niou detektora i prikazani su u potpoglavlju 5.4 i upoređene sa Monte Carlo

simulacijama. Rezultati za diferencijalni efikasni presjek po $\tau_{\max}$ and τ_{sum} varijablama prikazani su na kraju ovog poglavlja. Data su poređenja eksperimentalnih rezultata i teorijskih modela koji su korišćeni i u poglavlju 4.

Na kraju, rezultati disertacije su sumirani u **Zaključcima**.

2. Vrednovanje disertacije

2.1. Problem (navesti neriješena i kontraverzna mišljenja o istraživačkom problemu i dosadašnjim pokušajima rješavanja problema, rješenja do kojih su došli drugi autori, ocjenu osnove disertacije u skladu sa radovima i istraživanjima kandidata i način njihove veze sa samom disertacijom)

Brojne analize na LHC-u kategorišu događaje tj. interakcije u zavisnosti od broja džetova koji se u njima kreiraju. Analize koje se odnose na procese u kojima se dešava fuzija vektorskih bozona (engl. Vector Boson Fusion – VBF) uobičajeno zahtijeva dva džeta koja su značajno razdvojena po rapiditetu – na primjer zahtjevanjem postojanja sistema od dva džeta sa velikom invarijantnom masom. Ovakve kategorizacije tj. selekcije podrazumijevaju postojanje faznog prostora sa restrikcijom na dodatno QCD zračenje. Ovakva restrikcija čini efikasni presjek osjetljivim na eventualnu “meku” (sa malim transverzalnim impulsom) i kolinearnu radijaciju i uvodi po svim redovima konstante jake interakcije, α_s , članove perturbacije $\alpha_s^n \log^{2n}(Q/p_T^{\text{veto}})$, gdje je Q energetska skala koja karakteriše događaj, a p_T^{veto} je prag za transverzalni impuls iznad kojeg su džetovi zabranjeni. Ukoliko je tzv. veto-uslov jači (niže p_T^{veto}), veći su logaritamski članovi. Zbog slabe konvergencije perturbacionog računa za efikasni presjek, članovi su posebno veliki u slučaju produkcije Higs bozona što vodi neodređenosti mjerenja od oko 11% za NNLO i oko 8% za NNLO+NLL (next-to-leading-logarithmic) proračune sa $p_T^{\text{veto}} = 25$ GeV uz primjenu anti- k_T algoritma za rekonstrukciju džeta sa parametrom rastojanja $R = 0.5$. Za male vrijednosti parametra rastojanja ($R \ll 1$), algoritam uvodi logaritamske članove po R koji doprinose NLL proračunima koji slabo konvergiraju. Frank J. Tackmann sa saradnicim apredložio je korišćenje inkluzivnih varijabli koje se mogu resumirati (imati konačnu vrijednost za red sa divergentnim članovima) i omogućavaju precizno računanje efikasnih presjeka uz korišćenje najsavremenijih proračuna. Dvije vrste varijabli su predložene, inkluzivne koje ne zavise od algoritma za rekonstrukciju džetova i zbog toga uprošćavaju resumaciju (τ_N), i varijable zasnovane na rekonstruisanim džetovima ($\tau_{\max}$). Za razliku od mjerenja sa džetovima, u literaturi postoji vrlo malo mjerenja koja upoređuju teorijska predviđanja za ove N-džetnost varijable sa eksperimentalnim rezultatima i ograničena su samo na τ_0 . Ova teza popunjava upravo te praznine detaljnim mjerenjima ovih varijabli sa dva cilja: obezbjeđivanje pouzdanosti njihovog korišćenja kao džet-veto algoritma i obezbjeđivanje eksperimentalnih rezultata za resumaciju članova višeg reda.

2.2. Ciljevi i hipoteze disertacije

Glavni ciljevi

1. Mjerenje diferencijalnog efikasnog presjeka za udruženu produkciju Z bozona i džetova u proton-proton sudarima na energiji u sistemu centra masa od 13 TeV u funkciji od varijabla koje se zasnivaju na kinematici rekonstruisanih naelektrisanih hadrona: 0-džetnosti, 1-džetnosti i sume transverzalnih impulse naelektrisanih čestica za Z bozon u oblasti masenog pika, za pet intervala transveralnog impulse: inkluzivni, ispod 6 GeV, između 6 i 12 GeV, između 12 i 25 GeV i iznad 25 GeV.

2. Mjerenje prethodno navedenih presjeka za virtuelni Z bozon velike mase u različitim intervalima invarijantnih masa: od 125 i 150 GeV, od 150 i 350 GeV i od 350 do 1500 GeV.
3. Mjerenje diferencijalnih efikasnih presjeka udružene produkcije Z bozona i džetova u proton-proton sudarima na energiji u sistemu centra masa od 13 TeV u funkciji od varijabla zasnovanih na rekonstruisanim džetovima: τ_{sum} i τ_{max} .
4. Upoređivanje eksperimentalno izmjerenih diferencijalnih efikasnih presjeka u funkciji N-džetnost varijabla sa najsavremenijim teorijskim proračunima.
5. Izučavanje performansi i interkalibracija elektromagnetnog kalorimetra tokom Run 2 perioda (2016, 2017 and 2018).

2.3. Bitne metode koje su primijenjene u disertaciji i njihovu primjerenost. Ako je primijenjena nova ili dopunjena metoda, opišite šta je novo

Eksperimentalni podaci analizirani u ovoj tezi dobijeni su korišćenjem CMS detektora u CERN-u u Ženevi. Ovaj detektor je jedna kompaktna struktura sa velikim brojem poddetektorskih sistema. Centralni dio je veliki superprovodni solenoid dužine 12.5 m i radijusa 6 m. Nominalna vrijednost magnetnog polja koje on proizvodi iznosi 4T. Unutar solenoida instalirani su: detektor za rekonstrukciju naelektrisanih čestica, ECAL i hadronski kalorimetar (HCAL).

Izvan solenoida je gvozdeni nosač magneta isprepletan slojevima mionskih detektora. Da bi se rekonstruisale i identifikovale čestice korišćen je PF algoritam. Ovaj algoritam kombinuje informacije sa svih poddetektoa omogućavajući najbolju moguću identifikaciju i mjerenja energije svih vrsta objekata. PF algoritam koristi informacije iz detektora za rekonstrukciju trajektorija naelektrisanih čestica i mionskog sistema i kalorimetrijskih klastera rekonstruisanih u ECAL-u i HCAL-u. Ovaj algoritam omogućava rekonstrukciju fotona, neutralnih hadrona, naelektrisanih hadrona, elektrona i miona i omogućava rekonstrukciju džetova i određivanje nedostajućeg transverzalnog impulsa. Selekcija događaja započinje mionima čija je putanja ekstrapolirana iz detektora naelektrisanih čestica konzistentna sa trajektorijom u mionskom sistemu dok se informacija o energiji dobija iz zakrivljenosti njihove putanje pri prolasku kroz magnetno polje.

Da bi se izmjerili efikasni presjeci u fizičkim analizama, neophodno je uporediti eksperimentalne podatke sa simulacijom kako bi se primijenile tehnike za dekonvoluciju detektorskih efekata. Proton-proton interakcije generisane su MADGRAPH5 AMC@NLO generatorom, a CMS detektorski sistem je modeliran korišćenjem GEANT4. Rekonstrukcija simuliranih događaja vrši se na identičan način kao u slučaju eksperimentalnih podataka. Da bi se analizirali eksperimentalni i simulirani podaci, zajednički softverski paket je razvijen u CMS kolaboraciji koji uključuje i softverski paket ROOT. Analiza u ovom radu je zahtjevala razvoj programa u C++ i Python programskim jezicima.

U ovoj disertaciji je izračunata efikasnost korišćenog mionskog trigeru u eksperimentalnim i simuliranim podacima, a odnos ovih efikasnosti se koristi kao faktor skaliranja koji se dodatno primjenjuje na simulirane podatke. Da bi dobila faktore skaliranja, doktorandkinja je koristila tehnike zasnovane na samim podacima, *Reference trigger* i *Tag & Probe method*.

Sa ovom tezom, razvijen je novi metod klasifikacije događaja zasnovanim na broju džetova koji

je implementiran u CMS-u.

Takođe, metod korišćen za upoređivanje performansi ECAL-a tokom različitih vremenskih perioda je inovativan i prvi put se koristi u ovoj tezi. Omogućena je tzv. faktorizacija pileup efekata i njihovo islučivanje iz poređenja performansi. Podaci su prikupljeni u uslovima povećane luminoznosti LHC-a, što je za performance detektora zahtjevnije okruženje. Zahvaljujući inovativnoj metodi predloženoj u ovom radu, bilo je moguće dokazati da se performance detektora nisu promijenile tokom godina i da se kalibracija detektora nije pogoršala tokom vremena.

2.4. Rezultati disertacije i njihovo tumačenje

Raspodjele varijable τ_0 su mjerene za različite transverzne impulse Z bozona, $p_T(Z)$, i upoređene sa teorijskim predikcijama dobijenim aMC@NLO i GENEVA generatorima. Integral pod raspodjelom $p_T(Z)$ u oblasti ispod 1 GeV je u generatoru aMC@NLO niži nego u eksperimentalnim podacima, a ovo je naročito izraženo za srednje $p_T(Z)$ (< 12 GeV). Resumacija koja je uključena u GENEVA generatoru bolje opisuje ove eksperimentalne podatke za inkluzivnu $p_T(Z)$ raspodjelu i oblast gdje je $p_T(Z)$ manji od 6 GeV. Odstupanja su detektovana i za veće vrijednosti transverzalnih impulsa dostižući i 50% za fazni prostor ograničen na $p_T(Z) > 25$ GeV. Kad je u pitanju cjelokupna raspodjela po τ_0 , inkluzivna po $p_T(Z)$, teorijski proračun koji uključuje resumaciju obezbjeđuje bolje slaganje sa eksperimentalnim mjerenjima. Ograničivši se na $p_T(Z)$ ispod 6 GeV ili između 6 i 12 GeV, može se zaključiti da je nivo slaganja teorijskih proračuna i eksperimentalnih rezultata vrlo sličan. Za veće vrijednosti transverznog impulsa, $12 < p_T(Z) < 25$ GeV, eksperimentalni podaci se bolje opisuju aMC@NLO modelom. Dio raspodjele po τ_0 gdje τ_0 ima vrijednost nižu od donje vrijednosti razmatranog $p_T(Z)$ čine uglavnom događaji sa hadronskom aktivnošću koja balansira transverzalni impuls izvan oblasti koju pokriva detektor. Teškoće da se reprodukuju raspodjele za tzv. pt-balans u događajima sa Z bozonom i džetovima u oblasti rapiditeta $|y| < 2.4$ detektovan je i ranije na CMS-u. Neslaganja eksperimentalnih i teorijskih raspodjela po τ_0 dobijena su i za transverzne impulse veće od praga za $p_T(Z)$ i ona su slična za oba generator, aMC@NLO i GENEVA.

Raspodjele po τ_0 dobijene su i inkluzivno po $p_T(Z)$ uz zahtjev da Z bozon bude izvan masene ljuske tj. da bude virtuelan sa većim vrijednostima mase čime se povećava i doprinos od logaritamskih članova za efikasni presjek, $\alpha_s^n \log^2 n(Q/p_T^{\text{veto}})$. Slaganje sa eksperimentalnim mjerenjima je slično za proračune sa i bez resumacije. Pokrivenost razlika između eksperimentalnih podataka i teorijskih proračuna neodređenostima koje se odnose na svaki od proračuna je lošija kod proračuna sa resumacijom za koje bismo očekivali bolju kontrolu neodređenosti kad je u pitanju ova varijabla.

Diferencijalni efikasni presjeci u zavisnosti od on τ_1 varijable mjereni su za iste invarijantne mase, $m_{\mu\mu}$, i $p_T(Z)$ intervale kao i τ_0 . Tačnost ove opservable se očekuje da bude slična za GENEVA generator i proračune sa fiksiranim redom što je i potvrđeno u ovom radu. Oblici teorijskih raspodjela dobijeni različitim generatorima su slični a razlike su uglavnom u vrijednost ukupnog efikasnog presjeka. Za invarijantne mase u okolini Z pika, u oblasti u kojoj dominiraju partonske kaskade, dobijene su razlike i do 90% za male vrijednosti τ_1 . Za veće vrijednosti $p_T(Z)$ između 25 i 35 GeV, predikcija koja uključuje maksimalni broj džetova u matričnom elementu najbolje opisuje eksperimentalne rezultate. GENEVA generator obezbjeđuje dobar opis eksperimentalnih mjerenja τ_1 varijable za mjerenja za sve oblasti invarijantnih masa iznad Z bika. Predikcije aMC@NLO proračuna su slične osim za interval $\tau_1 \in [0, 0.2]$ GeV i $p_T(Z) \in [125, 150]$ GeV gdje

je doprinos veći u odnosu na eksperimentalna mjerenja.

Rezultati za sumarni transversalni impuls naelektrisanih čestica su dobijeni za iste intervale transversalnog impulsa i invarijantnih masa kao i τ_0 and τ_1 . Za fazni prostor inkluzivan po $p_T(Z)$, GENEVA i aMC@NLO solidno opisuju eksperimentalne rezultate nezavisno od invarijantne mase, ali sa nešto ravnijom raspodjelom u slučaju aMC@NLO. Takođe, aMC@NLO daje dobru predikciju za fazni prostor ograničen na $p_T(Z) > 25$ GeV sa bozonom u oblasti Z pika.

Kad su u pitanju raspodjele zasnovane na džetovima, $\tau_{\max}$ and τ_{sum} , postoje određena odstupanja GENEVA raspodjela u odnosu na eksperimentalne rezultate za niže vrijednosti $\tau_{\max}$. Za ostale oblasti $\tau_{\max}$ svi teorijski modeli se slažu sa eksperimentalnim mjerenjima. U odnosu na eksperimentalne rezultate, svi generatori predviđaju izraženiji pik u τ_{sum} raspodjeli pri čemu je taj efekat najizraženiji u slučaju GENEVA generator. Teorijske neodređenosti dobijene GENEVA generatorom ne objašnjavaju ove razlike.

Da bi se dobio optimalan rad detektora, izvršena je kalibracija relativnog odziva kanala ECAL kalorimetra i primijenjene su korekcije na vremensku zavisnost odziva. Run 2 period sa povećanim nivoom pileup-a i zračenja predstavljao je zahtjevno okruženje za ECAL. U ovoj tezi dobijene su interkalibracione konstante korišćenjem događaja sa Drel-Jan parovima iz raspada $Z \rightarrow e^+e^-$ i proučavane performansi ECAL-a. Interkalibracione konstante dobijene su za sve tri godine tokom Run 2 perioda. Konstantni monitoring i kalibracija rezultirali su odličnim performansama ECAL-a. Energetska rezolucija za elektrone iz raspada Z bozona je na nivou od 1.7 % u oblasti niskih vrijednosti pseudorapiditeta. Takođe je pokazano da su performance ECAL-a tokom Run 2 perioda vrlo slične onima iz Run 1 perioda bez obzira na starost detektora i mnogo veću luminiznost sa LHC-a.

2.5. Zaključci (usaglašenost sa rezultatima i logično izvedeno tumačenje)

Diferencijalni efikasni presjeci izmjereni su u funkciji N-džetnost varijabli, onih koje su zasnovane na kinematici rekonstruisanih naelektrisanih čestica i onih koje su zasnovane na rekonstruisanim džetovima. Mjerenja su upoređena sa dva teorijska modela zasnovana na presjecima računatim korišćenjem kvantno-dinamičkih proračuna za efikasni presjek sa fiksiranim redom, LO ili NLO, za različite multiplicitete lakih partona koji se spajaju i podudaraju sa partonskom kaskadom. Ovi proračuni dobijeni su MadGraph5_aMC@NLO generatorom, pri čemu se u jednom slučaju spajanje vrši za multiplicitete od 0 do 4 pri LO a u drugom od 0 do 2 pri NLO. Eksperimentalna mjerenja su takođe upoređena sa predikcijama zasnovanim na NNLO u kombinaciji sa resumacijom članova višeg reda po 0-džetnost varijabli koje su dobijene GENEVA generatorom. Od varijabli koje nisu zasnovane na rekonstruisanim džetovima, mjerene varijable su: 0-džetnost, 1-džetnost i sumarni transversalni impuls naelektrisanih čestica. N-džetnost varijable se mogu koristiti za zabranu događaja sa radijacijom visoke energije ili džetovima i da definišu teorijski dobro kontrolisani efikasni presjek za interakcije sa kreiranih N džetova. Ove varijable su takođe vrlo osjetljive na tzv. poddogađaje koji predstavljaju čestice koje potiču od dodatnih interakcija partona iz istog proton-proton sudara i zbog toga njihovo mjerenje predstavlja vrlo važan dio koji će doprinijeti razvoju teorijskih modela i razumijevanju interakcije.

Ova mjerenja dobijena su za interakcije u kojima je kreiran dimionski par nastao raspadom Z bozona sa masene ljuske (realnog) sa invarijantnom masom između 76 i 106 GeV, i Z bozon van masene ljuske (virtuelni) sa invarijantnom masom između 125 i 150 GeV, 150 i 350

GeV i 350 i 1500 GeV. Ove varijable su takođe mjerene za četiri intervala transversalnog impulsa Z bozona. Mjerenja za realne bozone pokazuju da je oblast niskih vrijednosti 0-džetnosti u inkluzivnom slučaju najbolje opisana teorijskim proračunom dobijenim GENEVA generatorom. U oblasti sa velikim impulsom Z bozona gdje se očekuje kreacija jednog ili više džetova zajedno sa Z bozonom, MADGRAPH5 aMC@NLO daje najbolje rezultate. Za oblasti sa većom invarijantnom masom, svi teorijski modeli pokazuju solidno slaganje sa eksperimentalnim rezultatima. Mjerenja ovih varijabli pokazuju dobar potencijal za proučavanje podogađaja. Proučavanjem ovih varijabli za invarijantne mase iznad mase Z pika, radi se u režimu sličnom produkciji Higs bozona.

Dobijeni su rezultati za N-džetnost varijable zasnovane na rekonstruisanim džetovima $\tau_{\max}$ i τ_{sum} . Ove varijable su definisane korišćenjem transversalnog impulse džeta sa težinskim faktorom koji zavisi od rapiditeta džeta. Ove varijable daju mogućnost da se postigne značajno isključenje događaja sa džetovima u centralnoj oblasti rapiditeta dok je u oblasti tzv. prednjih rapiditeta ovaj efekat manji. Eksperimentalna mjerenja $\tau_{\max}$ varijable pokazuju dobro slaganje sa teorijskim rezultatima naročito sa MadGraph5_aMC@NLO. Stoga, ova varijabla se može koristiti za restrikciju događaja sa kreiranim džetovima.

3. Konačna ocjena disertacije

3.1. Usaglašenost sa obrazloženjem teme

Objekti teme teze, fizička mjerenja i optimizacija performansi detektora, detaljno su istražene. Rad je u potpunosti usaglašen sa obrazloženjem teme.

3.2. Mogućnost ponovljivosti

Mjerenja iz disertacije su dobijena korišćenjem podataka sa CMS eksperimenta. Istraživanja pod identičnim uslovima mogu se ponoviti korišćenjem eksperimentalnih podataka sa ATLAS eksperimenta. Takođe, mjerenja se mogu ponoviti na oba seta podataka korišćenjem raspada Z bozona na elektron-pozitron par.

Ipak, analiza je složena i biće teško da je reprodukuje neko van CMS kolaboracije.

Numerička forma rezultata biće objavljena, pored publikacije u časopisu, u HEPDATA (<https://www.hepdata.net/>) i biće uključena u Robust Independent Validation of Experiment and Theory - Rivet, (<https://rivet.hepforge.org/>) da omogući poređenje sa bilo kojim proračunom.

3.3. Buduća istraživanja

Teza ima za cilj proučavanje novih varijabli čije se korišćenje predlaže umjesto veta na džetove u analizama u fizici visokih energija. Rad je pokazao da je modeliranje N-džetnost varijabli Monte Karlo generatorima lošije od modeliranja standardno korišćenih varijabli za džetove. Stoga je neophodno istraživanje koje će voditi poboljšanju teorijskih proračuna, prvo zbog njihove upotrebe u analizi podataka, a zatim i zbog razumijevanja resumacije članova viših redova.

3.4. Ograničenja disertacije i njihov uticaj na vrijednost disertacije

Nema posebnih ograničenja.

Orginalni naučni doprinos

(dati pojašnjenje: originalnost (originalnost(sasvim nova saznanja, dopuna/proširenje postojećeg znanja ili pobijanje postojećeg znanja), uticaj rezultata disertacije na napredak naučne oblasti, uticaj rezultata na struku (direktno, indirektno))

Ovaj rad doprinosi razumijevanju i modeliranju radijacije mekih gluona u proton-proton sudarima. U radu su dobijena mjerenja varijable koja je uvedena 2010. godine i koja se od nedavno koristi za računanje efikasnih presjeka sa izvanrednom tačnošću koristeći proračune sa NNLO po konstanti jake interakcije, α_s , kombinovane sa logaritamskim članovima do NNLL i partonskom kaskadom. Proračuni koji uključuju partonske kaskade su veoma značajni i sa eksperimentalnog stanovišta jer omogućavaju simulaciju proton-proton sudara uključujući odziv detektora što nije slučaj sa proračunima sa fiksiranim redom. Simulacija je neophodna u eksploataciji podataka sa eksperimenata kakav je CMS. N-džetnost varijabla je do sada mjerena samo u posebnom slučaju kada je $N = 0$ (0-džetnost). U ovoj tezi dobijeno je prvo mjerenje za $N \geq 1$.

Doprinos članova višeg reda je veći u slučaju produkcije Higs bozona. Sličan režim se može postići korišćenjem događaja sa produkcijom Z bozona zahtijevajući da je bozon van masene ljuske i da ima veću masu. Z bozoni koji se na LHC-u proizvode u ogromnom broju, korišćeni su kao zamjena za razumijevanje rijetke produkcije Higs bozona i validacije teorijskog proračuna efikasnih presjeka. Pored toga, ova varijabla se može iskoristiti i za redukciju i identifikaciju različitih mehanizama produkcije Higs bozona koje karakteriše kreacija nekoliko džetova u konačnom stanju.

ECAL detektor obezbjeđuje detekciju i mjerenje energije fotona, elektrona i pozitrona i stoga je ključna komponenta detektorskog sistema CMS eksperimenta. Za dobijanje rezultata visoke preciznosti i nova otkrića neophodne su odlične performance ovog detektora.

Mišljenje i prijedlog komisije

U radu su predstavljena prva mjerenja N-džetnost varijabli pri produkciji realnih i virtuelnih Z bozona u CMS eksperimentu i performanse njegovog elektromagnetnog kalorimetra.

Zbog dobre konvergencije perturbativnog reda za računanje efikasnog presjeka, produkcija Z bozona je odličan poligon za testiranje resumacije članova višeg reda i njihovo upoređivanje sa teorijskim modelima. Režim resumacije sličan kreaciji Higs bozona moguće je postići analizirajući Z bozone veće mase - van masene ljuske.

Elektromagnetni kalorimetar igra ključnu ulogu u detektorskom sistemu CMS-a i zahvaljujući doprinosu iz ove disertacije obezbijedena je veoma dobra rezolucija što je od vitalnog interesa za naučni program CMS kolaboracije.

Rezultati disertacije su prikazivani na međunarodnim konferencijama i vorkšopovima koje organizuje CMS kolaboracija. Dio rezultati rada na elektromagnetnom kalorimetru objavljeni su u časopisu *Journal of Instrumentation* koji je vodeći časopis u instrumentaciji fizike čestica.

Jelena Mijušković on behalf of the CMS collaboartion

„The CMS electromagnetic calorimeter upgrade: high-rate readout with precise time and energy resolution“,

Journal of Instrumentation (JINST) 2022 17 C01004

U pripremi je i publikacija mjerenja N-džetnost varijable. Nacrt rada je trenutno u fazi interne recenzije u okviru CMS kolaboracije.

Imajući u vidu sve navedeno, Komisija sa zadovoljstvom predlaže Vijeću Prirodno-matematičkog fakulteta Univerziteta Crne Gore da prihvati doktorski disertaciju pod nazivom „Mjerenje N-džetnost varijabli u događajima sa produkcijom Z bozona u CMS detektoru i performanse njegovog elektromagnetnog kalorimetra“ kandidata Mr Jelene Mijušković kao i da predloži Senatu da imenuje Komisiju za odbranu ove doktorske disertacije.

Izdvojeno mišljenje

(popuniti ukoliko neki član komisije ima izdvojeno mišljenje)

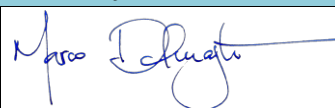
Ime i prezime

Napomena

(popuniti po potrebi)

KOMISIJA ZA OCJENU DOKTORSKE DISERTACIJE

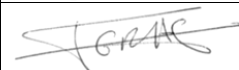
Dr Marco Delmastro, istraživač sa habilitacijom, direktor za istraživanje, LAPP, Univerzitet Savoie Mont Blanc, CNRS/IN2P3, Annecy, Francuska



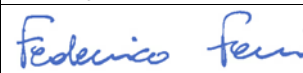
Dr Ulla Blumenschein, senior predavač, School of Physics and Astronomy, Queen Mary, University of London, Engleska



Dr Philippe Gras, istraživač sa stalnom pozicijom, CEA-IRFU, Saclay, Pariz, Francuska



Dr Federico Ferri, istraživač sa habilitacijom, CEA-IRFU, Saclay, Pariz, Francuska



Dr Nataša Raičević, redovni profesor, Univerzitet Crne Gore, Crna Gora


Datum i ovjera (pečat i potpis odgovorne osobe)

Podgorica,
30.05.2022.

DEKAN

MP

OCJENA DOKTORSKE DISERTACIJE

OPŠTI PODACI O DOKTORANDU		
Titula, ime i prezime	Mr Jelena Mijušković	
Fakultet	Prirodno-matematički fakultet, UCG	
Studijski program	Fizika	
Broj indeksa	1/2018	
MENTOR/MENTORI		
Prvi mentor	Dr Nataša Raičević, Redovni profesor	Univerzitet Crne Gore
Drugi mentor	Dr Federico Ferri Researcher with the HDR (habilitation à diriger des recherches)	Institut CEA- IRFU, Saclay, Pariz, Francuska
KOMISIJA ZA OCJENU DOKTORSKE DISERTACIJE		
Dr Marco Delmastro, Researcher with the HDR (habilitation à diriger des recherches), research director External reviewer for University Paris-Saclay	LAPP, Universizy Savoie Mont Blanc, LAPP, CNRS/IN2P3, Annecy, France	
Dr Ulla Blumenschein, senior lecturer External reviewer for University Paris-Saclay	School of Physics and Astronomy, Queen Mary University of London, England	
Dr Philippe Gras, researcher with permanent position	CEA-IRFU, Saclay, Paris, France	
Dr Federico Ferri, researcher with the HDR (habilitation à diriger des recherches)	CEA-IRFU, Saclay, Paris, France	
Dr Nataša Raičević, professor	University of Montenegro, Montenegro	
Datum značajni za ocjenu doktorske disertacije		
Doktorska disertacija i Izvještaj Komisije dostavljen Biblioteci UCG	29.03.2022.	
Javnost informisana (dnevne novine) da su Doktorska disertacija i Izvještaj Komisije dati na uvid	30.03.2022.	
Sjednica Senata na kojoj je izvršeno imenovanje Komisije za ocjenu doktorske disertacije	9.03.2022.	
Uvid javnosti		
U predviđenom roku za uvid javnosti bilo je primjedbi?		
EVALUATION OF THE DOCTORAL THESIS		
1. Dissertation overview (bibliographic data on the dissertation and dissertation summary)		
The scientific area of the thesis is Elementary Particle Physics also called High Energy Physics. This thesis presents the measurements of the differential cross section of Z boson production in association with jets in proton-proton collisions at center of mass energy of 13 TeV. The analysed data has been collected by the CMS (Central Muon solenoid) experiment of LHC (Large Hadron Collider) during the year 2018 and corresponds to an integrated luminosity of 59		

fb^{-1} . The main focus of the thesis is the measurement of N-jettiness variables, τ_N :

$$\tau_N = \sum_k \min \{q_a \cdot p_k, q_b \cdot p_k, q_1 \cdot p_k \dots q_N \cdot p_k\}$$

where p_k is the four-momentum of particle k , q_a and q_b are the four-momenta of the beams and $q_1, \dots, q_N$ represents the four-momenta of N jets in the event. For events with at least N jets, in the limit when $\tau_N \rightarrow 0$, the event contains N narrow jets.

In this thesis, the cross section is measured as a function of track-based event shape variables: zero-jettiness (τ_0), one-jettiness (τ_1) and the sum of the transverse momentum of particles.

Beside the track based variables, the so called jet based variables are also measured. These variables use jets reconstructed with the anti- k_T algorithm. Jet based variables, are defined via:

$$\tau_j = p_T^j \frac{1}{2 \cosh(y_j - Y)},$$

where p_T^j and y_j are transversal momentum and rapidity of jet j and Y is Z boson rapidity. The cross section measurements depending on $\tau_{\max} = \max_j \tau_j$ and $\tau_{\text{sum}} = \sum_j \tau_j$ are presented.

The measurements of event shape variables are performed for the events where pairs of muons are produced in the decay of a Z boson on-shell with an invariant mass between 76 and 106 GeV and also for off-shell Z bosons with an invariant mass between 125 and 150 GeV, 150 to 350 GeV and 350 and 1500 GeV and in four different Z boson transverse momentum regions.

The measurements have been compared with two theoretical predictions based on fixed-order parton-level cross sections calculated at LO (leading order) or NLO (next-to-leading order) accuracy in QCD for different high-parton multiplicities, merged and matched with parton shower. They have been computed with MadGraph5_aMC@NLO. The former merges multiplicities from zero to four at LO, and the latter from zero to two at NLO. The measurements are also compared with a predication at NNLO at fixed order combined with the resummation of higher-order terms in 0-jettiness and matched with parton shower obtained with the GENEVA event generator.

Part of the thesis is devoted to the studies of the performance and the calibration of the Electromagnetic calorimeter (ECAL) of CMS during the Run 2 data taking period (2016, 2017 and 2018 years). This subdetector is crucial for the detection of photons, electrons and positrons and is therefore very important for many analyses in CMS.

This thesis consists of an introductory part, five chapters and a conclusion. The list of figures and tables are provided. The dissertation is preceded by an abstract written in Montenegrin, French and English. The theoretical introduction to the Standard Model is described in chapter 1. In chapter 2, the CMS detector is presented. Intercalibration and performance of ECAL is described in chapter 3. The measurements of track-based event shape variables are presented in chapter 4, and the measurements of jet-based event shape variables are presented in chapter 5. Summary and conclusions follows.

Chapter 1 describes the theoretical basis of the Standard Model. The theories and Lagrangians that describe fundamental interactions are briefly summarized: quantum electrodynamics, quantum chromodynamics and electroweak theory with electroweak symmetry breaking. Main concepts Beyond the Standard Model theory are discussed and conclude section 1.1 of this chapter. The theoretical treatment of the computation of the cross-section of proton-proton interactions, with collinear factorisation and Parton Density Functions are described in section 1.2. After this general part, in section 1.3 Drell-Yan processes are explained in detail. The section 1.4 introduces Monte Carlo (MC) simulations which include physics processes and also the response of the detectors and have very important role for measurements and new discoveries. The main concepts of generators used in the comparison of data and theoretical predictions,

MadGraph5_aMCc@NLO and GENEVA are described.

Chapter 2 describes the experimental setup. Protons are accelerated in the LHC and the particles produced in their collisions are detected with the CMS detector. CMS is a very sophisticated apparatus made of subdetectors using different technologies. By combining the information from the subdetectors, the complete kinematics of each collision is reconstructed: the produced particles are identified and their momenta and energies are measured. In this chapter, the accelerator system and the detector with its subsystems are presented. In section 2.1 a brief description of LHC, its design, performance, operation and future plans are given. Section 2.2 is devoted to the CMS experiment. The CMS coordinate system and the main kinematic variables that describe particles created in proton-proton interactions are defined. The design and performance of the key components of CMS are briefly described. After this, the concept and logic of the trigger system is explained. The reconstruction of particles inside the detector is described in section 2.3. It explains track and vertex reconstruction, electron and photon reconstruction, muon reconstruction as well as the particle flow algorithm (PF) based on information from different detector systems. This chapter is concluded by section 2.4 in which the CMS upgrade for the phase of high luminosity (HL) is described.

As mentioned above, a part of the thesis is devoted to intercalibration and performance studies of the CMS electromagnetic calorimeter, which is described in **Chapter 3**. The excellent resolution of the CMS electromagnetic calorimeter plays an important role in many physics analyses performed at CMS. In particular, its precise measurement of the electron and photon energy had an essential contribution in the discovery of the Higgs boson through the $H \rightarrow \gamma\gamma$ channel during the LHC Run 1 period. In order to optimize the performance, a calibration of the relative response of the ECAL channels and corrections for the response variation in time are performed. The Run 2 data taking period, with the increased pileup and radiation level, created a challenging environment for ECAL.

The energy measurement and signal reconstruction in the ECAL are described in sections 3.1 and 3.2. Since the response of the ECAL varies with time due to the crystal transparency variation induced by irradiation, constant calibration of the detector is performed. The laser monitoring system used for monitoring the crystal transparency is described in Section 3.3. A part of this PhD work was devoted to the intercalibration of the ECAL using the Drell-Yan process where electron-positron pairs are produced. The intercalibration constants were obtained for all three years of the Run 2 period. In addition, this thesis includes work on resolution studies for the Run 2 period and a comparison of the performance of ECAL during Run 1 and Run 2. In section 3.4 the different intercalibration methods are described while section 3.5 provides more detail on the one exploiting the Drell-Yan processes. The plans for the ECAL barrel readout electronics for the HL-LHC are described in Section 3.6.

In **Chapter 4**, the measurements of the differential cross section for the production of a Z boson as a function of track based event shape variables, τ_0 and τ_1 , and as function of the sum of the transverse momentum of charged particles are presented. The Z bosons are selected by their decay channel into two muons. The measurement is done for both on- and off- shell bosons and includes also the contribution from γ^* . The main challenge for these measurements is the presence in the recorded events of many overlapping proton-proton collisions, 35 on average, called pileup and occurring at the same time as the collision producing the Z boson because of the high luminosity of the colliding beams. To suppress the contribution from pileup, the selected particles are required to issue from the primary vertex of the interaction of interest. The event shape variables are computed with charged particles only in order to constrain the contributions coming from the pileup particles.

The measurements are performed in four different transverse momentum, $p_T(Z)$, regions and in

three different dilepton mass (M_{ll}) regions. In the first part of this chapter (Section 4.1), the measured variables are defined. In Section 4.2, data samples and simulated samples are presented. The selection criteria for the events and for the particles used for the N-jettiness calculation are described in Section 4.3. The event selection is based on the identification of two muons with high quality tracks combined from the tracker and muon systems. Beside the track quality these muons are required to be well isolated from jets to exclude muons produced in hadron decays. In addition, it is required that one of the two muons has a transverse momentum above 25 GeV and the other above 20 GeV. Charged particles selected for the calculation of track-based variables are required to have a minimum transverse momentum of 1 GeV. Only particles within the tracker pseudorapidity full-precision acceptance, $|\eta| < 2.4$, are considered. The response of the detector is simulated in detail with a sophisticated software modeling the interaction of each particle with its material and emulating the readout electronics. The simulation is compared with the real data to measure any difference. The Section 4.4 describes the extraction of corrections which are then applied to further improve the accuracy of the simulation. These corrections are common to all the analyses performed with the CMS data. The calculation of the trigger scale factor was part of the thesis work and has been done using the *Tag-and-Probe* method, while the other corrections were computed by some other CMS collaborators. After the corrections were applied, the detector distributions of muon and muon pairs were compared with the simulation. The comparison was also done for the track variables. In order to compare the obtained results with the theoretical predictions or with the results from other experiments, the measurements have to be corrected for the detector effects such as object reconstruction, inefficiency inside the acceptance of the detector and the misidentification of the objects of interest. In addition, since the reconstruction system has a finite resolution, the measured value of an observable usually does not correspond to the true one. The techniques for the deconvolution of the detector effects are presented in Section 4.5. In section 4.6, the following systematic uncertainties were explained and calculated. This section also includes a detailed explanation of the theoretical prediction uncertainties. The measurements of track-based variables are shown in section 4.7. The measurements are performed for events with a Z boson with invariant mass between 76 and 106 GeV, corresponding to the peak region, 125 and 150 GeV, 150 and 350 GeV and 350 and 1500 GeV. Track-based variables are also measured in four different Z boson transverse momentum regions: below 6 GeV, from 6 to 12 GeV, from 12 to 25 GeV and above 25 GeV. The measurements have been compared with the three theoretical predictions described in the introduction.

Chapter 5 contains the results of measurements of jet based event shape observables in the production of the Z boson in association with jets. These observables are measured in events with a Z boson in the mass peak region. The definitions of the jet based observables, $\tau_{\max}$ and τ_{sum} , are presented in Section 5.1. The importance of the cross section measurement dependence on such variables and their advantages with respect to the jets selection according to their transverse momentum value is explained. Section 5.2 describes jet reconstruction and selection. Two methods of suppression of the pileup contribution from the jet reconstruction are compared and the one more appropriate for the N-jettiness measurements is adopted. Section 5.3 explains additional systematic uncertainties which arise due to the jet selection: the jet energy scale and jet energy resolution uncertainties. The results are presented in section 5.4 starting with results on all the uncertainties of the jet based variables. The detector level distributions comparison between data and Monte Carlo are shown. The results on the differential cross sections on jet based variables conclude this chapter. The experimental measurements are compared with the same theory calculations as used in chapter 4.

Finally, the results of the thesis are summarized in the **Conclusion**.

2. Dissertation evaluation

- 2.1 **Problem** (state unresolved and controversial opinions about the research problem and previous attempts to solve the problem, solutions reached by other authors, assessment of the dissertation basis in accordance with the publications and research of the candidate and the way they relate to the dissertation)

A number of data analyses at the LHC categorise events according to their number of hadronic jets. Analyses selecting a vector boson fusion (VBF) process typically require two jets separated with a rapidity region gap with a low hadronic activity, for instance by requiring a two-jet system with a large invariant mass. Such categorisations or selections imply a phase space with a restriction on additional QCD emissions. The restriction makes the cross section sensitive to soft and collinear radiation and introduces at all orders of strong coupling constant, α_s , of the perturbative calculation $\alpha_s^n \log^{2n}(Q/p_T^{\text{veto}})$ terms, where Q is the event energy scale and p_T^{veto} the p_T threshold above which jets are vetoed. The more stringent is the veto (lower p_T^{veto}), the larger are the logarithm terms. Because of the poor convergence of the perturbative calculation of the cross section, the terms are particularly large for the Higgs boson production, leading to uncertainty of about 11% for an NNLO calculation and up to 8% for an NNLO+NLL (next-to-leading-logarithmic) calculation with $p_T^{\text{veto}} = 25$ GeV and anti- k_T jet clustering algorithm with a distance parameter of $R = 0.5$. For small distance parameter values ($R \ll 1$), the clustering induces logarithmic terms in R , that contribute at NLL in the exponent of the cross section, which are difficult to resume. Frank J. Tackmann et al. proposed the use of inclusive variables that can be resummed at higher order and allow reaching an accurate cross section calculation with state-of-the-art calculations. Two types of variables have been proposed, inclusive ones that do not depend on a jet clustering algorithm, and therefore simplify the resummation (τ_N), and jet-based ones, more straightforward to use experimentally (τ_{max}). Contrary to jets, there are very few measurements in the literature that confront the predictions for these variables with the experimental data and they are limited to τ_0 . This thesis fills the gaps by providing details measurements of these variables with two goals, giving confidence in using them as jet veto and providing experimental results for higher-order term resummation.

2.2 Goals and hypotheses of the dissertation

The main goals

1. The measurements of differential cross sections of Z boson production in association with jets in proton-proton collisions at the center-of-mass energy of 13 TeV as functions of track-based event shape variables: zero-jettiness, one-jettiness and sum of the transverse momentum of the charged particles for a Z boson in the mass peak region, for five transverse momentum regions, inclusive, below 6 GeV, between 6 and 12 GeV, between 12 and 25 GeV and above 25 GeV.
2. The measurements of the same differential cross sections for an off-shell Z boson of high mass, in different mass interval, between 125 and 150 GeV, 150 to 350 GeV and 350 and 1500 GeV.
3. The measurements of differential cross section of Z boson production in association with jets in proton-proton collisions at center of mass energy of 13 TeV as a function of jet-based event shape variables: τ_{sum} and τ_{max} .

4. The comparison of the differential cross section measurements of N-jettiness variables with state-of-the art theoretical calculations.
5. The studies of the performance and intercalibration of the Electromagnetic calorimeter during Run 2 data taking period (2016, 2017 and 2018).

2.3 Essential methods applied in the dissertation and their suitability. If a new or amended method has been applied, describe what is new

The data used in this thesis are obtained by using the CMS detector at CERN in Geneva. This detector has a compact structure with a lot of subdetector systems. The central part is a large superconducting solenoid with a length of 12.5 m and a radius of 6 m. The nominal value of magnetic field that it can produce is 4T. Inside the solenoid the tracking detector, the electromagnetic calorimeter (ECAL) and the hadron calorimeter (HCAL) are all installed. Outside the solenoid is the iron return yoke of the magnet, interleaved with layers of muon detectors.

In order to reconstruct and identify particles the algorithm called PF algorithm is used. This algorithm combines the information of all the subdetectors, enabling the best possible identification and energy measurements for all types of objects. The PF algorithm uses information about tracks from the tracker and muon system, and calorimeter clusters from the ECAL and HCAL. This algorithm allows us to reconstruct photons, neutral hadrons, charged hadrons, electrons and muons and it also provide us jet reconstruction and missing transverse momentum determination. The event selection starts with muons whose path extrapolated from the tracker is consistent with a muon track from the muon system and information about the energy is obtained from the curvature of the track.

To obtain the cross section measurements in the physics analysis, it is necessary to compare experimental data with the simulation in order to apply the techniques for the deconvolution of detector effects. Proton – proton interaction is generated using the MADGRAPH5 AMC@NLO generator and the CMS detector itself is modelled using GEANT4. Reconstruction of simulated events has been done in the same way as for the experimental data. To analyse both experimental and simulated data, a common software framework developed by the CMS collaboration together with the ROOT data analysis framework is used. The analysis has required the development of programs in the C++ and Python languages.

In this thesis, the efficiencies of the double muon trigger used in the analysis were obtained for data and simulation and the ratio of the two has been used as scale factor corrections applied to the simulated data. For this, the combination of two data-driven techniques, the *Reference-trigger* and the *Tag & Probe*, are used.

With this thesis a new method for the classification of events based on the number of jets has been implemented in CMS.

The method used to compare the ECAL performance across years has been innovative and has been used for the first time in this thesis. It has allowed to factor the effects of pileup out of the performance comparison. Datasets have been acquired under increasing LHC luminosity, which

has been an increasing challenge from the detector point of view. Thanks to the innovative method proposed in the thesis, it has been possible to prove that the performance has remained consistent across years and that the calibration of the detector has not degraded over time.

2.4 Results of the dissertation and their interpretation

The distributions of τ_0 measured for different transverse momentum of the Z boson, $p_T(Z)$, have been measured and compared with the predictions computed with aMC@NLO and GENEVA. The integral below $p_T(Z)$ of 1 GeV is underestimated by the aMC@NLO predictions especially for low and moderate $p_T(Z)$ (< 12 GeV). The resummation included in GENEVA improves the prediction of this integral for the distribution inclusive in $p_T(Z)$ and restricted to values below 6 GeV. Discrepancies are observed for higher transverse momentum reaching 50% for a phase space restricted to $p_T(Z) > 25$ GeV. When considering the full range of the distribution, the prediction including the resummation provides a better description of the measurement for a phase space inclusive in $p_T(Z)$. When $p_T(Z)$ is restricted to either be below 6 GeV or between 6 and 12 GeV, the level of agreement is similar for the predictions with and without the resummation. For larger values, $12 < p_T(Z) < 25$ GeV interval and especially for $p_T(Z) > 25$ GeV, the data are better described with the aMC@NLO predictions. The part of the distribution with τ_0 below the $p_T(Z)$ threshold must be mainly populated by events with a hadronic activity balancing the p_T outside the pseudorapidity acceptance. Difficulty to reproduce the p_T -balance in Z+jets events with the jet rapidity restricted to $|y| < 2.4$ has been observed before by CMS. Discrepancies in the τ_0 distribution are also observed for value above the $p_T(Z)$ threshold with a shape similar between aMC@NLO and GENEVA.

The τ_0 distribution has also been measured inclusively in $p_T(Z)$ requiring the boson to be off-shell with a larger mass enlarging the contribution from the cross section logarithmic term, $\alpha_s^n \log 2n(Q/p_T^{\text{veto}})$. The agreement with the measurement is similar for the calculation with and without the resummation. The coverage of the difference with the measurement by the uncertainty estimated by the respective calculation is worst for the calculation with resummation, for which we would have expected a better control of the uncertainties.

The differential cross sections depending on τ_1 have been measured for the same $m_{\mu\mu}$ and $p_T(Z)$ intervals as τ_0 . The accuracy for this observable is expected to be similar for GENEVA and fixed order calculations and this is confirmed by the observation. The shape of the three predictions are similar and differences are mostly on the total cross section values, computed at different orders. For a mass around the Z peak, discrepancies up to 90% are observed at low values of τ_1 , in a region covered by the parton showering. For $p_T(Z)$ between 25 and 35 GeV, the prediction that includes the maximum number of jets in the ME is the closest to the measurement. The GENEVA prediction provides a good description of the measurement for all the mass regions above the Z boson peak and τ_1 bins. The predictions from aMC@NLO calculations are similar except for the $\tau_1 \in [0, 0.2]$ GeV bin and $p_T(Z) \in [125, 150]$ GeV, where it overshoots the data.

The results on the sum of the charged particle p_T are obtained for the same dimuon mass and $p_T(Z)$ bins as τ_0 and τ_1 . For a phase space inclusive in $p_T(Z)$, the GENEVA and aMC@NLO predictions describe fairly the data independently of the dilepton mass, but with a flatter distribution around 10 GeV for aMC@NLO FxFx for all mass ranges and for both FxFx and kT-MLM for the off-shell regions. In addition, the aMC@NLO predictions provide a good description when the phase space is restricted to $p_T(Z) > 25$ GeV with a boson in the mass peak.

Concerning jet-based variables, $\tau_{\max}$ and τ_{sum} , some discrepancies are observed for the lower value bin of $\tau_{\max}$ between the GENEVA prediction and the data. For the rest of the $\tau_{\max}$ all the predictions match with the measurement. All the generated samples predict a more prominent peak of the τ_{sum} distribution, with a more pronounced effect for GENEVA. The uncertainties computed for GENEVA do not cover the observed difference with the measurement.

In order to optimize the performance, a calibration of the relative response of the ECAL channels and corrections for the response variation in time are performed. The Run 2 data taking period, with the increased pileup and radiation level, created a challenging environment for ECAL. The work in the thesis included delivering the intercalibration constants using the Drell-Yan pairs from the $Z \rightarrow e^+e^-$ decay and studying the performance of ECAL. The intercalibration constants were derived for all three years of the Run 2 data-taking period. The constant monitoring and calibration resulted in excellent performance of ECAL during Run 2. The energy resolution for electrons from Z-boson decays is at the level of 1.7% in the low pseudorapidity region. It was also shown that the performance with Run 2 data is very close to the one from Run 1 despite the ageing of the detector and much higher instantaneous luminosity provided by the LHC.

2.5 **Conclusions** (consistency with results and logical interpretation)

Differential cross sections have been measured as a function of track-based event shape variables and as a function of jet-based event shape variables. The measurements have been compared with two theoretical predictions based on fixed-order parton-level cross sections calculated at LO or NLO accuracy in QCD for different light-parton multiplicities, merged and matched with parton shower computed with MadGraph5_aMC@NLO, one merging multiplicities from zero to four at LO and the other from zero to two at NLO. The experimental measurements have also been compared with a prediction at NNLO at fixed order combined with the resummation of higher-order terms in 0-jettiness and matched with parton shower obtained with GENEVA. Track-based variables that have been measured are the zero-jettiness, one-jettiness and the sum of the transverse momentum of charged particles. These variables can be used as a veto for hard radiation or jets and to define a theoretically well-controlled exclusive N-jet cross section. Track based variables are very sensitive to the underlying events and soft radiation, therefore studies of these variables give valuable input for event generator developments. The measurements are performed for the events with pairs of muons produced in the decay of an on-shell Z boson with invariant mass between 76 and 106 GeV, and for the off-shell Z boson with invariant mass between 125 and 150 GeV, 150 and 350 GeV and 350 and 1500 GeV. Track based variables are also measured in four different Z boson transverse momentum regions. The measurements for on-shell Z bosons showed that the low zero-jettiness region in the inclusive case is best described by the GENEVA prediction. In the higher Z boson transverse momentum region, where we expect to have one or more jets accompanying the Z boson, among the predictions MADGRAPH5 aMC@NLO is doing best. For the higher invariant mass regions, all predictions show a fair agreement with the data. Measurements of these variables show a good potential for studies of the underlying events. By studying track based variables for the invariant mass above the Z peak, the regime similar to the Higgs boson has been explored.

Jet-based variables that have been measured are $\tau_{\max}$ and τ_{sum} . These variables are defined using the jet transverse momentum weighted by a rapidity dependent function. Jet-based variables introduce a possibility to apply a tight veto on central jets while at forward rapidities the veto constrains get looser. The $\tau_{\max}$ variable showed a good agreement with the predictions, especially

with MadGraph5_aMC@NLO. This variable can be used as a jet veto.

3 Final evaluation of the dissertation

3.1 Compliance with the explanation of the topic

Both themes of the thesis, the physics measurement, and the optimization of the detector performance, have been explored in detail. The work fully complies with the explanation of the topic.

3.2 Possibility of repeatability

The measurement has been performed using the CMS experiment data. It could be repeated using the data of the ATLAS experiment. It can also be repeated with both set of data by exploiting the electron-positron pair decay of the Z boson.

Nevertheless, the analysis is complex and will be difficult to reproduce by someone external to the CMS collaboration.

A numerical form of the results will be published in addition to the article in HEPDATA (<https://www.hepdata.net/>) and be included in the Robust Independent Validation of Experiment and Theory (Rivet, <https://rivet.hepforge.org/>) to allow a comparison with any calculation.

3.3 Future research

The thesis aims to study new variables proposed to be used in place of jet vetoes in HEP data analyses. The work has shown that the modeling of N-jettiness variables by Monte-Carlo generators is worse than the modeling of jets. Therefore, it calls for research on improving the theoretical calculations, first in the view of their usage in data analysis, and second for a better understanding of the resummation of higher terms.

3.4 Dissertation limitations and their impact on the value of the dissertation

No particular limitations.

Original scientific contribution

(give clarification: originality (originality (completely new knowledge, addition / expansion of existing knowledge or refutation of existing knowledge), the impact of dissertation results on the progress of the scientific field, the impact of results on the profession (directly, indirectly))

This work contributes to the understanding and modeling of soft gluon radiation in proton-proton collisions. It provides measurements of variables introduced in 2010 and which have been recently used in cross-section calculations and brought them to an unprecedented accuracy, next-to-next-to-leading order (NNLO) in α_s combined to next-to-next-to-leading logs (NNLL) and parton shower. Calculations including parton shower are extremely important from the

experiment point of view because they allow the simulation of the proton-proton collisions including the response of the detector, which is not the case for fixed-order calculation. The simulation is essential in the design and the data exploitation of experiments like CMS. This variable has been measured so far only in the special case of $N=0$ (0-jettiness). This thesis is its first measurement for $N \geq 1$.

The contribution from the higher terms is higher in the case of the Higgs boson production. A similar resummation regime can be reached requiring an off-shell Z boson with a high Z mass. The Z boson, produced abundantly at the LHC, has been used as a proxy to understand the rare production of the Higgs boson and validate the cross section calculations. In addition, this variable can be exploited in the discrimination of the different production mechanisms of the Higgs bosons, which are characterized by several and different jets in the final state.

The ECAL detector provides detection and energy measurements of photons, electrons and positrons and is therefore a key component of CMS. To perform high precision measurements and searches an excellent performance of this detector is necessary.

Opinion and proposal of the commission

(give opinion and proposal)

The thesis presents the first measurements of the N-jettiness variables in the production of real and virtual Z boson events with the CMS detector and performance of its electromagnetic calorimeter.

Because of the good convergence of its cross section perturbative series, the production of a Z boson is an excellent playground to test resummation and confront the calculations with measurements. Resummation regimes similar to the Higgs boson can be reached requiring an off-shell Z boson with a high Z mass.

The electromagnetic calorimeter plays a crucial role within the CMS detector system and such good resolution achieved with the contribution of the work presented in this thesis is of vital interest for the scientific program of the collaboration.

Results of the dissertation have been shown at international conferences and CMS workshops. The results on the electromagnetic calorimeter have been published in the Journal of Instrumentation which is a leading journal in particle physics instrumentation.

Jelena Mijušković on behalf of the CMS collaboration

„The CMS electromagnetic calorimeter upgrade: high-rate readout with precise time and energy resolution“,

Journal of Instrumentation (JINST) 2022 17 C01004

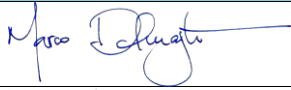
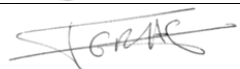
A publication of the measurements of the N-jettiness variables is in preparation. The analysis and the paper draft are currently under review within the CMS collaboration.

Having in mind all the above, the commission is pleased to propose to the Council of the Faculty of Natural Sciences and Mathematics of the University of Montenegro to accept the doctoral dissertation entitled “Measurement of the N-jettiness variables in the production of Z boson events with the CMS detector and performance of its electromagnetic calorimeter” of candidate Jelena Mijušković, as well as to propose to the Senate of the University of Montenegro, to appoint a commission for the defense of this doctoral dissertation.

Dissenting opinion

(fill in if a member of the commission has a dissenting opinion)

Ime i prezime

Remark	
(popuniti po potrebi)	
KOMISIJA ZA OCJENU DOKTORSKE DISERTACIJE	
Dr Marco Delmastro, research director, LAPP, Univerzitet Savoie Mont Blanc, CNRS/IN2P3, Annecy, France	
Dr Ulla Blumenschein, senior lecturer, School of Physics and Astronomy, Queen Mary, University of London, England	
Dr Philippe Gras, researcher with permanent position, CEA-IRFU, Saclay, Paris, France	
Dr Federico Ferri, researcher with the HDR (habilitation a diriger des recherches), CEA-IRFU, Saclay, Paris, France	
Dr Nataša Raičević, professor, University of Montenegro, Montenegro	
Datum i ovjera (pečat i potpis odgovorne osobe)	
Podgorica 30.05.2022.	DEKAN _____
MP	